

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

ISSN 2307-2180

Метрологія



Та прилади

№ 5(55), 2015

Науково-виробничий журнал

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
ТОВ виробничо-комерційна
фірма «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року

Рік випуску десятий

Передплатний індекс 92386

Редакційна колегія:

Большаков В. Б., д. т. н., с. н. с.
Варша З., д. т. н., Польща
Величко О. М., д. т. н., проф.
Віткін Л. М., д. т. н., проф.
Володарський Є. Т., д. т. н., проф.
Гінзбург М. Д., д. т. н., проф.
Грищенко Т. Г., д. т. н., с. н. с.
Гудрун В., д. т. н., Німеччина
Домницький Р. А.
Жагора М. А., д. т. н., проф., Білорусь
Захаров І. П., д. т. н., проф.
Зенкін А. С., д. т. н., проф.
Коломієць Л. В., д. т. н., проф.
Косач Н. І., д. т. н., с. н. с.
Кошева Л. О., д. т. н., проф.
Крюков О. М., д. т. н., проф.
Кузьменко Ю. В.
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.
Неежмаков П. І., д. т. н. доц.
Петришин І. С., д. т. н., проф.
Пістун Є. П., д. т. н., проф.
Радев Х., д. т. н., проф., Болгарія
Рожнов М. С., к. х. н., с. н. с.
Руженцев І. В., д. т. н., проф.
Скубіс Т., д. т. н., проф., Польща
Столярчук П. Г., д. т. н., проф.
Сурду М. М., д. т. н., проф.
Туз Ю. М., д. т. н., проф.
Хакімов О., д. т. н., проф., Узбекистан
Чалий В. П., к. т. н., с. н. с.
Черепков С. Г., к. т. н., доц.
Чуновкіна А. Г., д. т. н., Росія

Редакційна група:

Головний редактор Фісун В. П.
Науковий редактор — відповідальний
секретар Винокуров Л. І.
Дизайнер-верстальник Зайцев Ю. О.

Журнал **рекомендовано до друку**

вченою радою ХНУРЕ

(протокол №7 від 03.11.2015)

Адреса редакції:

61002, Харків, вул. Миросицька, 40;
Тел.: (057) 700-46-81, (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
mp@metrology.kharkov.ua
<http://www.metrolog-prylady.com/>
<http://www.amu.in.ua/journal1>

Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»
61140, Харків, пр-т. Гагаріна, 94-А, кв. 35;
Свідцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 04.11.2015.

Формат 60×84/8. Папір крейдований.

Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.

Друк офсетний. Тираж 500 прим.

Замовлення № 26.

© «Метрологія та прилади», 2015

Журнал **зареєстровано**
у Державній реєстраційній
службі України, свідоцтво серія
КВ № 20033-8933ПР від 17.05.2013;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, наказ
Міністерства освіти і науки України
№ 747 від 13.07.2015

Журнал **включено** до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від 08.03.2013

У Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ) 27—29 жовтня відбулася III Міжнародна конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2 015), яку проводять кафедра метрології й промислової автоматики ВНТУ та Академія метрології України.

Організаторами цієї конференції також виступили Новий університет Лісабона (Португалія), Техніко-гуманітарна академія (м. Бельсько-Бяло, Польща), Державне підприємство «Вінницький науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації», Навчально-науковий центр «Паллада».

Відкрив конференцію привітальним словом ректор університету, професор Володимир Грабко, побажавши всім учасникам наукових успіхів. Він відзначив, що конференція вже стала традиційною й користується великою популярністю серед учених, які працюють у сфері метрології та інформаційно-вимірювальних технологій. Володимир Грабко вручив грамоту почесному професору ВНТУ, президенту Академії метрології України Євгену Володарському за вагомий внесок у підготовку наукових кадрів ВНТУ і генеральному директору ДП «Вінницястандарт-метрологія» Андрію Астахову за вагомий внесок у розвиток матеріальної бази кафедри метрології та промислової автоматики ВНТУ й допомогу в проведенні конференції. Він відзначив, що на ДП «Вінницястандарт-метрологія» працюють 55 випускників кафедри.

З привітаннями також виступили проректор з наукової роботи ВНТУ, професор Сергій Павлов і декан факультету комп'ютерних систем та автоматики, професор Олег Бісікало. Продовжив пленарне засідання почесний професор ВНТУ Євген Володарський з доповіддю «Метрологія — наука про вимірювання й їх застосування».

Доцент Володимир Папінов повідомив про створену сучасну міжкафедральну лабораторію «Багатофункціональний навчальний комп'ютеризований комплекс засобів промислової мікропроцесорної техніки». Завершив пленарне засідання доповіддю «Елементи теорії вимірювального контролю параметрів біотехнічної системи доіння» доцент Павло Кулаков.

За напрямками роботи конференції працювали чотири секції:

1. Теоретичні основи вимірювання, контролю й технічної діагностики. 2. Первинні вимірювальні перетворювачі. Прилади й методи контролю та діагностики. 3. Метрологічне забезпечення засобів вимірювань, контролю та діагностики. 4. Математичне моделювання процесів у засобах вимірювання, контролю та діагностики. Інформаційно-вимірювальні системи.

На секційних засіданнях виступили 15 докторів і 25 кандидатів технічних наук. Активну участь в обговоренні теоретичних і практичних проблем взяли 90 фахівців із різних регіонів України: Києва, Харкова, Дніпропетровська, Одеси, Львова, Івано-Франківська, Житомира, Хмельницького, — науковці з Узбекистану й Сенегалу, аспіранти, магістранти й студенти ВНТУ.

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ

Володарский Е., Кошечая Л., Варша З.

Метод уменьшения неопределенности принятия решения при измерительном контроле. Часть 1. Влияние функции преобразования измерительного канала на неопределенность результатов контроля3

MEASURING CONTROL

Volodarsky E., Kosheva L., Warsza Z.

The Method of Reducing Uncertainty of Decision-Making in the Measuring Control. Part 1. Influence of Function Transformation of the Measuring Channel on Uncertainty of Results of Inspection

ВИМІРЮВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ

Воробіов Л., Грищенко Т., Декуша Л., Ковтун С.

Методичні похибки за вимірювання густини теплового потоку9Methodical Error in Heat Flow Density Measuring

MEASUREMENT AND TESTS

Vorobiov L., Gryshchenko T., Dekusha L., Kovtun S.

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Купко О., Терещенко В.

Вимірювання кореляційної колірної температури ламп з вольфрамовим тілом розжарювання16Measurements of the Correlated Color Temperature Lamps with Tungsten Incandescent Body

METROLOGICAL ASSURANCE

Kupko A., Tereshchenko V.

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ю. Ведмицький, В. Кухарчук, В. Граняк

Числове перетворення вібропараметрів гідрогенератора на основі інтегральних віброприскорень 1-го і 2-го порядків21The Numerical Transformation for Vibroparameters of Hydrogenerator on the Basis of Integrated Vibration Accelerator of the 1st and 2nd Orders

PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

Vedmitsky Yu., Kuharchuk V., Graniak V.

ПОВІРКА ТА КАЛІБРУВАННЯ

Кепешчук Т.

Повірка (калібрування) масових витратомірів. Оцінювання похибки та невизначеності вимірювань28Verification (calibration) Mass Flowmeter. Evaluation of the Error and Uncertainty of Measurements

VERIFICATION AND CALIBRATION

Kepeshchuk T.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

Квасніков В., Лещенко Ю.

Інтелектуальна система моделювання випадкових процесів з комплексним підходом визначення похибок34Intellectual System of Modeling Random Processes with an Integrated Approach to Determining Errors

INTELLECTUAL MEASURING SYSTEMS

Kvasnikov V., Leschenko Yu.

ЗАСТОСУВАННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ

Борис І., Крупей М., Галуґа В.

Пристрої для вимірювання та регулювання. Модернізація старих автоматизованих систем управління.....39Devices for Measuring and Regulation. Modernization of Old Automated Control Systems

APPLICATION AND MODERNIZATION

Borys I., Krupej M., Haluha V.

ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

Косач Н., Бейнер Н.

Методи математичної статистики як інструмент прогнозування температури циркуляційної води у відкритих гідротехнічних спорудах АЕС44Methods of Mathematical Statistics as a Prediction Tool of the Circulating Water Temperature at the Open Hydraulic Structures of the NPP

PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

Kosach N., Beyner N.

МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Костира О., Лівнов В.

Експериментальні дослідження ультразвукової системи локального позиціонування49Experimental Investigation of Ultrasonic Local Positioning System

MEASURING SYSTEMS MODELATION

Kostyrya A., Livnov V.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Склярів В., Гур'єв М., Забельський А.

Моделювання та оцінювання процесу старіння і деградації гермопроходок АЕС56Modeling and Evaluation of the Aging and Degradation Process of Sealed Enclosure System of Nuclear Power Plant

EXPERIMENTAL RESEARCHES

Skliarov V., Huriev M., Zabelskyi A.

ВІЙСЬКОВА МЕТРОЛОГІЯ

Дзисюк О., Бойко В., Рондін Ю.

Актуальні питання метрологічного забезпечення зразків (комплексів) озброєння та військової техніки у процесі переведення на експлуатацію за технічним станом62Pressing Questions of Metrological Assurance of Samples (Complexes) of Arms and the Military Techniques While Translating on Operation on the Technical Condition

MILITARY METROLOGY

Dzysjuk A., Bojko V., Rondin Yu.

МЕТРОЛОГІЯ У ЖКГ

Шатохіна Ю.

Забезпечення контролю якості стічних вод67Assurance of Control of Wastewater Quality

METROLOGY IN HOUSING AND COMMUNAL SERVICES

Shatohina Yu.

ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ

План набору слухачів на 2016 рік72State Enterprise for Year 2016

TRAINING EXPERTS**ІНФОРМАЦІЯ**

8, 27, 43

INFORMATION

УДК 658.562

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КОНТРОЛЕ. ЧАСТЬ 1. ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА НА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ

Е. Володарский, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации экспериментальных исследований, Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев,

Л. Кошечая, доктор технических наук, профессор кафедры биокрибернетики и аэрокосмической медицины, Национальный авиационный университет, г. Киев,

З. Варша, кандидат технических наук, доцент, Институт промышленных исследований автоматизации и измерений, г. Варшава (Польша)

Показана необходимость учета вида характеристики преобразования средства измерений при оценивании неопределенности принятия решения по результатам измерений. Рассмотрены соотношения составляющих функции преобразования средства измерений, их влияние на вероятность и характер принимаемых решений. Приведены возможные варианты сочетаний составляющих функции преобразования и соответствующие им неопределенности принятия решений.

Shown the need to consider the type of conversion characteristic measuring means for estimating

the uncertainty of the decision on the results of measurements. Considered the relation the components a conversion function of the instrument, and their influence on the probability and character of decisions. It is shown that the actual shift characteristic and its sensitivity is within these limits may have different values, which may lead not only to change the probability (uncertainty) of the received solutions, but also to change its character. The possible combinations of variants components function and the corresponding uncertainty of decision-making. Therefore, it is necessary to normalize not only deviation of the real conversion characteristics of the nominal, but also its allowable the bias and sensitivity.

Ключевые слова: контроль, средство измерений, функция преобразования, чувствительность, смещение, неопределенность, принятие решения.

Keywords: inspection, means of measurement, the conversion function, sensitivity, bias, uncertainty, decision-making.

ВВЕДЕНИЕ

При измерительном контроле процедуре сравнения с нормами предшествует измерение/преобразование величины, несущей информацию о характерных свойствах объекта. При этом реальная характеристика $\varphi(x) = a + bx$ измерительного канала (ИК) отличается от его номинальной характеристики $\varphi_0(x)$.

Присущая результату измерений неопределенность [1] влечет за собой и неопределенность принятия решения. Мерой доверия к принимаемому решению является достоверность суждения о соответствии объекта нормам, которая характеризуется вероятностью ложного отрицательного решения и вероятностью ложного положительного решения.

В свою очередь свойство объекта характеризуется величиной x , несущей информацию о его качестве. Соответствие объекта предъявляемым к нему требованиям задается в виде нижнего x_l и верхнего x_h предельных допустимых значений. Таким образом, исходное решающее правило для контролируемой величины имеет вид:

$$x_l \leq x \leq x_h. \quad (1)$$



Е. Володарский



Л. Кошечая



З. Варша

Вероятность того, что на контроль поступил исправный (*serviceability*) объект (рис.1, а) равна:

$$P(S) = \int_{x_l}^{x_h} f(x) dx, \quad (2)$$

где $f(x)$ — плотность распределения возможных значений контролируемой величины.

Для установления соответствия контролируемого объекта предъявляемым требованиям проводят измерение (измерительное преобразование) величины x . Полученный результат сравнивают с уставками $\varphi_0(x_l)$ и $\varphi_0(x_h)$, значения которых соответствуют исходным граничным значениям величины x (допуску) в предположении, что характеристика преобразования ИК является номинальной $\varphi_0(x)$. Под уставками понимают отображение допуска в масштабе выходной величины y .

Известно, что в ИК входят средства измерений, преобразующие контролируемую величину x в величину, удобную для сравнения. Поскольку из-за несовершенства технологии производства средства измерений реальная характеристика ИК $\varphi(x)$ отличается от номинальной $\varphi_0(x)$, решающее правило, на основании которого принимается решение о пригодности объекта, примет вид:

$$\varphi_0(x_l) \leq \varphi(x) \leq \varphi_0(x_h). \quad (3)$$

Вероятность принятия решения о *годности* (found fit) объекта (рис.1, б)

$$P(F) = \int_{x_l}^{x_h} f_1\{\varphi(x)\} dx, \quad (4)$$

где $f_1\{\varphi(x)\}$ — трансформированная плотность распределения возможных значений контролируемой величины, учитывающая реальную характеристику $\varphi(x)$ преобразования ИК.

Как видно, решающее правило (3) принятия решения *годен* отличается от исходного решающего правила (1) об *исправности* объекта (соответствия приписанным нормам). Различными будут и соответствующие вероятности $P(F)$ и $P(S)$.

Таким образом, неидеальность преобразования может приводить к ошибочным решениям, которые характеризуют ложный отказ P_f (*false refuse*) или необнаруженный отказ P_u (*unfound refuse*). Вероятность возникновения ошибочных решений, то есть неопределенность оценки соответствия объекта нормам, представляется выражениями:

- для ложного отказа:

$$P_f = P[x_l \leq x \leq x_h; \varphi(x) < \varphi_0(x_l)] + P[x_l \leq x \leq x_h; \varphi(x) > \varphi_0(x_h)] \quad (5)$$

- для необнаруженного отказа:

$$P_u = P[x < x_l; \varphi_0(x_l) \leq \varphi(x) \leq \varphi_0(x_h)] + P[x > x_h; \varphi_0(x_l) \leq \varphi(x) \leq \varphi_0(x_h)] \quad (6)$$

Как видно из выражений (5) и (6), для оценивания достоверности принятия решения о состоянии объекта необходимо располагать не только плотностью распределения возможных значений исследуемой величины $f(x)$, но и плотностью распределения трансформированного распределения (его сдвигом и изменением масштаба) $f_1\{\varphi(x)\}$. Затем необходимо производить свертку законов распределения возможных значений измеряемой величины $f(x)$ и результатов их преобразования $f_1\{\varphi(x)\}$. Данная процедура является довольно громоздкой и не позволяет производить экспресс-анализ при оценивании неопределенности принятия решения, обусловленной инструментальной составляющей неопределенности, вносимой ИК.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ниже рассматривается подход, который позволяет на основании исходного закона распределения возможных значений контролируемой величины оценить влияние неидеальности характеристики преобразования ИК на достоверность контроля. Это позволяет обосновано выбирать средства измерений, входящие в ИК, для обеспечения заданной определенности принятия решений. Рассматриваемый подход базируется на пересчете уставок $\varphi_0(x_l)$ и $\varphi_0(x_h)$ «к входу» и определении интервалов неопределенности принятия решения по отношению к верхнему x_h и нижнему x_l граничным значениям, исходя из плотности распределения $f(x)$ возможных значений контролируемой величины.

Для приведения влияния реальной характеристики к входу ИК, то есть по отношению к входной величине x , осуществим обратное математическое преобразование неравенства (3):

$$\varphi^{-1}[\varphi_0(x_l)] \leq \varphi^{-1}[\varphi(x)] \leq \varphi^{-1}[\varphi_0(x_h)],$$

где $\varphi^{-1}(\cdot)$ — оператор обратного математического преобразования.

Выделим в этом неравенстве исходное решающее правило (1). Для этого внесем в левую часть неравенства $\pm x_l$, а в правую — $\pm x_h$. После несложных математических преобразований, получим неравенство:

$$x_l + \{\varphi^{-1}[\varphi_0(x_l)] - x_l\} \leq x \leq x_h + \{\varphi^{-1}[\varphi_0(x_h)] - x_h\} \quad (7)$$

или

$$x_l + \theta_l \leq x \leq x_h + \theta_h, \quad (8)$$

где θ_l, θ_h — длины соответственно нижнего и верхнего эквивалентных интервалов смещения граничных значений, по отношению к которым оценивается годность объекта. Эти интервалы отображают влияние реальной характеристики преобразования ИК на достоверность принятия решения о соответствии

объекта приписанным нормам. Поскольку длина не может быть отрицательной, знак перед θ_l и θ_h показывает, с какой стороны по отношению к граничному значению x_l или x_h располагается соответствующий эквивалентный интервал.

Вероятность принятия решения *годным*, исходя из выражения (8), можно записать:

$$P(F) = \int_{x_l + \theta_l}^{x_h + \theta_h} f(x) dx = \int_{x_l}^{x_l + \theta_l} f(x) dx + \int_{x_h}^{x_h + \theta_h} f(x) dx + \int_{x_l + \theta_l}^{x_h} f(x) dx \quad (9)$$

Поскольку средний член правой части данного равенства в соответствии с выражением (4) является $P(S)$, выражение (9) можно записать в виде:

$$P(F) = P(S) + P_{err}$$

где P_{err} — вероятность ошибочных решений, обусловленных реальной характеристикой, которая пропорциональна площади под кривой функции распределения $f(x)$ на интервалах θ_l и θ_h (рис.1, в) и определяется как

$$P_{er} = P_l + P_h = \int_{x_l}^{x_l + \theta_l} f(x) dx - \int_{x_h}^{x_h + \theta_h} f(x) dx \quad (10)$$

В выражении (10) первое слагаемое характеризует вероятность необнаруженного отказа, то есть события, когда *неисправные* объекты относятся к *годным*. Это обусловлено тем, что верхнее граничное значение эквивалентно смещается вправо и тем самым расширяет область значений контролируемой величины, для которых объект признает-

ся *годным*. Второе слагаемое характеризует вероятность ложного отказа. Знак «минус» свидетельствует об исключении из исправных объектов, значение контролируемой величины которых находится в интервале $[x_l, (x_l + \theta_l)]$.

Таким образом, интервал, который установлен для параметра в случае соответствия объекта заданным нормам — объект *исправен* S (*serviceability*), и интервал принятия решения о *годности* объекта F (*found fit*) будут сдвинуты, как показано на рис. 2. Жирными линиями выделены эквивалентные интервалы смещения.

Абсолютное значение эквивалентных интервалов смещения θ_l и θ_h и знак перед ними зависят от соотношения составляющих в выражениях $\{\varphi^{-1}[\varphi_0(x_l)] - x_l\}$ и $\{\varphi^{-1}[\varphi_0(x_h)] - x_h\}$, а следовательно, от вида реальной характеристики $\varphi_0(x)$.

Проанализируем характер ошибочных решений при различных сочетаниях аддитивной и мультипликативной составляющих ИК.

Преобразованное выражение для реальной характеристики преобразования, представим в виде:

$$\varphi(x) = a + bx = b(a/b + x). \quad (11)$$

Номинальная характеристика преобразования $\varphi_0(x)$ имеет угол наклона 45° , следовательно, крутизна ее $b_0 = 1$. Угол наклона реальной характеристики будет отличаться от 45° . Предположим, что он больше. Тогда $b = (1 + \gamma)$, где γ — положительное изменение чувствительности (крутизны), то есть является мультипликативной составляющей погрешности преобразования ИК. Первое слагаемое в скобках выражения (11) является аддитивной составляющей погрешности ИК, которая может быть как положительной, так и отрицательной. При этом возможны различные сочетания значений a и b .

Начнем со случая, когда $b > 1$

1. Исходим из того, что $a > 0$.

Решающее правило о *годности* объекта примет вид:

$$x_l \leq b(a/b + x) \leq x_h.$$

После некоторых математических преобразований получим:

$$x_l/b - a/b \leq x \leq x_h/b - a/b.$$

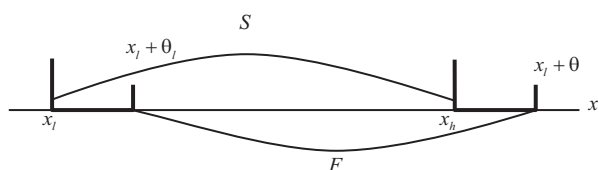


Рис. 2. Соотношение норм исправности и годности
Fig. 2. The relation of good condition and validity rates

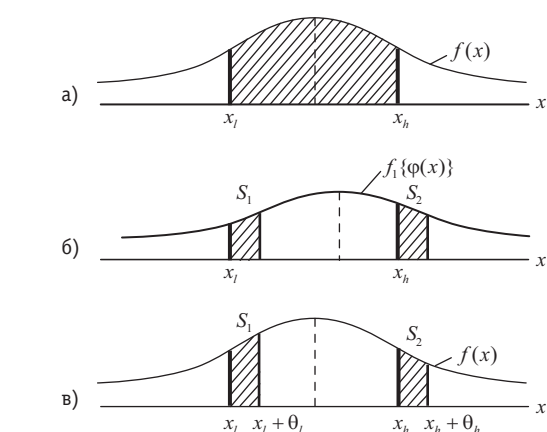


Рис. 1. а) Вероятность того, что на контроль поступил исправный (serviceability) объект; б) Вероятность принятия решения о годности (found fit) объекта; в) Вероятность ошибочных решений, обусловленных реальной характеристикой
Fig. 1. а) The probability, that serviceability object acted on the control; б) The probability for adoption of decision about found fit of object; в) The probability of mistaken decisions caused by real characteristic

Введем в левую часть последнего неравенства составляющую $\pm x_l$, а в правую $\pm x_h$. Тогда

$$x_l - \frac{(b-1)}{b} x_l - \frac{a}{b} \leq x \leq x_h - \frac{(b-1)}{b} x_h - \frac{a}{b}. \quad (12)$$

Приведенное к входу реальное решающее правило о *годности* объекта, представленное выражением (12), отличается от решающего правила (1) об *исправности* объекта, записанного в нормативной документации. Поскольку длина эквивалентного интервала – положительное число, можно записать:

$$x_l - \theta_{l1} \leq x \leq x_h - \theta_{h1}, \quad (13)$$

где $\theta_{l1} = [(b-1)x_l + a]/b$, $\theta_{h1} = [(b-1)x_h + a]/b$ — соответственно нижний и верхний эквивалентные интервалы смещения, отображающие влияние неидеальности характеристики ИК на достоверность принятия решения.

Верхний эквивалентный интервал смещен внутрь интервала, где объект является *исправным*. Следовательно, для объектов, результат измерения которых окажется в интервале $[(x_h - \theta_{h1}), x_h]$, принимается ошибочное решение о несоответствии норме (ложный отказ). Вероятность принятия такого решения:

$$P_{f1} = F(x_h) - F(x_h - \theta_{h1}), \quad (14)$$

где $F(x_h) = \int_{-\infty}^{x_h} f(x) dx$ — интегральная функция распределения возможных значений контролируемой величины.

Воспользовавшись разложением второго слагаемого в правой части выражения (14) в ряд Тейлора в окрестностях точки x_h и ограничившись его тремя членами, для нормального распределения возможных значений измеряемого параметра получим:

$$P_{f1} \approx f(x_h) + f'(x_h)\theta_{h1} - (1/2)f''(x_h)\theta_{h1}^2 - F(x_h) = f(x_h)\theta_{h1} - (1/2)f''(x_l)\theta_{l1}, \quad (15)$$

Для арксинусоидального распределения изменится знак перед производной от плотности возможных значений измеряемой величины, а при равномерном законе — это слагаемое вообще будет отсутствовать.

Из выражения (13) следует, что нижний эквивалентный интервал смещения находится вне нормированного интервала (1) принятия решения о годности объекта. Таким образом, для *неисправных* объектов, значение параметров которых находится в интервале $[(x_l - \theta_{l1}), x_l]$, принимается ошибочное решение о *годности*. В этом случае имеет место необнаруженный отказ с вероятностью

$$P_{u1} = F(x_l) - F(x_l - \theta_{l1}) \approx f(x_l)\theta_{l1} - (1/2)f''(x_l)\theta_{l1}^2. \quad (16)$$

В случае симметричного расположения граничных значений x_l и x_h по отношению к центру распределения возможных значений измеряемого параметра имеем $f(x_l) = f(x_h)$ и $f'(x_l) = f'(x_h)$. Тогда, воспользовавшись выражениями (10) и (11), получим:

$$P_{err1} = f(x_l)(\theta_{l1} + \theta_{h1}) - (1/2)f''(x_l)(\theta_{l1}^2 + \theta_{h1}^2).$$

Для равномерного закона распределения возможных значений измеряемой величины $f'(x_l) = 0$ и вероятность принятия ошибочных решений прямо пропорциональна суммарной длине эквивалентных интервалов. Причем для рассматриваемого случая $P_f > P_u$. При нормальном распределении, несмотря на то, что $\theta_{h1} > \theta_{l1}$, необходимо дополнительно учитывать соотношение между СКО возможных значений измеряемого параметра σ_x и размерами допустимой области в пределах от x_h до x_l .

2. Рассмотрим случай, когда $a < 0$.

Поскольку знак перед a изменяется, то и правило принятия решения несколько изменится:

$$x_l - \frac{(b-1)}{b} x_l + \frac{a}{b} \leq x \leq x_h - \frac{(b-1)}{b} x_h + \frac{a}{b}. \quad (17)$$

В зависимости от соотношения модулей слагаемых a/b , $[(b-1)/b]x_l$ и $[(b-1)/b]x_h$ возможны три варианта принятия решения, а именно: когда $a < (b-1)x_l$; $(b-1)x_l \leq a \leq (b-1)x_h$ и $a > (b-1)x_h$.

2.1. Вариант $a < (b-1)x_l$.

Неравенство (17) для этого случая запишется как

$$x_l - \theta_{l2} \leq x \leq x_h - \theta_{h2},$$

где $\theta_{l2} = [(b-1)x_l - a]/b$, $\theta_{h2} = [(b-1)x_h - a]/b$.

Характер ошибочных решений, возникающих в окрестностях x_l и x_h , остается таким же, как и при положительном a , но, при прочих равных условиях, вероятность этого решения меньше, поскольку $\theta_{l2} < \theta_{l1}$ и $\theta_{h2} < \theta_{h1}$.

2.2. Вариант $(b-1)x_l \leq a \leq (b-1)x_h$.

Принимая во внимание, что длина интервала величина положительная, решающее правило для результата *годен* запишется в виде неравенства:

$$x_l + \theta_{l3} \leq x \leq x_h - \theta_{h3}, \quad (18)$$

где $\theta_{l3} = [a - (b-1)x_l]/b$, $\theta_{h3} = [(b-1)x_h - a]/b$.

Как видно из неравенства (18), оба эквивалентных интервала смещены внутрь исходного (нормативного) интервала значений контролируемой величины, соответствующего состоянию объекта *исправен*. Следовательно, имеет место только ложный отказ, вероятность которого

$$P_{err3} = P_{f3} = f(x_l)(\theta_{l3} + \theta_{h3}) + (1/2)f''(x_l)(\theta_{l3}^2 + \theta_{h3}^2).$$

2.3. Вариант $a > (b-1)x_l$.

$\varphi(x)$			θ_l	θ_h	P_{err}
$b > 1$	$a > 0$		unfound $\frac{x_l(b-1)+a}{b}$	false $\frac{(b-1)x_l+a}{b}$	
	$a < 0$	$a < x_l(b-1)$	unfound $\frac{x_l(b-1)-a}{b}$	false $\frac{x_h(b-1)-a}{b}$	
	$a < 0$	$x_l(b-1) \leq a \leq x_h(b-1)$	false $\frac{a-x_l(b-1)}{b}$	false $\frac{x_h(b-1)-a}{b}$	
	$a < 0$	$a > x_h(b-1)$	false $\frac{a-x_l(b-1)}{b}$	unfound $\frac{a-x_h(b-1)}{b}$	
$b < 1$	$a < 0$		false $\frac{a-x_l(b-1)}{b}$	unfound $\frac{x_h(1-b)+a}{b}$	
	$a > 0$	$a < x_l(1-b)$	unfound $\frac{x_l(1-b)-a}{b}$	false $\frac{x_h(1-b)-a}{b}$	
	$a > 0$	$x_l(1-b) \leq a \leq x_h(1-b)$	unfound $\frac{a-x_l(1-b)}{b}$	unfound $\frac{x_l(1-b)-a}{b}$	
	$a > 0$	$a > x_h(1-b)$	unfound $\frac{a-x_l(1-b)}{b}$	false $\frac{a-x_h(1-b)}{b}$	

Правило принятия решения *годен* примет вид:

$$x_l + \theta_{l4} \leq x \leq x_h + \theta_{h4},$$

где $\theta_{l4} = [a - (b-1)x_l]/b$, $\theta_{h4} = [a - (b-1)x_h]/b$.

Вероятность принятия ошибочного решения:

$$P_{err4} = f(x_l)(\theta_{l4} + \theta_{h4}) + (1/2)f'(x_l)(\theta_{l4}^2 + \theta_{h4}^2).$$

Результаты проведенного анализа для случаев $b < 1$ и $b > 1$ приведены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ


Смещение реальной характеристики (аддитивная погрешность) и изменение ее чувствительности (мультипликативная погрешность) могут быть как положительными, так и отрицательными. Различные сочетания этих составляющих погрешности преобразования приводят не только к изменению вероятности (неопределенности) принятого решения, но и к изменению характера принимаемых ошибочных решений — ложный или необнаруженный отказ. В связи с этим, необходимо

нормировать отклонение реальной характеристики преобразования от номинальной с учетом знака этого отклонения, что позволит установить характер и вероятность ошибочных решений.

Во второй части статьи будет рассмотрен метод позволяющий уменьшить неопределенность принятия решения, обусловленную инструментальной составляющей ИК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. ISO, Switzerland. (Руководство по оцени-

ванию неопределенности измерений: Первая редакция. ISO, Швейцария. — 1993. — р/с. 101. 

Отримано / received: 26.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С.І. Кондрашовим (Україна).
Prof. S.I. Kondrashov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України

Міністерство освіти і науки України

Національний науковий центр «Інститут метрології»

Харківський національний університет радіоелектроніки

Північно-східний науковий центр Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України

Х Міжнародна науково-технічна конференція

«МЕТРОЛОГІЯ ТА ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА» («МЕТРОЛОГІЯ–2016»)

5—7 жовтня 2016 р., м. Харків

Національний науковий центр «Інститут метрології» Мінекономрозвитку України під егідою COOMET

Планується розглянути такі питання:

- законодавча метрологія;
- відтворення та поширення одиниць New Si;
- методи та методики вимірювань;
- теорія вимірювань;
- невизначеність та простежуваність у вимірюваннях;
- калібрування та повірка;
- звірення та передавання розмірів одиниць фізичних величин;
- еталони та високоточні засоби вимірювальної техніки;
- інформаційно-вимірювальні системи, інтелектуальні вимірювання;
- міжнародне співробітництво.

Можна подати доповіді у таких видах вимірювань: акустика; довжина та кут; час та частота; іонізуючі випромінювання; маса та пов'язані з нею величини; витратометрія; оптика та лазерна техніка; радіоелектроніка; температура; фізична хімія; фотометрія та радіометрія; електрика та магнетизм.

У рамках конференції «Метрологія — 2016» проведуться науково-практичні семінари:

1. «Використання квантових ефектів у метрології».
2. «Метрологічне забезпечення визначення показників якості природного газу».
3. «Зовнішнє калібрування сенсорів космічного базування».

Адреса оргкомітету: ННЦ «Інститут метрології», вул. Мироносицька, 42, Харків, 61002, Україна

e-mail: journal@metrology.kharkov.ua

Довідки за телефоном: (057) 704-98-43 – відповідальний секретар Камишанова Людмила Дмитрівна

Ключові дати:

1 червня – кінцевий термін прийому заявок для учасників з доповідями;

1 червня – кінцевий термін прийому доповідей;

1 вересня – кінцевий термін прийому заявок для учасників без доповідей;

Умови участі в конференції

Пропонується надати доповіді (3–4 повних сторінки) українською, російською або англійською мовами (за вибором). Основоположні, оглядові та постановочні доповіді будуть винесені на пленарні засідання.

Для включення доповіді до програми конференції та до збірника наукових праць необхідні:

- заявка щодо участі в конференції;
- відповідність теми доповіді тематиці конференції;
- наявність в оргкомітеті доповіді, оформленої в точній відповідності до вимог;
- експертний висновок;
- своєчасна оплата організаційного внеску.

Матеріали необхідно надсилати на електронну адресу:

journal@metrology.kharkov.ua

Форми запрошення, заявки на участь у конференції, вимоги до оформлення доповідей, а також іншу додаткову інформацію можна знайти на сайті:

www.metrology.kharkov.ua

УДК 536.6

МЕТОДИЧНІ ПОХИБКИ ЗА ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ

Л. Воробйов, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник,
Т. Грищенко, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
Л. Декуша, кандидат технічних наук, заступник завідувача відділу,
С. Ковтун, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Узагальнено результати аналітичних досліджень чинників, що впливають на величину методичної похибки за вимірювання густини теплового потоку із застосуванням перетворювачів виду допоміжної стінки у найпоширеніших випадках розміщення їх на об'єкті. Надано рекомендації щодо зниження методичних похибок у розглянутих задачах.

The article generalizes results of analytical studies factors that influence the value of the methodical error of heat flow density measurement with the use of heat flow sensor of auxiliary wall type in the most common cases placing them on the object-to-be-controlled. Fig. 1 shows the location of the heat flow sensor inside the array and nomogram for calculation reduced density of integral mean heat flow depending on geometric parameters of

sensor. Fig. 2 shows the location of the heat flow sensor on the surface of semi bounded array and nomogram for calculation of reduced heat flow density. Fig. 3 shows the location of the heat flow sensor on the surface of unbounded plate and graphs the reduced density of average heat flow values depending on the variation of reduced thickness plate and numeric values of the Bio criteria. Fig. 4 shows the location of the heat flow sensor on the surface of unbounded plate and graphs the reduced density of average heat flow value depending on numeric values of the Bio criteria. For practical application in the building sector was calculated reduced density of average heat flow value depending on reduced thickness building envelope with variation of thermal conductivity values and reduced thermal resistance of object-to-be-controlled, result of its are presented in Fig. 5.

Ключові слова: густина теплового потоку, вимірювання, методичні похибки, термоелектричні перетворювачі.
Keywords: heat flow density, measurement, methodical errors, thermoelectric converter.

Вимірювання густини теплового потоку в ряді стандартів [1—7] і нормативних документів [8—9] регламентовано із застосуванням плоских термоелектричних перетворювачів теплового потоку виду допоміжної стінки (ПТП). Останні належать до нестандартизованих засобів вимірювальної техніки [10], тому придатність до застосування кожної одиниці ПТП установлюють за результатами індивідуальної метрологічної атестації, що проводиться за певних, наперед заданих умов теплообміну, за яких похибку вимірювання визначено та можна гарантувати.

Реальні умови застосування ПТП на об'єктах контролю різних типів можуть значно відрізнятися від умов теплообміну, відтворюваних за їх атестації. Окрім того, введення первинного перетворювача до вимірювального ланцюга спотворює поля температури і теплового потоку як усередині об'єкта кон-

тролю, так і в самому ПТП, що призводить до збільшення методичної похибки вимірювання густини теплового потоку.

Аналітичним дослідженням чинників, що впливають на величину методичної похибки вимірювання густини теплового потоку, присвячено низку попередніх публікацій авторів [11—16], а також статті закордонних вчених [17—19]. У наведених роботах розглянуто окремі випадки застосування ПТП. *Мета цієї статті* — узагальнення результатів виконаних досліджень для встановлення умов, що сприятимуть зменшенню методичної похибки за вимірювання густини теплового потоку на прикладі декількох задач, які віддзеркалюють різноманітність випадків застосування ПТП виду допоміжної стінки.

Спотворення полів температури і теплового потоку, зумовлені змінами умов теплообміну поверхні об'єкта контролю з навколишнім середовищем через

розміщення на ній ПТП, зазвичай урахують таким співвідношенням:

$$\frac{q_{\text{вим}}}{q_0} = \frac{1/\alpha_0}{1/\alpha_{\text{ПТП}} + R_{\text{ПТП}} + R_K}, \quad (1)$$

де $q_{\text{вим}}$ — вимірене із застосуванням ПТП значення густини теплового потоку; q_0 — дійсне значення густини теплового потоку; α_0 — коефіцієнт теплообміну поверхні об'єкта контролю з навколишнім середовищем за відсутності ПТП; $\alpha_{\text{ПТП}}$ — коефіцієнт теплообміну поверхні ПТП з навколишнім середовищем; $R_{\text{ПТП}}$ — тепловий опір ПТП; R_K — контактний тепловий опір.

Однак, формула (1) дуже спрощена, оскільки враховує лише зміну опору теплового ланцюга, представленого або як система із зосередженими параметрами, або за розгляду ПТП як безкінечної пластини. Для більш точних вимірювань необхідно враховувати просторові спотворення теплових полів, зумовлені кінцевими розмірами ПТП.

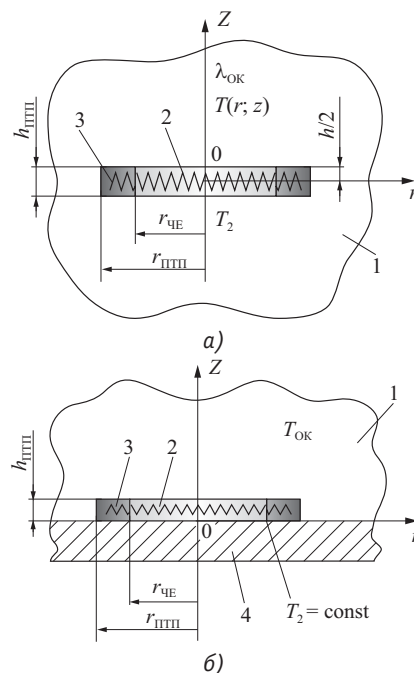
У наведених задачах ПТП представлено у виді обмеженого короткого циліндра висотою $h_{\text{ПТП}}$ і діаметром $D_{\text{ПТП}} = 2r_{\text{ПТП}}$. Математичне моделювання температурного і теплового полів базується на розв'язанні двовимірної задачі теплопровідності в циліндричній системі координат (r, φ, z) , $\varphi = \text{const}$, яку описують загальновідомим диференціальним рівнянням 2-го порядку [20, 21].

Актуальною задачею є вимірювання густини теплового потоку за розміщення ПТП усередині масиву (рис. 1, а). Визначальні чинники для цієї задачі — співвідношення геометричних розмірів ПТП $\chi = D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}}$ і співвідношення теплопровідності ПТП до теплопровідності об'єкта контролю $\lambda_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ОК}}$ [12]. За результатами математичного моделювання такої задачі побудовано номограму (рис. 1, в).

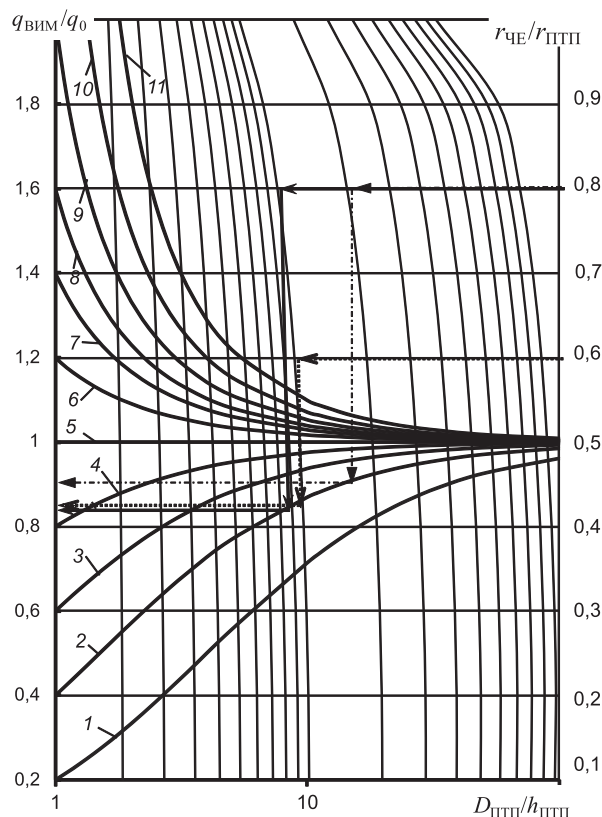
Отримані рішення і номограма (рис. 1, в) справедливі, їх можна використовувати для випадку розміщення ПТП на ізотермічній поверхні, яка примикає до напівобмеженого масиву (рис. 1, б) за умови, що $\chi = D_{\text{ПТП}}/2h_{\text{ПТП}}$.

Зменшення методичної похибки можливе внаслідок вирівнювання теплофізичних характеристик ПТП і об'єкта контролю, збільшення співвідношення $D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}}$, уведення охоронної зони до конструкції ПТП, а також збільшення її ширини.

За розміщення ПТП на поверхні напівобмеженого масиву за граничних умов 3-го роду (рис. 2, а), визначальні чинники впливу на величину методичної похибки — коефіцієнт теплообміну α , радіус ПТП $r_{\text{ПТП}}$, коефіцієнт теплопровідності об'єкта контролю $\lambda_{\text{ОК}}$ та тепловий опір ПТП $R_{\text{ПТП}}$, що враховується приведеним тепловим опором $R_{\alpha, \text{ОК}}/(R_{\alpha, \text{ПТП}} + R_{\text{ПТП}})$,



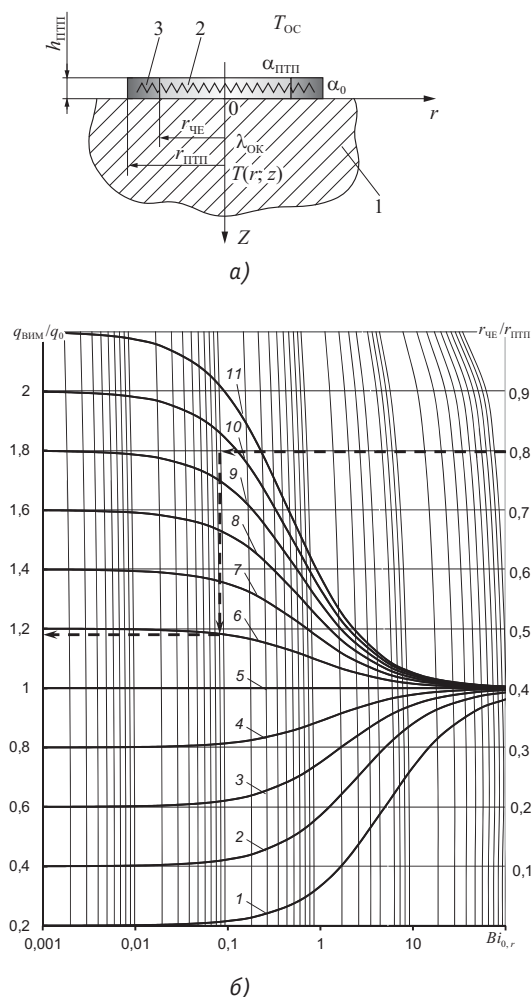
1 — об'єкт контролю, 2 — чутливий елемент ПТП, 3 — охоронна зона ПТП, 4 — пластина металева
1 — object-to-be-controlled; 2 — sensitive element of HFT; 3 — guard band of HFT; 4 — metal plate



в) 1 — $\lambda_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ОК}} = 0,2$; 2 — 0,4; 3 — 0,6; 4 — 0,8; 5 — 1,0; 6 — 1,2; 7 — 1,4; 8 — 1,6; 9 — 2,0; 10 — 3,0; 11 — 10

Рис. 1. Схеми розміщення ПТП усередині масиву (а, б) і номограма (в) залежностей приведеної густини середньоінтегрального теплового потоку від геометричного параметра ПТП

Fig.1. Scheme of HFT location inside the array (а, б) and nomogram (в) for calculation reduced density of integral mean heat flow depending on geometric parameters of HFT



а) 1 — об'єкт контролю, 2 — чутливий елемент ПТП, 3 — охоронна зона ПТП

1 — object-to-be-controlled; 2 — sensitive element of HFT; 3 — guard band of HFT

б) 1 — $R_{\alpha,OK}/(R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) = 0,2$; 2 — $0,4$; ...; 11 — $2,2$
Рис. 2. Схема розміщення ПТП на поверхні напівобмеженого масиву (а) і номограма для визначення значень приведеної густини теплового потоку (б)

Fig.2. Scheme of HFT location on the surface of semibounded array (a) and nomogram (b) for calculation of reduced heat flow density

де $R_{\alpha,OK} = 1/\alpha_0$ і $R_{\alpha,ПТП} = 1/\alpha_{ПТП}$, та критерієм Біо $Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{ПТП}/\lambda_{OK}$ [22].

Методична похибка у цьому випадку зменшується внаслідок зменшення теплового опору ПТП і збільшення його геометричного розміру (рис. 2, б). Причому, зі зниженням теплопровідності об'єкта контролю методична похибка зменшується, а зі збільшенням — прямує до значень, характерних для розміщення ПТП на ізотермічній поверхні.

Типовий випадок вимірювання теплового потоку — розміщення ПТП на поверхні пластини зі сторони конвективного теплообміну (граничні умови 3-го роду) за умови, що з іншої сторони пластини

теплообмін здійснюється за граничних умов 2-го роду (рис. 3, а) [13].

На рис. 3, б подано графіки залежності приведеної густини середньоінтегрального теплового потоку за варіації приведеної товщини $h_{OK}/r_{ПТП}$, із яких випливає, що зі збільшенням приведеної товщини пластини методична похибка збільшується. У випадку, коли $h_{OK}/r_{ПТП} \geq 1$ під час визначення методичної похибки допускається використання номограми для напівобмеженого масиву (рис. 2, б). Висновки, зроблені для напівобмеженого масиву, справедливі й для цієї задачі.

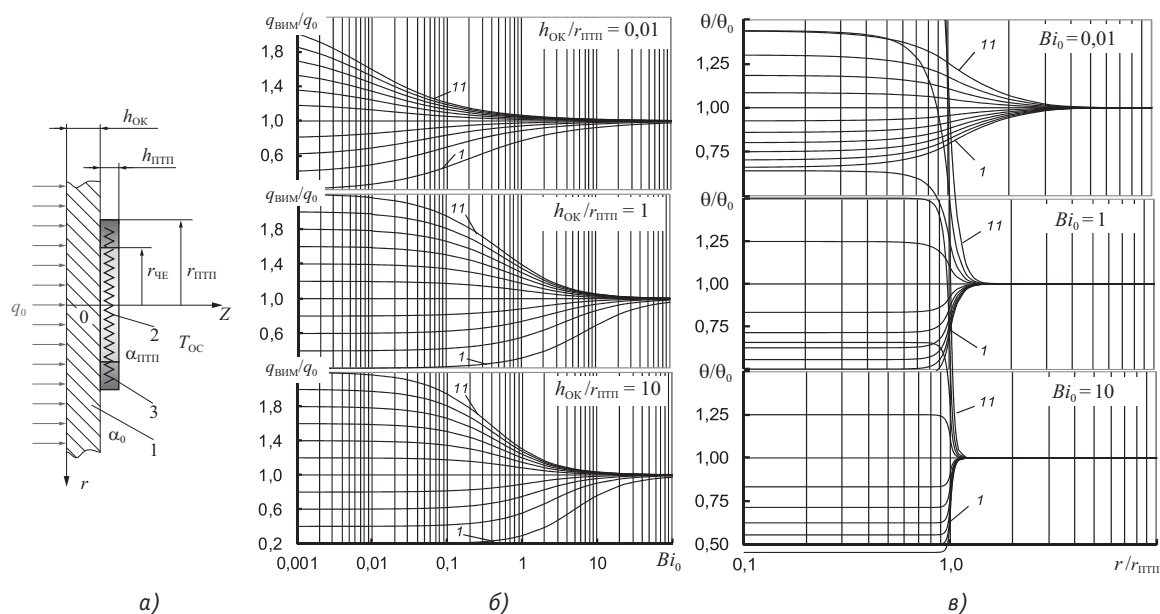
На рис. 3, в наведено результати математичного моделювання спотворень температурного поля на поверхні пластини за варіації числових значень критерію Біо, які свідчать, що зі збільшенням значень критерію Біо збурення температурного поля зростають, але поширення спотворень за поверхнею об'єкта контролю локалізуються в зоні розміщення ПТП. Ця інформація необхідна для вибору місць установлення поверхневих перетворювачів різного призначення в незбуреній зоні.

Практично значимий — випадок розміщення ПТП на поверхні необмеженої пластини за конвективного теплообміну з обох сторін (рис. 4, а), який відображає теплотрічні вимірювання у процесах сертифікації, стандартизації та паспортизації будівель і споруд [14, 15].

На рис. 4, б показано, що за приведеної товщини $h_{OK}/r_{ПТП} \geq 1$ спотворення теплового потоку не залежать від співвідношення коефіцієнтів теплообміну α_2/α_1 й аналогічні випадку розміщення ПТП на напівобмеженому масиві. Причому зі збільшенням α_2 методична похибка збільшується.

Для практичного застосування, переважно у будівельній галузі, проведено розрахунок розподілу значень приведеної густини середньоінтегрального теплового потоку залежно від приведеної товщини огорожувальної конструкції, на поверхню якої встановлюється ПТП з радіусом $r_{ПТП} = 20$ мм. При цьому розглянуто випадки, коли матеріал огорожувальної конструкції — алюміній з $\lambda_{OK} = 200$ Вт/(м·К), сталь з $\lambda_{OK} = 30$ Вт/(м·К), природний камінь (наприклад, граніт) з $\lambda_{OK} = 3$ Вт/(м·К), оздоблювальні матеріали (штукатурка) з $\lambda_{OK} = 0,3$ Вт/(м·К) та теплоізоляційний матеріал з $\lambda_{OK} = 0,03$ Вт/(м·К). Результати розрахунку наведено на рис. 5.

Коефіцієнти теплообміну прийнято згідно з ДБН В.2.6-31 [23]: $\alpha_1 = 8,7$ Вт/(м² К) для випадку розміщення ПТП на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції (рис. 5, а) та $\alpha_2 = 23$ Вт/(м² К) — на зовнішній (рис. 5, б).



а)

б)

в)

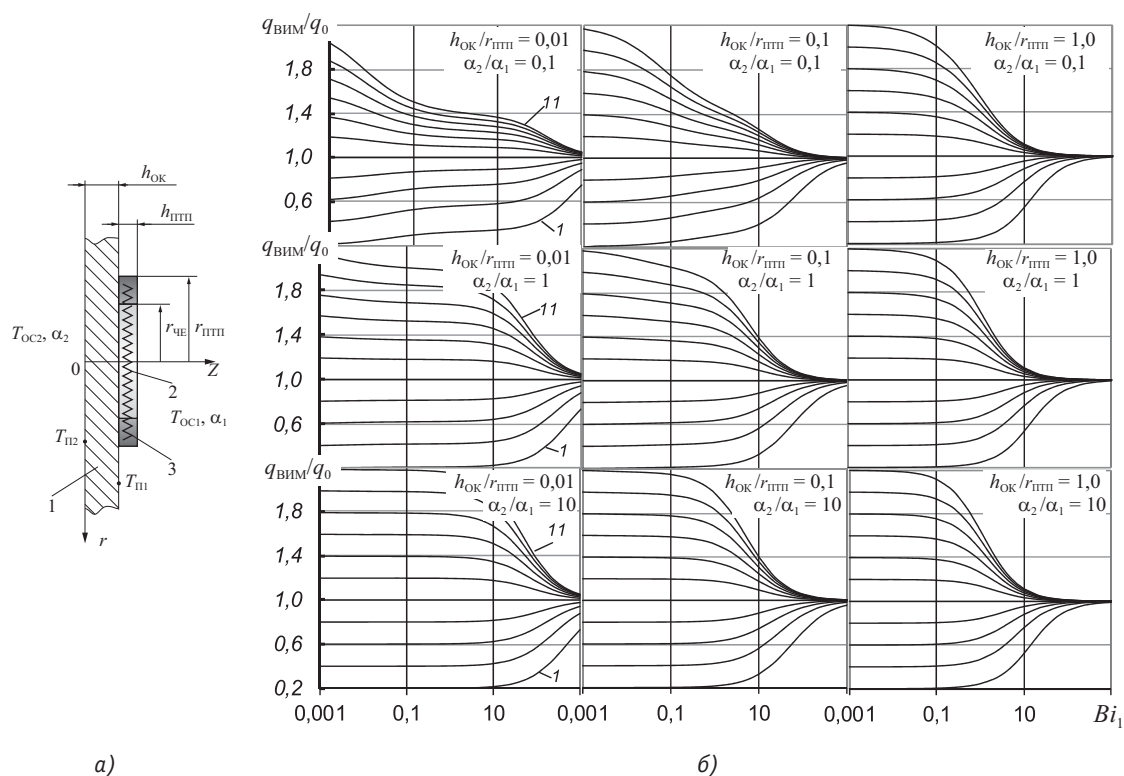
а) 1 — об'єкт контролю, 2 — чутливий елемент ПТП, 3 — охоронна зона ПТП

1 — object-to-be-controlled; 2 — sensitive element of HFT; 3 — guard band of HFT

б) 1 — $R_{OK}/R_{OK,HFT} = 0.2$; 2 — 0.4; ...; 11 — 2.2; в) 1 — $R_{OK}/R_{OK,HFT} = 0.2$; 2 — 0.4; ...; 11 — 2.2

Рис. 3. Схема розміщення ПТП на поверхні необмеженої пластини (а) та залежність приведеної густини середньоінтегрального теплового потоку за варіації приведеної товщини пластини (б) і числових значень критерію Bi_0 (в)

Fig.3. Scheme of HFT location on the surface of unbounded plate (a) and graphs the reduced density of average heat flow values depending on the variation of reduced thickness plate (б) and numeric values of the Bi_0 criteria (в)



а)

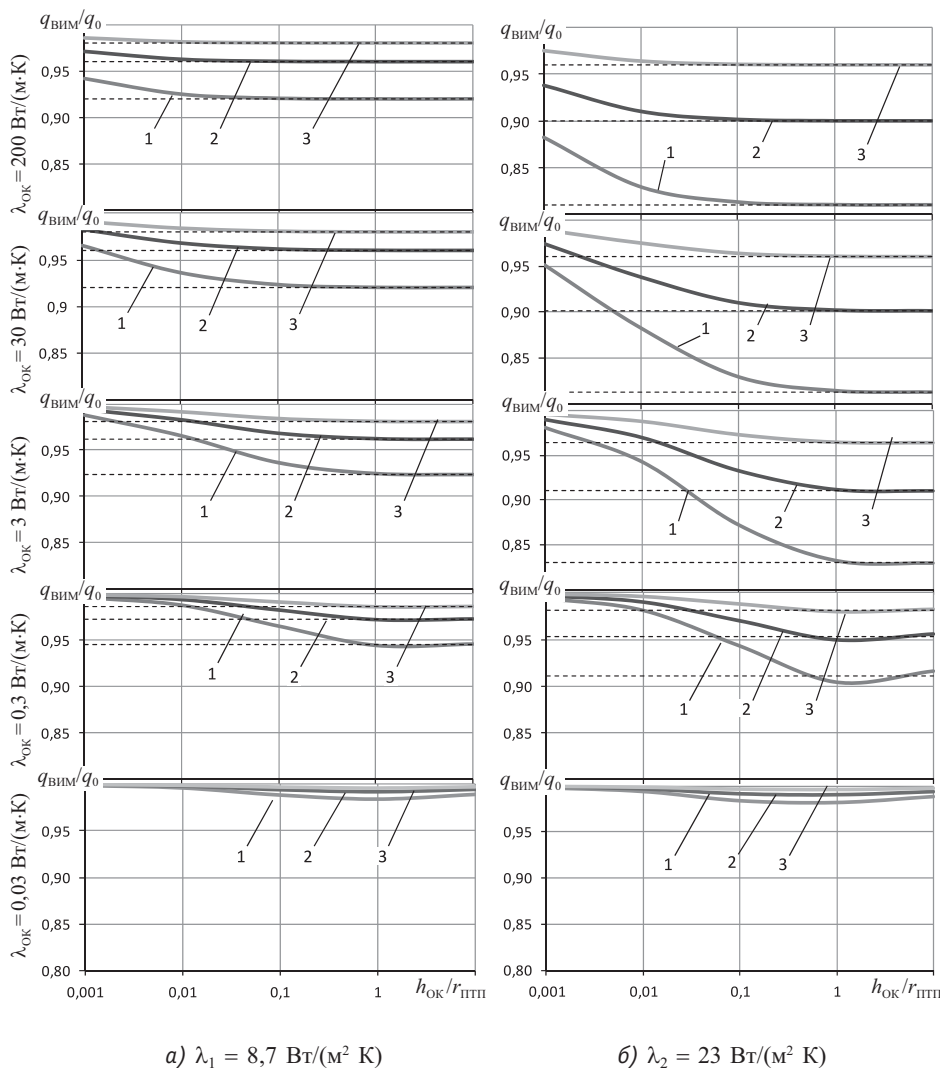
б)

а) 1 — об'єкт контролю, 2 — чутливий елемент ПТП, 3 — охоронна зона ПТП

1 — object-to-be-controlled; 2 — sensitive element of HFT; 3 — guard band of HFT; б) 1 — $R_{OK}/R_{OK,HFT} = 0.2$; 2 — 0.4; ...; 11 — 2.2

Рис. 4. Схема розміщення ПТП на поверхні необмеженої пластини (а) і залежність приведеної густини середньоінтегрального теплового потоку від критерію Bi_0 (б)

Fig.4. Scheme of HFT location on the surface of unbounded plate (a) and graphs the reduced density of average heat flow value depending on numeric values of the Bi_0 criteria (б)



а) $\lambda_1 = 8,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ б) $\lambda_2 = 23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$
 варіанти встановлення ПТП: 1 — без мастильних матеріалів;
 2 — низькотеплопровідне мастило; 3 — високотеплопровідне мастило

Рис. 5. Залежність приведені густини середньоінтегрального теплового потоку від приведені товщини огорожувальної конструкції за варіації значень теплопровідності об'єкта контролю та приведенного теплового опору
 Fig.5. Graphs the reduced density of average heat flow value depending on reduced thickness building envelope with variation of thermal conductivity values of object-to-be-controlled and reduced thermal resistance

Отримані результати дозволяють сформулювати такі рекомендації щодо зменшення методичної похибки під час обстеження огорожувальних конструкцій:

- * розміщувати ПТП доцільно зі сторони, на поверхні якої менший коефіцієнт теплообміну (рис. 5, а);

- * за розміщення ПТП на поверхні теплоізоляційного матеріалу, спотвореннями, які вносить присутність ПТП, можна знехтувати;

- * за $h_{\text{ок}} / r_{\text{ПТП}} \geq 1$ і $\lambda_{\text{ок}} \geq 3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ можна з високим ступенем точності як поправки до результатів вимірювання використовувати співвідношення (1);

- * за $h_{\text{ок}} / r_{\text{ПТП}}$ і $\lambda_{\text{ок}} < 3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ для внесення поправок необхідно користуватися наведеними ви-

ще відповідними номограмами;

- * застосування високотеплопровідного мастила за розміщення ПТП на поверхні огорожувальної конструкції зменшує внесок методичної похибки до результатів вимірювання за будь-яких умов теплообміну.

ВИСНОВКИ


Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що зменшення методичної похибки можливе за дотримання низки умов стосовно конструктивного виконання ПТП і правильного підбору їх теплофізичних характеристик. Зокрема, наявність охоронної зони навколо чутливого елемента ПТП забезпечує мінімізацію спотворень теплового поля у зоні розміщення чутливого елемента. Доцільно добиватися рівності теплопровіднос-

ті ПТП і об'єкта контролю лише у разі розміщення ПТП усередині необмеженого масиву або на ізо-термічній поверхні, що прилягає до напівобмеженого масиву.

За конвективного теплообміну загальний опір тепlopередаванню на теплове поле не впливає, вплив має лише опір тепловіддаванню з боку встановлення ПТП й власний тепловий опір ПТП. Причому в усіх випадках конвективного і радіаційного теплообміну тепловий опір ПТП доцільно мінімізувати. За відносної товщини пластини $h_{\text{ок}} / r_{\text{ПТП}} \geq 1$ (рис. 3, б та 4, б) для визначення методичної похибки допустиме використання номограми для напівобмеженого масиву (рис. 2, б).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Енергозбереження. Методи та засоби вимірювання теплових величин. Загальні положення: ДСТУ 3401-97 (ГОСТ 30486-97). — [Чинний від 1999-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України (Energy-saving. Methods and tools for measuring thermal quantities. General provisions: ДСТУ 3401-97 (ГОСТ 30486-97). — [Valid from 1999-01-01]. Derghspoghivstandart), 1998 — 26 с/р.
2. Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання (ISO 9869:1994, IDT): ДСТУ ISO 9869:2007. — [Чинний від 2009-01-01]. — Київ: Держспоживстандарт України (Thermal insulation. Building elements. In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance (ISO 9869:1994, IDT): ДСТУ ISO 9869:2007. — [Valid from 2009-01-01]. Derghspoghivstandart), 2007. — 46 с/р.
3. Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередач огорожувальних конструкцій: ДСТУ Б В.2.6-101:2010. — [Чинний від 2010-10-01]. — Київ: Мінрегіонбуд України (Construction of buildings and structures. Method for determination of walling heat transfer resistance: ДСТУ Б В.2.6-101:2010. — [Valid from 2010-10-01]. Minregion), 2010. — 53 с/р.
4. Енергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та довкіллям: ДСТУ 4035-2001 (ГОСТ 25380-2001). — [Чинний від 2002-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України (Energy saving. Buildings. Methods of measuring the surface heat flow density and determination the coefficient of heat transfer between the walling and the environment: ДСТУ 4035-2001 (ГОСТ 25380-2001). — [Valid from 2002-01-01]. — К.: Derghspoghivstandart), 2002. — 44 с/р.
5. Блоки віконні та дверні. Методи визначення опору теплопередачі: ДСТУ Б В.2.6-17-2000 (ГОСТ 26602.1-99). — [Чинний від 2001-01-01]. — Київ: Мінрегіонбуд України (Blocks of windows and door. Methods for determination of resistance to heat transfer: ДСТУ Б В.2.6-17-2000 (ГОСТ 26602.1-99). — [Valid from 2001-01-01]. — Minregion), 2000. — 25 с/р.
6. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі: ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99). — [Чинний від 2001-07-01]. — Київ: Мінрегіонбуд України (Building materials and products. The method of determining the thermal conductivity and thermal resistance at stationary heat mode: ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99). — [Valid from 2001-07-01]. — Minregion), 2001. — 21 с/р.
7. Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в ustalеному режимі приладом із перетворювачем теплового потоку (ISO 8301:1991, IDT): ДСТУ ISO 8301:2007. — [Чинний від 2009-01-01]. — Київ: Держстандарт України (Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus (ISO 8301:1991, IDT): ДСТУ ISO 8301:2007. — [Valid from 2009-01-01]. — Derghstandart), 2011. — 40 с/р.
8. Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції: Методика М 00013184.5.023-01 [Текст] / Розробники: Грищенко Т.Г. [та ін.] // Нормативний документ Комітету з будівництва та архітектури України. — Київ: ЛОГОС (Grischenko, T. & others. Determination of the heat flow through the walling: Methodology М 00013184.5.023-01. Regulation of the Committee of Construction and Architecture of Ukraine. — Kyiv: LOGOS), 2002. — 131 с/р.
9. Метрологія. Опір теплопередаванню крізь огорожувальні конструкції будівель та споруд різного призначення. Методика виконання вимірювань комбінованим тепловізійно-теплометричним методом: Методика МВУ 048/06-2012 [Текст] / Розробники: Грищенко Т.Г. [та ін.] // Нормативний документ. — Київ: ІТТФ (Grischenko, T. & others. Metrology. Resistance to heat transfer through the walling of buildings and structures for various purposes. Methodology of measurement combined thermal imaging-thermal-metric method: Methodology МВУ 048/06-2012. — Kyiv), 2012. — 34 с/р.
10. Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови: ДСТУ 3756-98. — [Чинний від 2000-07-01]. — К.: Держспоживстандарт України (Energy-saving. Thermoelectric transformers of heat flow for general purpose. General specifications: ДСТУ 3756-98. — [Valid from 2000-07-01]. Derghspoghivstandart), 2000. — 21 с/р. — (Національний стандарт України).
11. Грищенко Т., Декуша Л., Вороб'єв Л. Тепловой поток и методы его измерения // Метрологія та прилади (Grischenko, T., Dekusha, L., & Vorobyov, L. Heat flow and methods of measurement. Metrology and Instruments), 2009. — № 2. — С/Р. 3—11.
12. Грищенко Т.Г. Погрешность измерения стационарного теплового потока плоским преобразователем теплового потока, помещенным внутри массивного объекта / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева. — Киев, 2000. — 9 с/р. — Деп. В ГНТБ Украины, р. № 201-Ук2000 (Д/п ВИНТИ РАН, 2001, №1 (347)). —

- Библ. опис. № 2829) (Grischenko, T., Dekusha, L. and Mendeleyeva, T. Measuring error of the stationary flat heat flow by heat flow transducer placed inside a massive object, Д/п ВИНТИ РАН, 1(347), (№ 201-Ук2000)).
13. Декуша Л.В. Измерение стационарного теплового потока плоским преобразователем теплового потока, помещенным на конвективно охлаждаемой бесконечной пластине / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева. — Киев, 2002. — 16 с/р. — Деп. в ГНТБ Украины, р. № 39-Ук2003 (Grischenko, T., Dekusha, L. and Mendeleyeva, T. Measurement of stationary thermal flow by flat heat flow transducer placed on an infinite plate convectively cooled, Д/п ГНТБ Ukraine, № 39-Ук2003).
 14. Декуша Л.В. Об особенностях измерения теплового потока, проходящего через плоскую ограждающую конструкцию / Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики (Севастополь-2002): труды XII конф. СНГ с международным участием. — Киев: ИПЦ «АЛКОН» НАУ (Dekusha, L., & Mendeleyeva, T. Specifics measuring the heat flow through the flat walling. Problems of Ecology and Operation Energy Objects (Sevastopol)), 2002. — С/Р. 80—83.
 15. Декуша Л.В. Об особенностях измерения стационарного теплового потока, проходящего через бесконечную пластину, по обе стороны которой происходит конвективный теплообмен / Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева. — Киев, 2003. — 25 с/р. — Деп. в ГНТБ Украины, р. № 93-Ук2003 (Dekusha, L. and Mendeleyeva, T. Specifics measuring of the stationary heat flow through the infinite plate on both sides of which the convective heat transfer takes place, Д/п ГНТБ Ukraine, № 93-Ук2003).
 16. Декуша Л.В. Измерение стационарного теплового потока, приходящего через бесконечную пластину, по обе стороны которой происходит конвективный теплообмен / Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева // Промышленная теплотехника: — Киев (Dekusha, L., & Mendeleyeva, T. Measurement of stationary heat flow passing through an infinite plate on both sides which the convective heat transfer takes place. Industrial Heat Engineering), 2007. — Т./V. 29, № 2. — С/Р. 88—96.
 17. Van der Graaf F. Heat-flux Sensor / F. van der Graaf // Thermal Sensors. VCH Verlagsgesellschaft mbh. — Weinheim, FRG. — 1990. — Chapter 8, Vol. 4. — 28p.
 18. Wesley D.A. Thin disk on a convectively cooled plate — Application to heat flow measurement errors / D.A. Wesley // Trans. of the ASME. — Journ. of Heat Transfer. — 1979. — Vol. 101. — P. 346—352.
 19. Blokland H., Van der Graaf F. Sensor for measuring convective and Radiative Heat Flux / H. Blokland, F. van der Graaf // Internet: <http://www.tpd.tno.nl>. 2010. — 7 p.
 20. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. — М.: Высшая школа (Lykov, A. Thermal Conductivity Theory. Moscow: High School), 1967. — 599 с/р.
 21. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука (Carslow, G., & Egger, D. Thermal conductivity of solids. Moscow: Science), 1964. — 488 с/р.
 22. Ярышев Н.А. Погрешность измерения стационарного теплового потока на поверхности тела / Н.А. Ярышев, Н.Н. Заровная, Т.В. Смирнова. // ИФЖ (Yaryshev, N. Measuring error of the stationary heat flow on the body surface. Journal of Engineering Physics). — 1989. — Т./V. 57, №4. — С/Р. 667—674.
 23. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2006. — [Чинний від 2007-04-01]. — К.: Мінбуд України (Construction of buildings and structures. Thermal insulation of buildings: ДБН В.2.6-31:2006. — [Valid from 2007-04-01]. — Min-region, — (State Construction Standard of Ukraine)), 2006. — 70 с/р. — (Державні будівельні норми України) 

Отримано / received: 13.08.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Г. Мазуренком (Україна).

Prof. O.G. Mazurenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 535.65

ВИМІРЮВАННЯ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ КОЛІРНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЛАМП З ВОЛЬФРАМОВИМ ТІЛОМ РОЗЖАРЮВАННЯ

О. Купко, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
ННЦ «Інститут метрології», м. Харків,

В. Терещенко, аспірант кафедри фізичних основ електронної техніки,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Проведено експериментальні дослідження залежності кореляційної колірної температури від струму лампи розжарювання та колірної температури. Проаналізовано основні вимоги до похибок вимірювання. Надано пропозиції щодо створення повірочної схеми для засобів вимірювання кореляційної колірної температури.

Experimental researches of dependence of correlated colour temperature are conducted from the current of incandescent lamp and colour temperature lamp. Basic requirement is analysed to the errors of measuring. Suggestions are given that to creation of measurement chain for facilities of measuring of correlated colour temperature.

Ключові слова: колірна температура, спектр, лампа, повірочна схема, еталон, пірометр
Keywords: color temperature, spectrum, lamps, verification scheme, standard, pyrometer

Повірочна схема ДСТУ 3194 [1] у частині, присвяченій безконтактним засобам вимірювання температури за випроміненням в діапазоні від 961,78 до 2500 °С, регламентує вимірювання традиційних для пірометрії видів температури: радіаційної (пірометри повного і часткового випромінення), яскравісної (монохроматичні пірометри) і колірної (пірометри спектрального відношення). Вимірювання кореляційної колірної температури не передбачено. Провідні метрологічні інститути мають відповідне встаткування для відтворення, зберігання і передавання такої температури, проводять звірення. У СМС рядках РТВ (ФРН) представлено три рядки стосовно кореляційної колірної температури. Є істотна потреба у забезпеченні такого роду вимірювань. Відсутність у нашій країні регламентації щодо вимірювання кореляційної колірної температури найімовірніше зумовлена тим, що такі вимірювання належать не до сфери температурних вимірювань, а до оптико-фізичних, тобто перебувають на межі двох сфер.

Мета цієї роботи — спроба розробити основи для метрологічного забезпечення вимірювань кореляційної колірної температури з урахуванням наявної еталонної бази в країні.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Найбільшого поширення використання кореляційної колірної температури набуло у сфері світлових і колірних вимірювань. Ці сфери тісно пов'язані із зоровим сприйняттям людини, яке, у свою чергу, залежить від освітлення. У сфері колірних вимірювань відоме явище метамеризму — явище, за якого два різних за спектром колірних зразка мають один і той же колір за певного джерела світла, і навпаки — два забарвлені зразки сприймаються однаково забарвленими під одним дже-



О. Купко



В. Терещенко

© Купко О., Терещенко В., 2015

релом, але втрачають схожість за інших умов освітлення (з іншими спектральними характеристиками випромінюваного світла). У сфері світлових вимірювань необхідність стандартних джерел зумовлена тим, що спектральна чутливість вимірювальних приладів не може точно відповідати значенню відносної спектральної світлової ефективності монохроматичного випромінювання для денного зору [2]; внаслідок цього існують похибки, зумовлені спектром випромінювання. Тому в цих сферах існує необхідність використання стандартних джерел випромінювання. Стандартні спектри випромінювання регламентовані, наприклад, [3, 4]. Для значної частини завдань необхідні лише таблиці спектральних характеристик таких джерел, але існує і потреба у реальних джерелах. Найбільш доступне — джерело типу А. За визначенням [4] джерелом типу А слугує газонаповнена електрична лампа розжарювання з корельованою кольірною температурою випромінювання $T = 2856\text{ K}$. Згідно з [5] для визначення кореляційної кольірної температури необхідно визначити координати кольоровості джерела світла (x , y) і за графіком, із нанесеними на ньому лініями $T = \text{const}$, що додається, визначити кольірну температуру. В діапазоні від 2500 до 8000 K ізотемпературні лінії перетинаються у точці з координатами $x_0 = 0,33$ і $y_0 = 0,19$, тому за нахилом лінії, що проходить через ці дві точки (x , y) та (x_0 , y_0), можна знайти кольірну температуру точніше. Спектр лампи розжарювання не збігається зі спектром абсолютно чорного тіла, оскільки коефіцієнт чорноти вольфраму залежить від довжини хвилі й кута спостереження внаслідок непостійності температури за тілом розжарювання лампи, а також перевідбиття випро-

мінювання. Практична робота потребує отримання джерела типу А за допомогою вибору режиму ламп, тобто за допомогою завдання її напруги або струму, що проходить через неї. Можливі такі способи отримання джерела типу А: за спектральним розподілом, за координатами кольоровості, за температурою тіла розжарювання лампи. Слід з'ясувати оптимальний спосіб задання і підтримання необхідної кольірної температури. Використовуючи похибки задання режиму лампи, які відповідають робочим еталонам, розраховано, до яких похибок це призведе за спектром випромінювання, за координатами кольоровості, за кольірною температурою нитки розжарювання і за напругою живлення лампи. Таку роботу виконано, результати її надруковано у [6]. Основні результати цієї роботи можна представити у виді таблиці 1.

Аналізуючи таблицю, можна зазначити, що найточніше режим підтримується найпростішим методом — за напругою на цоколі лампи, проте для задання цього режиму необхідно визначити його таким або іншим способом. Менш точний метод — це визначення за температурою. Мається на увазі температура, вимірена пірометром спектрального відношення, оскільки інші типи пірометрів не пристосовані для вимірювання ламп зі спіральним тілом розжарювання, але питання задання режиму знову невизначене, оскільки невідомий зв'язок кольірної та кореляційної кольірної температур. Найточніше визначити кольірну температуру можна за спектром, причому слід урахувати, що наведені у таблиці дані зумовлені точністю спектрорадіометричного еталона (6%) у сфері від 0,2 до 2,5 мкм, а у сфері від 0,38 до 0,76 мкм вимірювання можна проводити

Таблиця 1. Похибки відтворення режиму світловимірювальної лампи СИС 107-500 за методами задання спектрального розподілу, координат кольірності, температури тіла розжарювання та напруги на цоколі лампи

Table 1. Errors playback mode for light bulbs SIS 107-500 of the method by spectral distribution, chromaticity coordinates, body temperature and voltage incandescent lamps in the basement

Метод відтворення джерела типу А за допомогою лампи розжарювання	Похибка відтворення за відповідним методом			
	за спектральним розподілом	за координатами кольірності	за температурою нитки розжарювання лампи	за напругою на цоколі лампи
за спектральним розподілом	6 % від 0,2 до 2,5 мкм	$\Delta x = 0,0093$ і $\Delta y = 0,0027$	23 K	2,3 В
за координатами кольірності	16 % на 550 нм	$\Delta x = \Delta y = 0,002$	55 K	5,5 В
за температурою нитки розжарювання лампи	2 % на 550 нм	$\Delta x = 0,0015$ і $\Delta y = 0,000441$	10 K	1 В
за напругою на цоколі лампи	0,03 % на 550 нм	$\Delta x = 0,00076$ і $\Delta y = 0,00022$	0,1 K	0,01 В

Таблиця 2. Результати вимірювань залежності кореляційної колірної температури від колірної температури та струму лампи і відхилення апроксимації цієї залежності від результатів вимірювання

Table 2. The measurement results depends correlation color temperature and color temperature of the lamp current and this deviation approximation based on measurement results

Струм лампи СІРШ-6	Координати кольоровості		Температура		Відхилення лінійної апроксимації, К		Відхилення квадратичної апроксимації, К
	х	у	Колірна, °С	Кореляційна колірна, К	За колірною температурою	За струмом	За струмом
21,89	0,4718	0,4225	2557	2625	5,8789	-6,70758	-11,2024
20,07	0,4818	0,4221	2410	2500	3,227	18,30046	-10,8422
19,79	0,4841	0,4210	2376	2465	-3,4748	6,37862	9,853682
21,04	0,4775	0,4212	2472	2548	-0,3756	-13,64888	0,756247
22,46	0,4691	0,4214	2600	2650	-4,91	-28,68812	14,11904

точніше (2%), що означає зниження похибки визначення температури до 8 К.

ПОПЕРЕДНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Практичну реалізацію запропонованого підходу виконано на апаратурі, яка входить до складу Державного первинного еталона одиниць координат кольору і координат кольоровості, Державного первинного еталона одиниць спектральної густини енергетичної яскравості, спектральної густини сили випромінювання та спектральної густини енергетичної освітленості. Схему вимірювань представлено на рис. 1.

Використовували пірометр спектрального відношення «Веселка», класу точності 0,6 з верхнім діапазоном вимірювань 2600 °С і каналами на довжинах хвиль 400 і 700 нм. Як джерело еталонного спектра використано еталонну температурну лампу ТРУ 110-2350, проградуйовану із кроком 10 нм за випромінюванням моделі чорного тіла; як компаратор — монохроматор МДР-41; як приймач — фотодіод Hamamatsu S1337 1010 BQ, сигнал якого реєстрували пікоамперметром Keithley 6485. За чергою вимірювали сигнал від еталонної лампи і досліджуваної лампи СІРШ-6. За цими даними розраховували спектр, координати кольоровості та кореля-

ційну колірну температуру останньої. Вимірювання проводили на декількох режимах лампи СІРШ. Результати вимірювань подано у таблиці 2.

За результатами вимірювань отримано лінійні апроксимаційні формули залежності кореляційної колірної температури від сили струму через лампу і показань колірного пірометра. Якщо вважати, що кореляційна колірна температура залежить лише від розподілу істинної температури вздовж тіла розжарювання лампи, коефіцієнта випромінювання вольфраму та геометричних параметрів лампи, то ділянки спектра, які використовує колірний пірометр, не обов'язково мусять бути у спектральній смузі чутливості людського ока. У тій же таблиці 2 наведено відмінності експериментально вимічених кореляційних температур від отриманих за допомогою апроксимації за струмом та за колірною температурою. Видно, що, зважаючи на середньоквадратичне відхилення, лінійна апроксимація за колірною температурою точніша, ніж апроксимація за струмом у чотири рази (4,5 і 18 К). Апроксимація за струмом квадратичним поліномом знижує середньоквадратичне відхилення апроксимації за струмом до 10 К.

Легко порівняти ці величини з вимогами за [5] і з характерними похибками пірометра спектральних відношень «Веселка» ~ (0,6-1) % (таблиця 3).

Видно, що практичні вимоги легко забезпечити наявною апаратурою. Це дає підстави для обговорення питання щодо створення повірочної схеми для вимірювань кореляційної колірної температури та еталона, здатного її очолити.

ОСНОВИ ПОВІРОЧНОЇ СХЕМИ

Якщо розглядати лише джерела випромінювання з вольфрамовим тілом напруги, то очевидно є достатньо проста послідовність дій, необхідних для

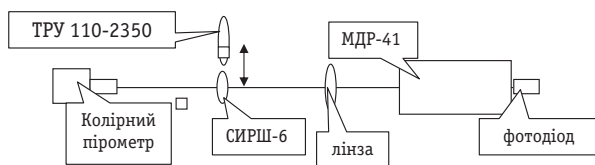


Рис. 1. Схема вимірювань зв'язку колірної та кореляційної колірної температур для ламп з вольфрамовим тілом розжарювання

Fig. 1. Scheme measurement intercommunication of color temperature and correlation color temperature for lamps with tungsten incandescent body

поширення одиниць кореляційної температури від Державного первинного еталона одиниць координат кольору і координат кольоровості. Досліджують залежність кореляційної температури лампи розжарювання і колірної температури від режиму живлення. Проводять градування колірної пірометра за кореляційною колірною температурою. Таку роботу необхідно виконати для усіх типів ламп. Колірний пірометр використовують для градування інших ламп розжарювання за кореляційною температурою на декількох режимах. Це можуть бути світловимірювальні лампи СИС і СИП за [7] або температурні лампи. Лампи розжарювання використовують для градування колірних пірометрів і будь-яких інших приладів червоно-синього відношення. Зрозуміло, якщо у споживача є потреба точнішого градування, можна провести градування на еталоні. Оскільки існує залежність коефіцієнта випромінювання вольфраму від форми поверхні, й конструкції тіла розжарювання ламп відрізняються одна від одної, розподіл температур за тілом напруги ламп

Таблиця 3. Вимоги до точності вимірювань кореляційній колірній температурі за [5] та похибки пірометра «Веселка»

Table 3. Requirements for measurement accuracy correlation color temperature [5] and error pyrometer «Veselka»

T_c, K	3000	2800	2600	2400	2300	2200
$\Delta T_c, K$	140	120	100	85	79	73
Пірометр 1 %, °C	30	28	26	24	23	22

так само розрізняється. Стає очевидним, що градування колірної пірометра (залежність кореляційної колірної температури від колірної температури) буде індивідуальним для кожного типу ламп, а можливо і для кожної конкретної лампи.

Апаратура, необхідна для здійснення такого ланцюжка вимірювань, вже існує в ННЦ «Інститут метрології» і добре досліджена. Для регламентації передавання одиниць в Україні прийнято апаратуру,

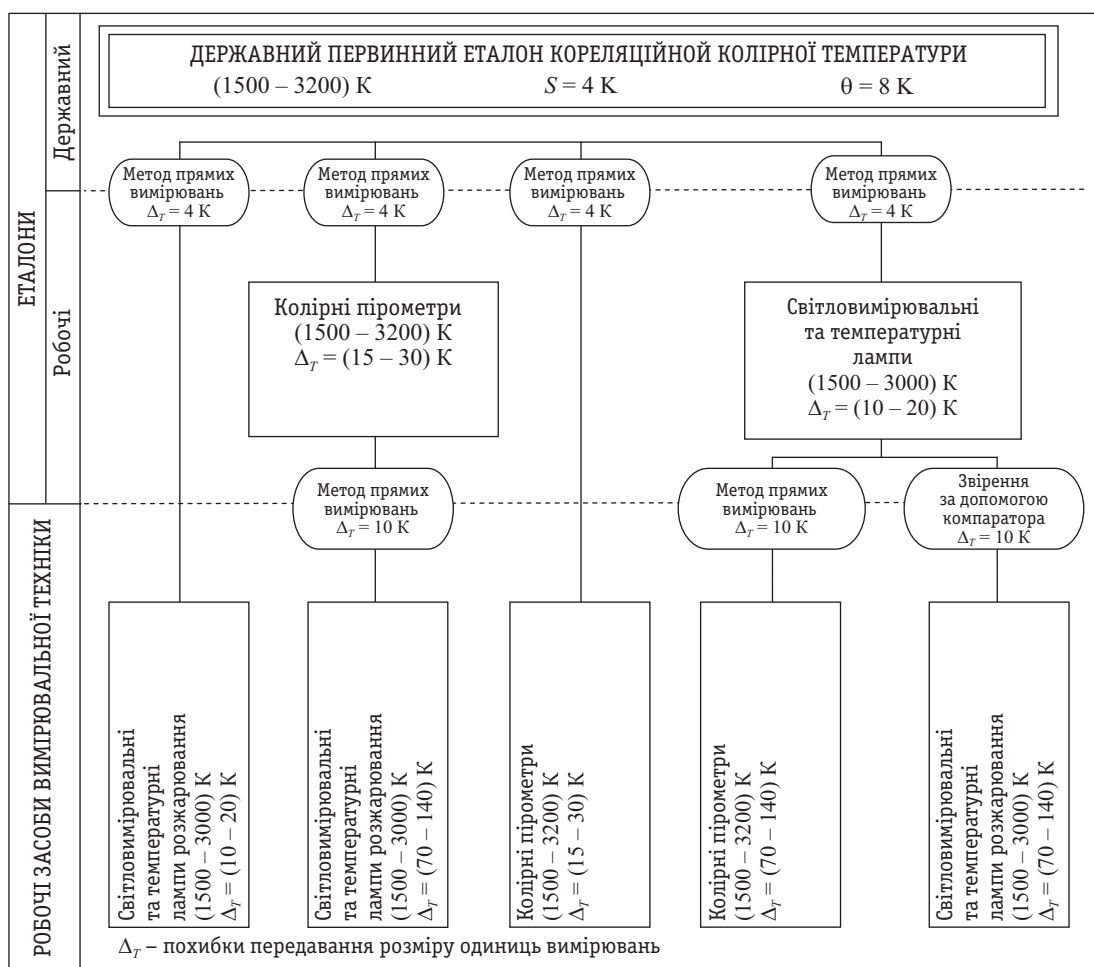


Рис. 2. Проект повірочної схеми для засобів вимірювання кореляційної колірної температури ламп розжарювання

Fig. 2. Project calibration scheme for means of measuring the correlation color temperature of incandescent lamps

необхідну для відтворення одиниці, включати до складу еталона, який очолює відповідну повірочну схему. На сьогодні надати варіант повноцінної повірочної схеми неможливо, але обговорити її загальні риси корисно. Зокрема, слід обговорити варіанти окремої повірочної схеми або включення її як окремої гілки до повірочної схеми для температурних вимірювань [1]. Для обговорення на рис. 2 представлено проект повірочної схеми для засобів вимірювання кореляційної колірної температури ламп розжарювання. Використання колориметрів і спектральної апаратури в цьому варіанті не передбачено, оскільки для них існують власні повірочні схеми, а розрахунки кореляційної колірної температури й її похибок від спектральних характеристик та координат кольоровості регламентовано [5] і труднощів не викликає. Окрім того, для такої апаратури не існує обмеження на використання інших джерел випромінювання, відмінних від вольфрамових ламп.

Еталон містить лампи, колірний пірометр і апаратуру, необхідну для їх роботи. Передавання від еталона робочим еталонам і робочим засобам вимірювання проводиться лише методом прямих вимірювань. Передбачено передавання одиниці від еталона робочим засобам вимірювання підвищеної точності. Як робочі еталони використовують колірні пірометри і світловимірювальні й температурні лампи. Як робочі засоби вимірювання так само використовують колірні пірометри і світловимірювальні й температурні лампи, причому передавання від колориметра колориметру відсутнє. Максимальні похибки робочих засобів вимірювання обрано відповідно до [5]. У цілому повірочну схему орієнтовано лише на джерела світла з вольфрамовим тілом розжарювання, забезпечення вимірювань газорозрядних джерел і світлодіодів потребує подальших розроблень.

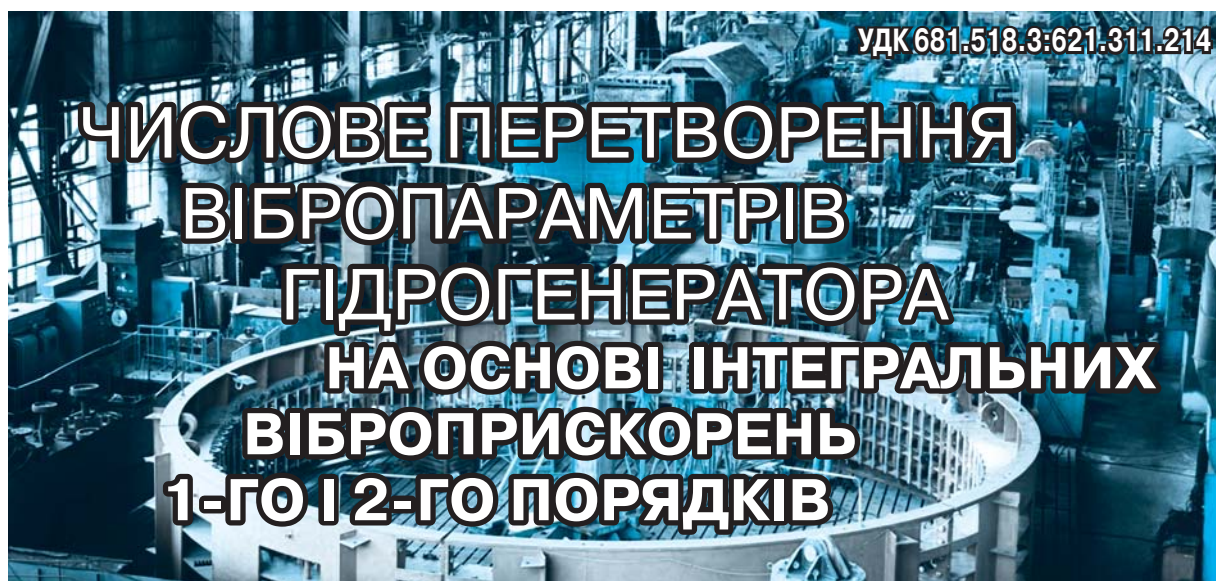
Представляється, що попереднє широке обговорення цієї теми буде корисним і дозволить підвищити якість подальшої роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Безконтактні засоби вимірювань температури. ДСТУ (Metrology. State verification scheme for means of measuring temperature. Contactless temperature measurement. ISO) 3194:2005. — 11 с/р.
2. ГОСТ 8.332-78 ГСИ. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения / ред. Е.И. Глазкова. — Официальное издание. — М: Государственный комитет СССР по стандартам (State Standard 8.332-78 GSI Light measurings. Values of relative spectral light efficiency of monochromatic radiation for a daylight vision / edition E.I. Glazkova, it is Official edition. — М: State committee of the USSR on standard), 1979. — 6 с/р.
3. Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using CIE System ASTM E 308-01.
4. ГОСТ 7721-89 Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка / Государственный стандарт Союза ССР. Введен в действие 01.07.1990. — М.: Государственный комитет по стандартам (State Standard 7721-89 Sources for measurement of light color. Types. Technical requirements. Marking / State Standard Union SSR. Put into Action 07.01.1990. — М.: State committee on standards). — 19 с/р.
5. ГОСТ 23198-94 Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик / Межгосударственный стандарт. Введен в действие 01.01.1996 — Минск.: Изд-во стандартов (State Standard 23198-94 Electrical lamps. Methods for measuring spectral and color characteristics / Intergovernmental standard. Put into Action 01.01.1996 — Minsk.: Standard Publishing House), 1994. — 121 с/р.
6. Купко А.Д. Анализ погрешностей передачи световых единиц, обусловленных выбором режима горения лампы / А.Д. Купко // Украинський метрологічний журнал (Kupko A.D. Analysis of errors communication lighting quantity from mode of the lamp / A.D. Kupko // Ukrainian Metrology journal). — № 2. — 2012. — С/Р. 21—27.
7. ГОСТ 10771-82 Лампы накаливания электрические светоизмерительные рабочие. Технические условия / Государственный стандарт СССР. Введено в действие 01.01.1983. Государственный комитет СССР по стандартам М (State Standard 10771-82 Incandescent lamps electrical photometrical/ Technical requirements / State Standard USSR. Put into Action 01.01.1983. State committee USSR on standards М). — 17 с/р. ❧

Отримано / received: 17.08.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.П. Мачехінін (Україна).
Prof. Yu.P. Machehin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



УДК 681.518.3:621.311.214

ЧИСЛОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВІБРОПАРАМЕТРІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ВІБРОПРИСКОРЕНЬ 1-ГО І 2-ГО ПОРЯДКІВ

Ю. Ведміцький, кандидат технічних наук,
доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань,
В. Кухарчук, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,
В. Граняк, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри,
Вінницький національний технічний університет

Розв'язано задачу побудови математичних засад для проведення процедури контролю вібраційного стану гідроагрегатів ГЕС та ГАЕС на основі альтернативних до віброшвидкості та віброзміщення нововведених позасистемних фізичних величин — інтегральних віброприскорень 1-го та 2-го порядків, які за інформативною здатністю можуть слугувати еквівалентами зазначеним, але за можливістю зменшення загального обсягу необхідних обчислювальних, часових та апаратних ресурсів — ефективною альтернативою.

In the article solved the problem of constructing mathematical bases for the procedure control of a vibrating condition hydraulic units of HPP and HAPR. Problem solution is based on the use of alternatives to the vibration velocity and vibration displacement of newly introduced non-system of physical quantities, namely integrated vibration acceleration of the 1st and 2nd orders. The proposed values can serve as equivalents of vibration displacement. At the same time, can significantly reduce the volume of computation required, time and hardware resources.

Ключові слова: вібрація, контроль, гідрогенератори, електричні станції, віброшвидкість, віброзміщення, інтегральні віброприскорення.

Keywords: vibration, control, hydrogenerator, electric stations, vibroshspeed, vibroshift, integrated vibration acceleration.

Неперервний контроль вібраційного стану гідроагрегатів електричних станцій на сьогодні — один з ефективних методів забезпечення та підвищення надійності їх роботи як за усталених режимів, так і, головне, під час перехідних процесів [1]. Цей вид контролю дозволяє вже на ранніх стадіях розвитку дефекту визначати не лише моменти критичного зростання ймовірності аварійного стану системи в цілому, але й своєчасно виявляти в ній потенційно уразливі вузли, які здатні спричинити аварію.

Відомо [1–4], що первинні з-поміж основних параметрів, які якісно та кількісно описують вібраційний стан системи, — віброзміщення, віброшвидкість та віброприскорення. Згідно з чинними стандартами [5] перший із названих параметрів визначають як вібраційну складову переміщення, а два інші — як її першу та другу похідні часу, відповідно.

На сьогодні в теорії та практиці проведення віброконтролю на об'єктах гідроенергетики [1, 2] сформувалася і доки домінує парадигма, яка чітко визначає і регламентує порядок вимірювального перетворення зазначених вібропараметрів. Якщо залишити поза увагою інші, математично пов'язані з ними, фізичні величини (як механічного, так і немеханічного походження), цей порядок стисло можна представити спрощеною схемою:

віброприскорення \rightarrow {віброшвидкість; віброзміщення}.



Ю. Ведміцький



В. Кухарчук



В. Граняк

Водночас всебічний аналіз наведеної схеми дозволяє дійти висновку, що наразі існує можливість її модифікації. Це дозволить помітно зменшити обчислювальне навантаження на вимірювальний канал засобу віброконтролю і відтак гарантуватиме суттєве підвищення швидкодії, достатньої для динамічних вимірювань вібрації.

Для втілення зазначеного необхідно ввести ряд нових позасистемних фізичних величин, які за інформативною здатністю слугуватимуть еквівалентами віброшвидкості та віброзміщенню, але за загальним обсягом обчислювальних, часових та апаратних ресурсів, необхідних для визначення їх значень, — ефективною і прийнятною альтернативою. Така можливість наразі існує.

Нововведені фізичні величини називатимемо *інтегральними віброприскореннями n -го порядку*, де $n = 0, 1, 2, \dots$, оскільки вони формуються на основі послідовності відлікових значень дискретизованого за часом віброприскорення. Істотно, що кількість математичних операцій, необхідних для визначення інтегрального віброприскорення n -го порядку на кожному відліку часу буде меншою, ніж це потрібно у разі проведення n -кратного інтегрування віброприскорення. Водночас таке віброприскорення за виконання певних умов здатне перебувати у відношенні прямої пропорційності з інтегралом, внаслідок чого, природно, матиме ті ж інформативні властивості, що й сам інтеграл.

Із зазначеного ряду інтегральних віброприскорень важливі віброприскорення 1-го та 2-го порядків, позаяк ці фізичні величини здатні замінити саме віброшвидкість та віброзміщення, відповідно. Тому наведена вище схема у новій редакції матиме вид:

віброприскорення \rightarrow {інтегральні віброприскорення 1-го (віброшвидкість) та 2-го (віброзміщення) порядків}.

Звичайно ж, зважаючи на доцільність та можливість уведення до теорії контролю таких базисних об'єктів як інтегральні віброприскорення n -го порядку, їх властивості і переваги мають отримати належне математичне обґрунтування.

Тому в статті розв'язується задача розроблення математичних засад для проведення процедури контролю вібраційного стану гідроагрегатів ГЕС та ГАЕС на основі альтернативних до віброшвидкості та віброзміщення параметрів — інтегральних віброприскорень 1-го і 2-го порядків. Актуальність задачі набуває виняткового значення у разі проведення динамічного виду віброконтролю, коли гідрогенератор перебуває у стані перехідного процесу, наприклад,

під час запуску та розгону системи. Варто зазначити, що потреба саме в такому віброконтролі гідрогенераторів на сьогодні надзвичайна, а сам різновид контролю зазначених об'єктів малодосліджений.

У зв'язку з цим *мета дослідження* — розроблення узагальнених рекурсивних математичних операторів, які, по-перше, розкриють еволюційні закони бієктивного відображення послідовності відлікових значень дискретного у часі сигналу віброприскорення у відлікові послідовності значень сигналів віброшвидкості та віброзміщення за стаціонарних та перехідних режимів роботи гідрогенератора під час його віброконтролю і, по-друге, на цій основі створять можливість і визначать умови мінімізації кількості математичних операцій на один відлік у разі еквівалентного заміщення віброшвидкості і віброзміщення нововведеними позасистемними фізичними величинами — інтегральними віброприскореннями 1-го і 2-го порядків, відповідно.

1. ІНТЕГРАЛЬНІ ВІБРОПРИСКОРЕННЯ 1-ГО, 2-ГО ТА N -ГО ПОРЯДКІВ

Вихідна умова задачі — впорядкована зчислена послідовність $\{a_0, a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots\}$ відлікових значень дискретного у часі сигналу $a_k = a(t_k)$, де $t_k = k \Delta t$, $k = 0, 1, 2, \dots$, згенерованого сенсорним акселерометром засобу віброконтролю на основі поточних значень віброприскорення $a(t)$ об'єкта контролю, починаючи з деякого початкового моменту часу t_0 , наприклад, $t_0 = 0$ (рис. 1). Змінна Δt — це крок дискретизації, значення якої надалі вважатимемо довільним, але постійним.

Фізичну величину $\xi^{(n)}$ називатимемо *інтегральним віброприскоренням n -го порядку*, де $n = 0, 1, 2, \dots$, якщо її відлікові значення визначатимуться за правилом

$$\xi_k^{(n)} = \sum_{i_1=0}^k \xi_{i_1}^{(n-1)} = \sum_{i_1=0}^k \sum_{i_2=0}^{i_1} \xi_{i_2}^{(n-2)} = \sum_{i_1=0}^k \sum_{i_2=0}^{i_1} \dots \sum_{i_n=0}^{i_{n-1}} a_{i_n}, \quad (1)$$

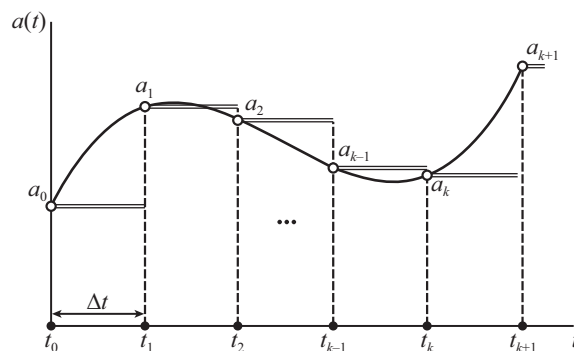


Рис. 1. Неперервний та дискретний сигнали віброприскорення $a(t)$

Fig. 1. The continuous and discrete signals of vibrating accelerator $a(t)$

а впорядкована сукупність цих значень утворювати-
ме послідовність $\{\xi_0^{(n)}, \xi_1^{(n)}, \dots, \xi_k^{(n)}, \xi_{k+1}^{(n)}, \dots\}$.

Відтак рекурсивна формула (1) виявляє себе як оператор бієктивного відображення послідовності $\{a_0, a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots\}$ у послідовність $\{\xi_0^{(n)}, \xi_1^{(n)}, \dots, \xi_k^{(n)}, \xi_{k+1}^{(n)}, \dots\}$.

Формула (1) має узагальнений характер і визначає ряд споріднених фізичних величин тієї ж розмірності, яку має і сама вихідна величина $a(t)$.

На підставі формули (1) внаслідок її узагальненості у дедуктивний спосіб неважко отримати інтегральні віброприскорення за конкретних значень $n = 0, 1, 2, \dots$.

Відтак для інтегрального віброприскорення 1-го порядку $\xi^{(1)}$ правилом визначення k -го відлікового значення, відповідно до формули (1), є оператор

$$\xi_k^{(1)} = \sum_{i_1=0}^k a_{i_1} = a_0 + a_1 + \dots + a_k, \quad (2)$$

на основі якого і відбувається взаємно-однозначне відображення послідовності відлікових значень віброприскорення $\{a_0, a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots\}$ у послідовність $\{\xi_0^{(1)}, \xi_1^{(1)}, \dots, \xi_k^{(1)}, \xi_{k+1}^{(1)}, \dots\}$.

Відлікові значення інтегрального віброприскорення 2-го порядку $\xi^{(2)}$, згідно з (1), де $n = 2$, необхідно розраховувати за формулою

$$\begin{aligned} \xi_k^{(2)} &= \sum_{i_1=0}^k \sum_{i_2=0}^{i_1} a_{i_2} = a_0 + (a_0 + a_1) + \dots + (a_0 + \dots + a_k) = \\ &= \sum_{i_1=0}^k \xi_{i_1}^{(1)} = \xi_0^{(1)} + \xi_1^{(1)} + \dots + \xi_k^{(1)}, \end{aligned} \quad (3)$$

яка і слугує оператором відображення

$$\{a_0, a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots\} \text{ у } \{\xi_0^{(2)}, \xi_1^{(2)}, \dots, \xi_k^{(2)}, \xi_{k+1}^{(2)}, \dots\}.$$

Організація розрахунку відлікових значень інтегральних віброприскорень будь-якого порядку нескладна. Це доводить рис. 2, де показано фрагмент алгоритму з додатково уведеним у тіло циклу рекурсивним оператором, за допомогою якого здійснюють послідовне визначення інтегральних віброприскорень 1-го і 2-го порядків на кожному кроці часового відліку.

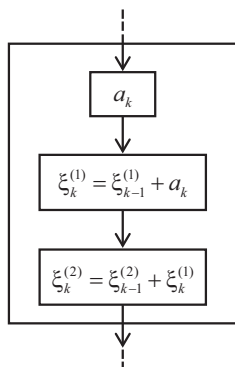


Рис. 2. Рекурсивний оператор розрахунку $\xi_k^{(1)}$ і $\xi_k^{(2)}$
Fig. 2. Recursive operator of calculation $\xi_k^{(1)}$ and $\xi_k^{(2)}$

Втім варто звернути увагу і на те, що за практичної реалізації зазначеного алгоритму для збереження даних вимагатиметься додатковий ресурс фізичної пам'яті засобу контролю, об'єм якої лише зростатиме, якщо зменшуватиметься крок дискретизації Δt і збільшуватиметься час проведення контролю. Це питання може виявитися і, достатньо ймовірно, виявиться проблемним, що врешті потребуватиме свого вирішення, але в кожному конкретному випадку окремо.

І наприкінці підрозділу принагідно зауважимо, що інтегральне віброприскорення 0-го порядку $\xi^{(0)}$ — це власне сама фізична величина віброприскорення об'єкта контролю, оскільки її відлікові значення дорівнюють $\xi_k^{(0)} = a_k$, через що послідовність $\{a_0, a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots\}$ відображається сама в себе без змін.

Також заслуговують на увагу й інтегральні віброприскорення, для яких $n > 2$ та $n < 0$. Щоправда, в статті зазначені випадки не розглядаються.

2. ЗАСТУПНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ЕКВІВАЛЕНТИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Заступними метрологічними еквівалентами фізичної величини називатимемо всі інші фізичні величини, відлікові значення яких перебувають у лінійній залежності від відлікових значень оригінала. Тоді для останнього можна записати

$$Y_k = c_1 X_{k-s} + c_2, \quad (4)$$

де $k = 0, 1, 2, \dots$; c_1, c_2 — інваріанти до відлікових значень X , наприклад, постійні або залежні від часу явно величини, $s \leq k$ — константа; X — один із еквівалентів фізичної величини Y .

Під час проведення процедури контролю заступні метрологічні еквіваленти здатні замінювати оригінали на різних рівнях вторинних перетворень. За певних умов така заміна може виявитися доцільною.

Наприклад, припустимо, що у наведеній формулі деяка фізична величина Y , себто оригінал, у послідовності вторинних перетворень — це прикінцева фізична величина, математично пов'язана з параметром P і за відліковими значеннями якої приймають рішення щодо відповідності останнього нормі. Тоді доцільність введення зазначеного вище поняття можна пояснити на основі формули (4). Адже неважко помітити, що у разі наявності у прикінцевій фізичної величини заступного метрологічного еквівалента, останній можна використати в свою чергу як прикінцевий. Водночас позитивний ефект від такої заміни з'явиться тоді, коли в послідовності вторинних перетворень зазначений еквівалент в явній

формі або неявно передуватиме оригіналу, наразі — прикінцевій фізичній величині $Y: P \rightarrow \dots \rightarrow X \rightarrow Y$. Такий перехід за критерієм інформативності еквівалентний і, головне, дозволить у наведеній послідовності скасувати як зайву останню операцію перетворення $X \rightarrow Y$, зменшивши у такий спосіб їх загальну кількість на одиницю. Тоді, відповідно до (4), на кожному (!) часовому відліку має зменшитися і певна кількість математичних операцій, необхідна для формування нової прикінцевої фізичної величини X . Звичайно ж, все це заощаджує часові, обчислювальні та апаратні ресурси засобу контролю, що у випадку їх нестачі завжди є надзвичайно важливою обставиною, доволі часто — критичною.

Також потрібно пам'ятати, що інваріанти c_1 і c_2 теж потребують щонайменше одноразового розрахунку з використанням зазвичай кількох математичних операцій поміж величинами різної фізичної природи. Однак практика свідчить, що чомусь доволі часто у випадках, коли заступні метрологічні еквіваленти не виявлені явно, але в розрахунках під час визначення прикінцевої фізичної величини Y , природно ж, присутні в неявній і, ймовірно, в нелокалізованій формі, визначення c_1 і c_2 повсякчас проводять повторно на кожному (?) кроці дискретизації. Вочевидь, що чітка ідентифікація еквівалента X дозволяє виправити таку алгоритмічну помилку, а еквівалентне заміщення ним оригіналу Y — унеможливує її взагалі.

До сказаного ще варто додати таке. У формулі (4) постійна s у загальному випадку набуває значень із множини невід'ємних цілих чисел $\{0, 1, 2, \dots\}$. У такому разі вона може бути і відмінною від нуля, що цілком допустимо. Це означає, що допоки оригінал Y набуде свого, скажімо, небезпечного відлікового значення на деякому k -му кроці дискретизації, його заступний еквівалент X здатний сповістити стосовно цієї небезпеки дещо раніше — на $(k-s)$ -му кроці. Відтак виникає додаткова умотивованість щодо еквівалентного заміщення оригіналу, оскільки з'являється можливість заздалегідь визначити подію, а отже — і приймати рішення. Або в іншій інтерпретації — для прийняття рішення в цьому випадку з'являється додатковий часовий ресурс.

У випадку композиції лінійних функціональних залежностей поміж оригіналом та кількома заступними метрологічними еквівалентами, один з яких у відношенні до іншого також є оригіналом,

$$Z_k = c_3 Y_{k-s} + c_4 = c_3 (c_1 X_{k-s-m} + c_2) + c_4 = c_1 c_3 X_{k-s-m} + c_2 c_4, \quad (5)$$

усі описані вище переваги, як доводить формула (5),

розкривають себе більш явно, оскільки з'являється можливість скасувати не одну, а водночас декілька операцій вторинного перетворення. За більш глибокої композиції позитивний ефект, звісно ж, може мати не лише кількісний, але й якісний характер.

3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ВІБРОПРИСКОРЕННЯ 1-ГО ПОРЯДКУ ЯК ЗАСТУПНОГО МЕТРОЛОГІЧНОГО ЕКВІВАЛЕНТА ВІБРОШВИДКОСТІ

Для визначення та ідентифікації можливих заступних метрологічних еквівалентів віброшвидкості й віброзміщення побудуємо узагальнені рекурсивні оператори, які розкривають правила взаємно-однозначного відображення послідовності відлікових значень дискретного у часі сигналу віброприскорення $\{a_0, a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots\}$ у відлікові послідовності значень віброшвидкості $\{v_0, v_1, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots\}$ та віброзміщення $\{s_0, s_1, \dots, s_k, s_{k+1}, \dots\}$, відповідно.

Відлікове значення v_k віброшвидкості v об'єкта контролю на деякому $(k+1)$ -му кроці дискретизації набуває приросту $a_k \Delta t$, через що нове значення зазначеного параметра в момент часу $t = t_{k+1}$ дорівнюватиме

$$v_{k+1} = v_k + \Delta v_{k+1} = v_k + a_k \Delta t \quad (6)$$

і потому не змінюватиметься протягом часу Δt . Нагадаємо, що у формулі (6) a_k — це відлікове значення віброприскорення, записане для моменту часу $t = t_k$ (рис. 1).

Оскільки k в зазначеній формулі не визначене і може набувати будь-яких значень із множини невід'ємних цілих чисел, співвідношення (6), урахувавши сталість Δt , можна переписати так:

$$v_{k+1} = v_0 + \Delta t \sum_{i=0}^k a_i, \quad (7)$$

де $v_0 = v(t_0)$ — початкове значення віброшвидкості.

Відповідно до виразу (2) сума у формулі (7) — це k -те відлікове значення інтегрального віброприскорення 1-го порядку

$$\xi_k^{(1)} = \sum_{i=0}^k a_i = a_0 + a_1 + \dots + a_k.$$

Відтак з урахуванням формули (2) співвідношення (7) набуває виду (4):

$$v_{k+1} = \Delta t \xi_k^{(1)} + v_0, \quad (8)$$

що свідчить стосовно лінійної залежності поміж відліковими значеннями віброшвидкості та інтегрального віброприскорення 1-го порядку і доводить еквівалентність останнього відносно до віброшвидкості. Такий статус дозволяє, як зазначалося вище, у разі потреби скасувати операцію перетворення інтегрального віброприскорення 1-го порядку у віброшвидкість. Тоді контрольованою фізичною величиною слугуватиме заступний метрологічний

еквівалент $\xi^{(1)}$ з границями допускового інтервалу, які розраховують на основі формули (8):

$$\xi_{\min}^{(1)} = \frac{v_{\min} - v_0}{\Delta t}; \quad \xi_{\max}^{(1)} = \frac{v_{\max} - v_0}{\Delta t}.$$

За нульової початкової умови $v_0 = 0$ поміж відліковими значеннями віброшвидкості та інтегрального віброприскорення 1-го порядку сформувати-муть пряму пропорційність

$$v_{k+1} = \Delta t \xi_{k+1}^{(1)}.$$

Тоді границями допускового інтервалу слугуватимуть $\xi_{\min}^{(1)} = \frac{v_{\min}}{\Delta t}$ та $\xi_{\max}^{(1)} = \frac{v_{\max}}{\Delta t}$.

4. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ВІБРОПРИСКОРЕННЯ 2-ГО ПОРЯДКУ ЯК ЗАСТУПНОГО МЕТРОЛОГІЧНОГО ЕКВІВАЛЕНТА ВІБРОЗМІЩЕННЯ

Відлікове значення віброзміщення s_k на $(k+1)$ -му кроці дискретизації набуває приросту $v_k \Delta t$, у зв'язку з чим у момент часу $t = t_{k+1}$ відлікове значення s_{k+1} дорівнює

$$\begin{aligned} s_{k+1} &= s_k + \Delta s_{k+1} = s_k + v_k \Delta t = \\ &= s_0 + \Delta t v_0 + \Delta t \sum_{i=1}^k v_i \end{aligned} \quad (9)$$

де $s_0 = s(t_0)$ — початкове значення віброзміщення.

Відповідно до (7) значення віброшвидкості на кожному i_1 -му часовому відліку

$$v_{i_1} = v_0 + \Delta t \sum_{i_2=0}^{i_1-1} a_{i_2}. \quad (10)$$

Підставляємо співвідношення (10) у формулу (9). Після нескладних перетворень отримуємо

$$s_{k+1} = s_0 + (k+1)\Delta t v_0 + \Delta t^2 \sum_{i_1=1}^k \sum_{i_2=0}^{i_1-1} a_{i_2}$$

і враховуємо, що $\sum_{i_1=1}^k \sum_{i_2=0}^{i_1-1} a_{i_2} = \sum_{i_1=0}^{k-1} \sum_{i_2=0}^{i_1} a_{i_2}$.

Тоді для відлікового значення віброзміщення s_{k+1} остаточно маємо

$$s_{k+1} = s_0 + (k+1)\Delta t v_0 + \Delta t^2 \sum_{i_1=0}^{k-1} \sum_{i_2=0}^{i_1} a_{i_2}. \quad (11)$$

Неважко помітити, що подвійна сума в формулі (11) — це $(k-1)$ -ше відлікове значення інтегрального віброприскорення 2-го порядку

$$\begin{aligned} \xi_{k-1}^{(2)} &= \sum_{i_1=0}^{k-1} \sum_{i_2=0}^{i_1} a_{i_2} = a_0 + (a_0 + a_1) + \dots + (a_0 + \dots + a_{k-1}) = \\ &= \sum_{i_1=0}^{k-1} \xi_{i_1}^{(1)} = \xi_0^{(1)} + \xi_1^{(1)} + \dots + \xi_{k-1}^{(1)} \end{aligned}$$

тому зазначену формулу можна переписати з урахуванням виразу (3)

$$s_{k+1} = s_0 + (k+1)\Delta t v_0 + \Delta t^2 \xi_{k-1}^{(2)}. \quad (12)$$

Отримані співвідношення (11) і (12) — це оператори відображень послідовності відлікових значень віброприскорення $\{a_0, a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots\}$ об'єкта вимірювання або контролю у відлікові значення ві-

брозміщення $\{s_0, s_1, \dots, s_k, s_{k+1}, \dots\}$, в першому випадку, безпосередньо, а в другому — опосередковано. Вони вирізняються рядом позитивних якостей, тому їх доцільно використовувати як альтернативні математичні моделі.

Одна з таких важливих якостей — *узагальненість* операторів, що дозволяє математично описувати процес зазначеного вище перетворення не лише за стаціонарних режимів роботи об'єкта віброконтролю, але і під час його перехідних процесів, і здійснювати це як за нульових, так і ненульових початкових умов віброшвидкості v_0 та віброзміщення s_0 .

Інша істотна якість зазначених операторів — їх *лінійність*. Адже рівняння відображення (12) можна записати у виді (4)

$$s_{k+1} = c_1 \xi_{k-1}^{(2)} + c_2, \quad (13)$$

де фізичні величини рівняння (13)

$$c_1 = \Delta t^2; \quad c_2 = s_0 + (k+1)\Delta t v_0 \quad (14)$$

— це інваріанти до всіх відлікових значень $\xi^{(2)}$.

Щоправда, потрібно зауважити, що у разі ненульових початкових значень віброшвидкості v_0 відображення (12) як дискретна у часі динамічна система, залишаючись лінійною, все ж набуде нової якості. Вона втратить автономність, і один із її коефіцієнтів, наразі c_2 , стане залежним від номера часового відліку k , а відтак, від часу t_k явно.

Отже, в усіх випадках інтегральне віброприскорення 2-го порядку $\xi^{(2)}$ залишатиметься відносно віброзміщення s заступним метрологічним еквівалентом. Це означає, що в усіх випадках зберігатиметься можливість скасувати операцію вторинного перетворення $\xi^{(2)} \rightarrow s$ і, відповідно, уникнути необхідності проведення математичних розрахунків за формулою (12) на кожному часовому відліку. Навіть попри те, що сама формула (12) містить мінімально можливу кількість математичних операцій, необхідних для зазначеного перетворення, що вже є її перевагою. У разі такої еквівалентної заміни віброконтроль потрібно здійснювати лише за відліковими значеннями інтегрального віброприскорення 2-го порядку, стосовно цього більш докладно йтиметься нижче.

Важливо, що в кожному окремому випадку ті співвідношення, які стануть похідними від зазначених формул (11) і (12), у свою чергу виявлятимуть власні переваги. Наразі зупинимося на найбільш суттєвих.

а) За ненульових значень початкової віброшвидкості v_0 у відображенні (12) внаслідок параметричності c_2 спостерігаються ознаки неавтономності. У цьому випадку, як зазначалося вище, можливість для еквівалентного переходу від контролю за значеннями

віброзміщення s до контролю за відліковими значеннями інтегрального віброприскорення 2-го порядку $\xi^{(2)}$ не зникає, оскільки рівняння (13) продовжує зберігати лінійні властивості. Але границі допускового інтервалу $\xi_{\min}^{(2)}$ та $\xi_{\max}^{(2)}$ наразі стають залежними від відлікового часу явно і змінюються від значення до значення за деяким законом, який визначають властивостями конкретної системи об'єкта контролю.

б) Інтегральне перетворення 2-го порядку $\xi^{(2)}$ не втратить властивості еквівалентності відносно віброзміщення і у разі, коли початкові значення вібропараметрів лише частково нульові. Наприклад, коли початкова віброшвидкість об'єкта контролю дорівнює $v_0 = 0$, а його початкове віброзміщення відмінне від нуля, оператор відображення (12) має вид:

$$s_{k+1} = \Delta t^2 \xi_{k-1}^{(2)} + s_0. \quad (15)$$

Водночас у формулі (15) інваріанти c_1 і c_2 залишаються постійними: $c_1 = \Delta t^2$, а $c_2 = s_0$.

У разі еквівалентної заміни контрольованої величини на $\xi^{(2)}$ границями допускового інтервалу слугуватимуть постійні значення $\xi_{\min}^{(2)}$ і $\xi_{\max}^{(2)}$, розраховані на основі (16),

$$\xi_{\min}^{(2)} = \frac{s_{\min} - s_0}{\Delta t^2}; \quad \xi_{\max}^{(2)} = \frac{s_{\max} - s_0}{\Delta t^2}.$$

в) Якщо всі початкові умови для об'єкта віброконтролю водночас покласти рівними нулю, тобто $s_0 = 0$, $v_0 = 0$, $a_0 = 0$, оператори відображення (11) і (12) знають істотних і важливих для нас спрощень.

Відразу ж зауважимо, що така ситуація у виробничій практиці зустрічається доволі часто. Наприклад, саме такі передумови спостерігаються під час запуску та розгону системи гідрогенератора у разі проведення контролю його вібраційного стану.

Відтак за нульових початкових умов у формулі (12) спостерігають якісні зміни, де між відліковими значеннями віброзміщення та інтегрального віброприскорення 2-го порядку встановлюється не просто лінійна залежність, а формується пряма пропорційність

$$s_{k+1} = \Delta t^2 \xi_{k-1}^{(2)}. \quad (16)$$

У формулі (16), порівняно із виразом (4), постійна $c_1 = \Delta t^2$ — квадрат кроку дискретизації, а $c_2 = 0$.

У цьому випадку інтегральне віброприскорення 2-го порядку $\xi_{k-1}^{(2)}$ об'єкта контролю відносно віброзміщення s чітко ідентифікує себе як заступний метрологічний еквівалент, що створює можливість для скасування прикінцевої операції вторинного перетворення, регламентованого співвідношенням (16), і для проведення контролю не за відліковими значеннями віброзміщення, а за значеннями власне інтегрального віброприскорення $\xi^{(2)}$, що загалом змен-

шує кількість необхідних для перетворення математичних операцій. За цими ж значеннями можна і приймати рішення щодо відповідності об'єкта контролю нормі. Границі допускового інтервалу мають розраховуватися на основі формули (16):

$$\xi_{\min}^{(2)} = \frac{s_{\min}}{\Delta t^2}; \quad \xi_{\max}^{(2)} = \frac{s_{\max}}{\Delta t^2}.$$

Варто зауважити, що формула (16) виявляє інформативну рівнозначність обох сигналів: і віброзміщення s , і інтегрального віброприскорення 2-го порядку $\xi^{(2)}$. Втім необхідно звернути увагу на істотну обставину, докладно описану в підрозділі 2, що наразі має місце в нашому випадку. Адже, як свідчить (16), відлікові значення інтегрального віброприскорення $\xi^{(2)}$ випереджають відліки віброзміщення на два кроки дискретизації $2\Delta t$. Як альтернативі віброзміщення це надає інтегральному віброприскоренню 2-го порядку додаткову перевагу.

Заслугує на увагу і простота реалізації алгоритму розрахунку $\xi^{(2)}$ (рис. 2).


ВИСНОВКИ

У статті розв'язано задачу формування математичних засад для проведення процедури контролю вібраційного стану гідроагрегатів ГЕС та ГАЕС на основі альтернативних до віброшвидкості та віброзміщення параметрів — інтегральних віброприскорень 1-го та 2-го порядків. Для цього введено ряд нових базисних понять, основними з-поміж яких є інтегральні віброприскорення n -го порядку та заступні метрологічні еквіваленти фізичних величин, і розроблено узагальнені рекурсивні математичні оператори відображення відлікових значень віброприскорення у віброшвидкість та віброзміщення, дослідження яких дозволило виявити в їх структурі новий різновид позасистемних фізичних величин, що перебуває у відношенні прямої пропорційності від інтегралів віброприскорення. Така властивість за критерієм загальної кількості математичних операцій, необхідних для перетворення, дозволяє розглядати їх як ефективну та прийнятну альтернативу зазначеним інтегралам, а за показником інформативної здатності — як їх еквівалент. Відтак, у разі заміни контрольованих віброшвидкості та віброзміщення на інтегральні віброприскорення 1-го та 2-го порядків, відповідно, за нульових початкових та інших рівних умов з'являється можливість істотно зменшити обчислювальне, часове та апаратне навантаження на вимірювальний канал засобу віброконтролю. Це гарантуватиме можливість швидкодіючої реалізації зазначеної процедури. Саме такі властивості найвиразніше набувають свого виняткового значення

у разі проведення динамічного віброконтролю, коли гідроагрегатор перебуває в стані перехідного процесу, наприклад, під час запуску та розгону. Потреба в такому віброконтролі гідроагрегаторів на сьогодні

є надзвичайною, оскільки його реалізація дозволить здійснити віброзахист гідроагрегаторів у процесі їх експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А. Б. Соловьев. — М.: Машиностроение (Shyrman A.R. Practical vibration diagnostics and status monitoring of mechanical equipment / A.R. Shurman, A.V. Solovjov. — М.: Meshanical engineering), 1996. — 276 с/р.
2. Кухарчук В.В. Моніторинг, діагностування та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів: монографія / В.В. Кухарчук, С.Ш. Кацив, В.Г. Мадьяров та ін. — Вінниця: ВНТУ (Kuharchuk V.V. Monitoring, diagnostics and forecasting of the state of vibration of hydraulic units: monograph / Kuharchuk V.V., S.Ch. Katsiv, V.H. Madyarov et al. — Vinnitsia: VNTU), 2014. — 168 с/р.
3. Вибрации в технике: справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). — М.: Машиностроение, Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела (Vibrations of the technics: reference book. In the six volumes / Editorial Board: V.N. Chelomev (prev.). — М. Mechanical engineering, Vibrating processes and machines / under ed. of E.E. Lavendelis). 1981. Т/V 4— 509 с/р.
4. Кухарчук В.В. Метод аналітичного розрахунку віброшвидкості у режимі розгону гідроагрегата / В.В. Кухарчук, В.Ф. Граняк, Ю.Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України (Kuharchuk V.V. The method of analytical calculation of vibration velocity during acceleration hydraulic unit / Kuharchuk V.V., V.F. Graniak, Yu.V. Vedmitskiy // Herald of Engineering Academy of Ukraine). — 2015. — № 2. — С/Р. 66 — 70.
5. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения. — Издательство стандартов (State Standard 24346-80. Vibration. Terms and Definitions. — Publishing of standards), 1980. — 27 с/р. 

Отримано / received: 08.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А.Я. Куликом (Україна).

Prof. A. Ya. Kulyk, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

А.С. АСТАХОВ — АКАДЕМІК АКАДЕМІЇ МЕТРОЛОГІЇ УКРАЇНИ

Загальні збори Академії метрології України обрали дійсним членом академії генерального директора ДП «Вінницястандартметрологія» Андрія Сергійовича Астахова, відзначивши його особистий вагомий внесок у розвиток наукових досліджень у сфері метрології, забезпечення єдності, високої точності та достовірності вимірювань у регіоні й країні, підготовку висококваліфікованих кадрів — метрологів.

Редакція та редколегія журналу «Метрологія та прилади» щиро вітають Андрія Сергійовича, одного з активних авторів видання.



УДК 389.6:681.121

ПОВІРКА (КАЛІБРУВАННЯ) МАСОВИХ ВИТРАТОМІРІВ. ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБКИ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

Т. Кепещук, кандидат технічних наук, начальник центру калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки, Державне підприємство «Івано-Франківськстандартметрологія»

Розглянуто методи і засоби повірки (калібрування) масових витратомірів на робочому середовищі за реальних умов експлуатації на вузлах обліку сирової, товарної нафти та нафтопродуктів. Установлено, що, оскільки коефіцієнт використання стаціонарних еталонних засобів, зокрема, трубопоршневої повірочної установки (ТПУ) дуже низький, а також, ураховуючи, що зазначені ЗВТ дуже дорогі, застосування окремого ТПУ для кожного вузла обліку економічно не вигідне, більш доцільне застосування пересувних еталонних засобів. Розроблено пересувну установку на базі еталонних масових витратомірів, а також алгоритми оцінювання похибки та невизначеності вимірювань під час проведення повірки (калібрування) масових витратомірів за допомогою зазначеної установки.

In this paper describe the methods and instruments of verification (calibration) mass flowmeter into knots account of crude oil and petroleum products. It is noted that the use of mass flow has several advantages: direct mass measurements, high accuracy of measurement, the lack of influence of fluid properties - viscosity, density, high reliability. Established that as utilization of stationary reference means, in particular prover (TPU) is very low, and given that these TPU is very expensive, use a separate TPU for each unit of accounting is uneconomical, more appropriate would be the use of mobile reference tools. Developed by mobile units based on standard mass flowmeter, and algorithms evaluation of the error and uncertainty of measurements.

Ключові слова: масові витратоміри, облік нафти та нафтопродуктів, еталонні засоби вимірювальної техніки, похибка та невизначеність вимірювань.

Keywords: mass flowmeter, account of crude oil and petroleum products, standard measuring equipment, the error and uncertainty of measurements.

Одні з найбільш досконалих і точних засобів вимірювання маси в динаміці — масоміри (масові витратоміри). З'явилися вони в 70-х роках минулого століття, безперервно удосконалювалися і стали одними з прогресивних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) маси найрізноманітніших продуктів. Практика застосування виявила низку безсумнівних переваг зазначених ЗВТ: пряме вимірювання маси, висока точність вимірювання, відсутність впливу властивостей рідини (в'язкості, густини), висока надійність, відсутність рухомих частин і малі витрати на обслуговування. Важлива особливість коріолісових масових витратомірів — можливість одночасного вимірювання маси і густини чи об'єму і густини, а також температури продукту [1].

В Україні застосування масових витратомірів у різних галузях національного господарства, зокрема, в нафтогазовому секторі почалося останніми роками. На сьогодні значну частину вузлів обліку нафти на нафтогазовидобувних підприємствах оснащено саме масовими витратомірами.

Під час експлуатації масових витратомірів (зокрема, за комерційного обліку товарної нафти та нафтопродуктів) згідно з [2] необхідно здійснювати визначення (контроль) їх метрологічних характеристик (МХ) шляхом проведення повірки (калібрування) на робочому середовищі за реальних умов експлуатації.

У загальному випадку повірку масових витратомірів проводять з використанням таких методів [3, 4, 5]:

- із застосуванням вагової повірочної установки,



- за допомогою ТПУ — прuvera в комплекті з еталонним густиноміром.

З метою проведення повірки на робочому середовищі за реальних умов експлуатації на вузлах обліку на базі масових витратомірів відповідно до [2] необхідно передбачувати або якийсь стаціонарний еталонний ЗВТ зі стабільними МХ (ТПУ 1 або 2 розряду згідно з ГОСТ 8.510 чи еталонний витратомір 2 розряду згідно з ГОСТ 8.510 з границями допустимої відносної похибки, не більшими $\pm 0,1\%$ [2], або можливість визначення (контролю) їх МХ за допомогою пересувних засобів з аналогічними наведеними вище характеристиками.

Методи та засоби повірки масових витратомірів, зокрема, з використанням вагової повірочної установки та за допомогою трубопоршневої повірочної в комплекті з еталонним густиноміром, похибки вимірювань за застосування зазначених засобів розглянуто в [1, 3–5]. Тому дослідження, направлені на розроблення пересувних технічних засобів, а також алгоритмів оцінювання похибок та невизначеностей вимірювань повірки (калібрування) масових витратомірів на робочому середовищі за реальних умов експлуатації, характеризуються актуальністю на сьогодні.

Мета досліджень — розглянути методи і засоби повірки (калібрування) масових витратомірів; розробити пересувну установку на базі еталонних масових витратомірів, а також алгоритми оцінювання похибки та невизначеності вимірювань за проведення повірки (калібрування) масових витратомірів на робочому середовищі за реальних умов експлуатації на вузлах обліку сирої, товарної нафти та нафтопродуктів за допомогою зазначеної установки.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Як відзначалося вище, повірку масових витратомірів можна проводити з використанням вагової повірочної установки, за допомогою ТПУ в комплекті з еталонним густиноміром, а також з використанням пересувних технічних засобів.

Вагова повірочна установка включає ємкість, установлену на вагах (гідравлічних або електронних), пристрій для перемикання потоку рідини, датчики (компаратори) для сигналізації початку й кінця заповнення ємкості (відсікання заданої маси рідини) і систему управління. За використання електронних ваг зважування рідини в ємкості можна проводити в динаміці у процесі заповнення.

До недоліків використання вагової повірочної установки можна віднести циклічність процесу ви-

мірювання (наливання-зливання) і деякі труднощі в організації автоматизації процесу неперервності вимірювань.

Стаціонарними ТПУ, в основному, оснащують вузли обліку нафти (нафтопродуктів) (ВОН) за наявності робочих витратомірів з великою пропускною здатністю ($500 \text{ м}^3/\text{год}$ і більшою), а також ті, що розміщені у складних географічних умовах. Як правило, в Україні таких немає. Окрім того, необхідно врахувати, що повірку витратомірів та лічильників проводять періодично, тому коефіцієнт використання стаціонарних повірочних установок, зокрема, вагових установок та ТПУ дуже низький [3].

На вузлах обліку сирої нафти як еталонні, так і контрольні необхідно використовувати витратоміри, що відрізняються від робочих відсутністю впливу в'язкості та вмісту вільного газу або мають більш широкі робочі діапазони в'язкості та вмісту вільного газу в сирій нафті порівняно з відповідними діапазонами робочих витратомірів.

Повірочні вимірювальні лінії з еталонним витратоміром потрібно використовувати в економічно вигідних випадках, а також за обліку високообводненої сирої нафти, коли значення границь допустимої відносної похибки вимірювань маси нафти нетто, в основному, визначають не границями допустимої відносної похибки витратоміра, а границями допустимої відносної похибки вимірювань маси нафти, зумовленої величиною допустимої абсолютної похибки вимірювань вмісту води.

Тому, враховуючи наведене вище, для повірки (калібрування) витратомірів на ВОН можна з успіхом використовувати пересувні установки, що набагато економічніше порівняно зі стаціонарними еталонними засобами. Ними доцільно повірять (калібрувати) ВОН, оснащені витратомірами з низькою пропускною здатністю, а також групу ВОН, розміщених компактно на обмеженій території.

Як пересувну установку для повірки (калібрування) масових витратомірів товарної і сирої нафти, нафтопродуктів, широкої фракції легких вуглеводнів, газового конденсату можна використовувати установку на базі еталонних масових витратомірів (рис. 1).

Установка повинна представляти собою мобільний комплекс, що складається з таких складових частин:

- технологічного блока;
- апаратного блока опрацювання інформації.

Обидва блоки розміщують у блок-боксі, який установлюють на дні кузова автомобіля підвищеної прохідності або автомобільного причепа.

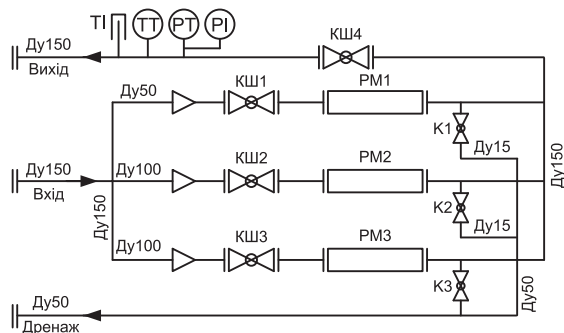


Рис. 1. Технологічна схема пересувної установки для повірки (калібрування) масових витратомірів:
 ТТ — термометр, ТТ — перетворювач температури,
 РТ — перетворювач тиску, РІ — манометр,
 РМ1 — РМ3 — еталонні масові витратоміри, КШ, К — крани кульові
 Fig. 1. Scheme for the mobile unit verification (calibration) mass flowmeter

Технологічний блок, у свою чергу, повинен включати:

- три еталонні витратоміри (наприклад, масові витратоміри типу MICRO MOTION серії CMF 100 (1 од.) та CMF 300 (2 од.) з вторинною апаратурою MVD польового виконання з границями допустимої відносної похибки, не більшими $\pm 0,1\%$);
- технологічні трубопроводи;
- станину для розміщення трубопроводів з масовими витратомірами;
- перетворювачі тиску (наприклад, типу 3051TG фірми «Fisher-Rosemount» з границями допустимої відносної похибки $\pm 0,25\%$);
- перетворювачі температури (наприклад, типу 644ЕН фірми «Fisher-Rosemount» з границями допустимої абсолютної похибки $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- манометр надлишкового тиску МТИ класу точності 0,6;
- термометр скляний показувальний, у захищеній оправі, типу ТЛ-4 з границями допустимої абсолютної похибки $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- трубопровідну запірну арматуру (відсічні, дренажні кульові крани).

Апаратний блок опрацювання інформації повинен забезпечувати:

- * електричне живлення витратомірів, вимірювачів і перетворювачів температури та тиску, електрообладнання, що входять до складу технологічного блока;
- * опрацювання сигналів з вимірювальних приладів технологічного блока за заданим у програмі алгоритмом, у тому числі опрацювання сигналів з витратомірів, що повіряють (калібрують), за заданим алгоритмом відповідно до методики їх повірки (калібрування);
- * друкування протоколів повірки (калібрування) витратомірів.

Окрім того, для підтримання необхідних температурних режимів усередині блок-бокса за мінусової температури навколишнього повітря повинна передбачатися система опалення. У блок-боксі має бути місцеве освітлення. Для підключення технологічного блока до вузла обліку в складі установки повинні бути рукави високого тиску зі швидкокороз'ємною запірною арматурою.

Повірку (калібрування) масових витратомірів здійснюють шляхом порівняння показань робочого витратоміра з показаннями еталонного за вибраних значень витрати в діапазоні вимірювань, наприклад, 0, 25, 50, 75, 100 % від верхньої межі діапазону.

Якщо повірка масових витратомірів проводиться на місці експлуатації й діапазон витрат визначений, то МХ можуть визначатися за крайніх значень діапазону і значеннях, вибраних усередині діапазону з інтервалом 10-20 % від найбільшої витрати.

Спосіб опрацювання результатів повірки масового витратоміра залежить від методу повірки. При цьому розрізняють два випадки [3]:

▲ співвідношення похибок еталонних засобів повірки та масового витратоміра, що повіряється, менше 1:3;

▲ зазначене співвідношення більше 1:3.

У першому відносну похибку масового витратоміра (δ_i , %) визначають для кожного i -того вимірювання за формулою:

$$\delta_i = [(M_{pi} - M_{Ei}) / M_{Ei}] \cdot 100, \quad (1)$$

де M_{pi} — маса, вимірена масовим витратоміром, що повіряється, т, M_{Ei} — маса, вимірена еталонним засобом, т.

У другому випадку повірку проводять за спеціальними методиками з використанням багаторазових вимірювань. Відповідно до [3, 7, 8] похибку ЗВТ визначають як композицію систематичних і випадкових складових еталонних засобів і засобів, що підлягають повірці, шляхом статистичного їх підсумовування з урахуванням законів розподілу.

Ураховуючи наведене вище, за співвідношення похибок еталонних засобів повірки та масового витратоміра, що повіряється, більшого 1:3, повірку проводять за допомогою багаторазових вимірювань — у кожній точці діапазону витрат проводять не менше 10 вимірювань.

Відносна похибка масового витратоміра, що повіряється, (δ_o , %) складається зі систематичної й випадкової складових [3]:

$$\delta_o = \Theta_{\Sigma} + t_{0,95} \times S_{oj(\delta)\max}, \quad (2)$$

де Θ_{Σ} — сумарна систематична складова похибки, %; $t_{0,95}$ — квантиль розподілу Стюдента за довірчої ймовірності 0,95; $S_{oj(\delta)\max}$ — максимальне значення

середньоквадратичного відхилення (СКВ) випадкової складової з отриманих у точках діапазону, %.

Сумарну систематичну складову похибку відповідно до [3] визначають за формулою:

$$\Theta_{\Sigma} = 1,1 \sqrt{\Theta_{\Sigma EM}^2 + \Theta_{PM \max}^2 + \Theta_{Z EM}^2 + \Theta_{Z PM}^2 + \Theta_{KB EM}^2 + \Theta_{KB PM}^2} \quad (3)$$

де $\Theta_{\Sigma EM}$ — невиключена систематична похибка (НСП) еталонного масового витратоміра, % (беруть із паспорта або свідоцтва про повірку/калібрування); $\Theta_{PM \max}$ — НСП робочого масового витратоміра, що повіряється, %; $\Theta_{Z EM}$, $\Theta_{Z PM}$ — похибки, зумовлені зміщенням нуля еталонного та робочого масових витратомірів, відповідно, %; $\Theta_{KB EM}$, $\Theta_{KB PM}$ — похибки квантування еталонного та робочого масових витратомірів, відповідно, %.

За $\Theta_{PM \max}$ приймають максимальне значення систематичної похибки робочого масового витратоміра Θ_{PM} у точках діапазону та визначають за формулою:

$$\Theta_{PM} = (\sum_{i=1}^{n_j} \delta_{ij}) / n_j \quad (4)$$

де δ_{ij} — значення відносної похибки δ_i в j -ій точці, що визначають згідно з виразом (1); n_j — кількість вимірювань у j -ій точці діапазону.

Похибки, зумовлені зміщенням нуля еталонного та робочого масових витратомірів, можна визначити за такими виразами:

$$\Theta_{Z EM} = (\Delta_{Z EM} / Q_{\text{сеп}}) \cdot 100, \quad \Theta_{Z PM} = (\Delta_{Z PM} / Q_{\text{сеп}}) \cdot 100, \quad (5)$$

де $\Delta_{Z EM}$, $\Delta_{Z PM}$ — значення зміщення нуля еталонного та робочого масових витратомірів, відповідно, т/год (беруть із паспорта або свідоцтва про повірку/калібрування); $Q_{\text{сеп}}$ — середнє значення витрати:

$$Q_{\text{сеп}} = (Q_{\max} + Q_{\min}) / 2, \quad (6)$$

де Q_{\max} , Q_{\min} — максимальна та мінімальна витрати діапазону, відповідно, т/год.

Похибки квантування еталонного та робочого масових витратомірів можна визначити за виразами:

$$\Theta_{KB EM} = (\Delta_{KB EM} / Q_{\text{сеп}}) \cdot 100, \quad \Theta_{KB PM} = (\Delta_{KB PM} / Q_{\text{сеп}}) \cdot 100, \quad (7)$$

де $\Delta_{KB EM}$, $\Delta_{KB PM}$ — НСП квантування еталонного та робочого масових витратомірів, відповідно, т/год (приймають рівними половині молодшого розряду цих ЗВТ);

СКВ випадкової складової похибки визначають у кожній j -ій точці діапазону за формулою:

$$S_{oj}(\delta) = \sqrt{(\sum_{i=1}^{n_j} (\delta_{ij})^2) / (n_j - 1)}. \quad (8)$$

У формулу (2) підставляють максимальне значення СКВ з отриманих у точках діапазону.

Калібрування масових витратомірів здійснюють у зазначених вище точках робочого діапазону вимірювань. При цьому кількість спостережень у до-

сліджуваних точках згідно з [9] для отримання достовірних результатів повинна бути не меншою 10.

У загальному випадку, в процесі калібрування оцінюють різницю між результатом вимірювання X вимірювального засобу, що калібрується, і дійсним значенням вимірюваної величини [10]:

$$\Delta = X - X_d. \quad (9)$$

Ця різниця визначає систематичну похибку вимірювального засобу, що калібрується, у точці калібрування. У подальшому цю похибку використовують для внесення поправки до результату вимірювання. Отже, оцінювання невизначеності калібрування вимірювального засобу полягає у знаходженні сумарної стандартної $u(\Delta)$ і розширеної $U(\Delta)$ невизначеностей величини Δ [10]:

$$U(\Delta) = k u(\Delta), \quad (10)$$

де k — коефіцієнт охоплення, який у загальному випадку вираховують як коефіцієнт Стюдента для ймовірності 95 % і ефективного числа степенів свободи ν_{eff} , яке визначають за формулою Велча-Саттерсвейта. За проведення калібрування ЗВТ відповідно до [9] у випадках, за яких вимірювальній величині можна приписувати нормальний розподіл ймовірностей (розподіл Гауса) і за яких стандартна невизначеність вимірювання, пов'язана з оцінкою вихідної величини, достатньо надійна, коефіцієнт охоплення приймають рівним 2 ($k = 2$).

Під час опрацювання результатів калібрування масових витратомірів за допомогою еталонного витратоміра здійснюють оцінювання невизначеності вимірювань маси продукту за таким алгоритмом.

У випадку безпосереднього порівняння показань ЗВТ, що калібрується, й еталонного ЗВТ (у нашому випадку калібрування робочого масового витратоміра за допомогою еталонного масового витратоміра) відповідно до [10, 11] дійсне значення величини, вимірюваної робочим масовим витратоміром $X_{PMД}$, визначають через показання еталонного масового витратоміра X_{EM} у такий спосіб:

$$X_{PMД} = X_{EM} + \Theta_{EM} + \Delta_{KB EM} + \Delta_{Z EM}, \quad (11)$$

де Θ_{EM} — НСП еталонного масового витратоміра, т/год (беруть із паспорта або свідоцтва про повірку/калібрування).

Окрім того, результат вимірювання робочого масового витратоміра пов'язаний з його показаннями X_{PM} згідно з виразом:

$$X_M = X_{PM} + \Delta_{KB PM} + \Delta_{Z PM}. \quad (12)$$

З урахуванням виразів (9), (11), (12) модельне рівняння набуде виду:

$$\Delta = (X_{PM} + \Delta_{KB PM} + \Delta_{Z PM}) - (X_{EM} + \Theta_{EM} + \Delta_{KB EM} + \Delta_{Z EM}). \quad (13)$$

Таблиця. Бюджет невизначеності

Table. The budget uncertainty

Вхідна величина X_i	Оцінка вхідної величини x_i	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Число степенів свободи	Розподіл ймовірностей вхідної величини	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок невизначеності $u_i(\Delta)$	Розширена невизначеність
X_{PM}	\bar{x}_{PM}	$u(\bar{x}_{PM})$	$n_{PM} - 1$	нормальний	1	$u(\bar{x}_{PM})$	$U(\Delta),$ (10)
X_{EM}	\bar{x}_{EM}	$u(\bar{x}_{EM})$	$n_{EM} - 1$	нормальний	-1	$-u(\bar{x}_{EM})$	
Θ_{EM}	-	$u(\Theta_{EM}) = \Theta_{EM} / \sqrt{3}$	∞	рівномірний	-1	$-u(\Theta_{EM})$	
Δ_{KBPM}	-	$u(\Delta_{KBPM}) = \Delta_{KBPM} / \sqrt{3}$	∞	рівномірний	1	$u(\Delta_{KBPM})$	
Δ_{KBEM}	-	$u(\Delta_{KBEM}) = \Delta_{KBEM} / \sqrt{3}$	∞	рівномірний	-1	$-u(\Delta_{KBEM})$	
Δ_{ZPM}	-	$u(\Delta_{ZPM}) = \Delta_{ZPM} / \sqrt{3}$	∞	рівномірний	1	$u(\Delta_{ZPM})$	
Δ_{ZEM}	-	$u(\Delta_{ZEM}) = \Delta_{ZEM} / \sqrt{3}$	∞	рівномірний	-1	$u(\Delta_{ZEM})$	

За багатократних вимірювань оцінки X_{PM} і X_{EM} визначають як середньоарифметичне результатів n_{PM} та n_{EM} показань, відповідно, робочого масового витратоміра x_{PM} та еталонного масового витратоміра x_{EM} :

$$\bar{x}_{PM} = \frac{1}{n_{PM}} \sum_{q=1}^{n_{PM}} x_{PMq}, \quad \bar{x}_{EM} = \frac{1}{n_{EM}} \sum_{q=1}^{n_{EM}} x_{EMq}. \quad (14)$$

Наведеним вхідним величинам відповідають такі невизначеності:

$u(\bar{x}_{PM})$, $u(\bar{x}_{EM})$ — стандартні невизначеності (тип A), зумовлені розсіюванням показань робочого та еталонного масового витратомірів, відповідно:

$$u(\bar{x}_{PM}) = \sqrt{\frac{1}{n_{PM}(n_{PM}-1)} \sum_{q=1}^{n_{PM}} (x_{PMq} - \bar{x}_{PM})^2}, \quad (15)$$

$$u(\bar{x}_{EM}) = \sqrt{\frac{1}{n_{EM}(n_{EM}-1)} \sum_{q=1}^{n_{EM}} (x_{EMq} - \bar{x}_{EM})^2},$$

де $u(\Theta_{EM})$ — невизначеність еталонного масового витратоміра, отримана із значення його невиключеної систематичної похибки в очікуванні рівномірного розподілу НСП усередині границь; $u(\Delta_{KBPM})$, $u(\Delta_{KBEM})$ — невизначеності квантування робочого та еталонного масових витратомірів, відповідно; $u(\Delta_{ZPM})$, $u(\Delta_{ZEM})$ — невизначеності, зумовлені зміщенням нуля робочого та еталонного масових витратомірів, відповідно.

Сумарна стандартна невизначеність калібрування масового витратоміра визначатиметься згідно з виразом:

$$u(\Delta) = \sqrt{u^2(\bar{x}_{PM}) + u^2(\bar{x}_{EM}) + u^2(\Theta_{EM}) + u^2(\Delta_{KBPM}) + u^2(\Delta_{KBEM}) + u^2(\Delta_{ZPM}) + u^2(\Delta_{ZEM})}. \quad (16)$$

Ефективне число степенів свободи v_{eff} визначають за формулою Велча-Саттерсвейта [9]:

$$v_{eff} = u^4(\Delta) / \sum_{i=1}^m u_i^4(\Delta) / v_i, \quad (17)$$

де v_i — число степенів свободи для i -ої вхідної величини.

Для невизначеностей типу A, отриманих із багатократних повторних спостережень, число степенів свободи v_i на одиницю менше числа n_i проведених спостережень: $v_i = n_i - 1$.

Ураховуючи наведене вище ефективне число степенів свободи v_{eff} у цьому випадку дорівнюватиме:

$$v_{eff} = \frac{u^4(\Delta)}{u^4(\bar{x}_{PM}) / (n_{PM} - 1) + u^4(\bar{x}_{EM}) / (n_{EM} - 1)}, \quad (18)$$

Бюджет невизначеності вимірювань за проведення калібрування робочого масового витратоміра за допомогою еталонного масового витратоміра наведено у таблиці.

ВИСНОВКИ


Розглянувши методи та засоби повірки (калібрування) масових витратомірів на робочому середовищі в реальних умовах експлуатації можна зробити такий висновок.

Оскільки коефіцієнт використання стаціонарних еталонних засобів, зокрема, ТПУ дуже низький, а також ураховуючи, що такі ЗВТ дуже дорогі, застосування окремого ТПУ для кожного вузла обліку економічно не вигідне. Застосування пересувних еталонних засобів, зокрема, установки для повірки (калібрування) масових витратомірів доцільне, в першу чергу, з економічної точки зору. Окрім того, використання еталонних масових витратомірів

має ряд переваг: пряме вимірювання маси, відсутність впливу змін робочого середовища (в'язкості, густини, профілю швидкостей) на показання вимірювання.

З метою практичної реалізації проведення повірки (калібрування) масових витратомірів за допомогою зазначеної установки розроблено алгоритми оцінювання похибки та невизначеності вимірювань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Измерение количества и качества нефти и нефтепродуктов при сборе, транспортировке и коммерческом учете/ Ханов Н.И., Фатхутдинов А.Ш., Слепян М.А., Золотухин Е.А., Фатхутдинов Т.А., Коловертнов Г.Ю. — СПб.: Изд-во СПбУЭФ (Measurement of the quantity and quality of oil and oil products in the collection, transportation and commercial account/ Khanov N.I., Fatkhutdinov A.S., Slepian M.A., Zolotukhin E.A., Fatkhutdinov T.A., Kolovertnov G.Y. — St. Petersburg: Publishing SPUEF). 2000. — 268 с/р.
2. Рекомендации по определению массы нефти при учетных операциях с применением систем измерений количества и показателей качества нефти. — Уфа: Нефтеавтоматика (Recommendations to determine the mass of oil in the accounting operations using systems of measurement quantity and quality of oil. — Ufa: Nefteavtomatika). 2005. — 56 с/р.
3. Автоматизированный учет нефти и нефтепродуктов при сборе, транспорте и переработке. Пособие для метрологов / Фатхутдинов А.Ш., Слепян М.А., Золотухин Е.А., Фатхутдинов Т.А., Коловертнов Г.Ю. — Уфа: Нефтеавтоматика, (Automated accounting of oil and petroleum products in the collection, transportation and processing. Manual for metrologists / Fatkhutdinov A.S., Slepian M.A., Zolotukhin E.A., Fatkhutdinov T.A., Kolovertnov G.Y. — Ufa: Nefteavtomatika). 1999. — 296 с/р.
4. МИ 3189-2009 ГСИ. Счётчики - расходомеры массовые Micro Motion фирмы Emerson Process Management. Методика поверки комплектом трубопоршневой поверочной установки и поточного преобразователя плотности (MI 3189-2009 GSI. Mass flowmeters Micro Motion concern Emerson Process Management. Methods of verification kit prover and density transducer).
5. МИ 3272-2010 ГСИ. Счетчики-расходомеры массовые. Методика поверки на месте эксплуатации компак-
- прувером в комплекте с турбинным преобразователем расхода и поточным преобразователем плотности (MI 3272-2010 GSI. Mass flowmeters. Methods of verification on site prover kit turbine flow transducers and density transducer).
6. ГОСТ 8.510-2002 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объема и массы жидкости (GOST 8.510-2002 GSI. State verification schedule for means measuring volume and mass of liquid).
7. МИ 303-83 Методические указания. ГСИ. Преобразователи расхода турбинные. Методы и средства поверки многократными измерениями (MI 303-83 Methodical instructions. GSI. Turbine flow transducers. Methods and means of verification of the multiple measurements).
8. МИ 1832-88 Методические указания. ГСИ. Сличения групп средств поверки одинакового уровня точности. Основные правила (MI 1832-88 Methodical instructions. GSI. Comparisons of group means of verification the same level of accuracy).
9. ЕА-4/02 М:2013 Ви́раження невизначеності вимірювання при калібруванні (ЕА-4/02 М:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration).
10. Захаров И.П. Оценивание неопределенности измерений при проведении калибровок//Метрологія та прилади. (Zakharov I.P. Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration// Metrology and instruments) — 2007. — № 1. — С/Р. 31—42.
11. Малецкая О.Е., Москаленко М.В. Калибровка СИТ: оценка погрешности и неопределенности измерений // Системы обработки информации. (Maletskaya O.E., Moskalenko M.V. Calibration of measuring instruments: error estimation and measurement uncertainty// Systems of processing information) — 2013. — № 3 (110). — С/Р. 75—79. 

Отримано / received: 07.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. В.Б. Большаковим (Україна).
D. Sc. (Techn.), V.B. Bolshakov, Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 531.004

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ З КОМПЛЕКСНИМ ПІДХОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК

В. Квасніков, доктор технічних наук,

професор кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій,

Ю. Лещенко, аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних систем,

Національний авіаційний університет, м. Київ

На базі комплексного підходу до визначення похибок реалізовано інтелектуальну вимірювальну систему, в рамках якої використовують традиційні та оригінальні алгоритми вимірювання ймовірнісних характеристик випадкових процесів. Для кожного з них подано оцінки точності статистичних вимірювань.

On the threshold of the new millennium, humanity has come to realize the need of total computerization measurements. This led to the development of measurement tools functionality, which led to the need to revise the principles of their work and the development of intelligent measurement systems (InMS) new generation.

Today one of the main directions of development of gathering, processing and management is their intellectualization, that enable them to determine their purposeful behavior (algorithm operation) depending on changes in their conditions of work (current problems

of measurement and control, input actions, internal state and available resources) and the required accuracy of measurements.

The theoretical basis for building intelligent systems is the theory of artificial intelligence. The tasks solved such systems are obvious specificity defined measurement and metrological aspects of the problem, which is not fully taken into account.

In the first decades of development InMS attention was focused on the design, mathematical foundations of software systems, machine control and standardization of basic methods of measurement.

Later development has shifted towards improving control methods of geometric parameters measurement and integration of computer systems in manufacturing processes; determine the accuracy of coordinate measurements performed. Much has been done to improve the accuracy InMS, but not quite thoroughly studied development issues InMS high precision characteristics of random processes.

Ключові слова: інтелектуальна система, вимірювання, геометричні параметри, випадковий процес, база даних, інтелектуалізація.

Keywords: intelligent, measurement, geometrical parameters, random process, database, intellectualization.

Найважливішу роль у забезпеченні якості та конкурентоспроможності продукції практично всіх галузей промисловості відіграє контрольно-вимірювальна техніка, в якій особливе місце належить засобам вимірювання та контролю геометричних параметрів деталей, вузлів машин і механізмів.

Теоретичний базис для побудови інтелектуальних систем — теорія штучного інтелекту. Завдання, що вирішують такими системами мають очевидну специфіку, яку визначають вимірювальними та метрологічними аспектами проблеми, повною мірою не врахованими.

Тому питання інтелектуалізації вимірювальних систем представляють все більший інтерес. Отже, виникає необхідність у більш чіткому визначенні концепції ІнВС необхідної точності, що дозволило б з єдиних позицій поглянути на інтелектуалізацію вимірювальної техніки [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій засвідчує, що комп'ютерно-вимірювальна модель (КВМ) значно спрощує метрологічну підготовку виробництва нового виробу, оскільки відпадає необхідність створення значної кількості засобів спеціального вимірювального оснащення[1]. Протокол з результатами контролю, що видається КВМ,



В. Квасніков



Ю. Лещенко

підвищує відповідальність виробників за якість обробки деталей та зразкових одиниць [2].

У світовій практиці вже є ряд прикладів застосування універсальних КВМ у вимірювальних модулях, що працюють за безлюдної технології, і спеціальних КВМ — так званих інтелектуально-вимірювальних роботів [3].

Питанням розроблення ІнВС, траєкторного управління вимірювальною головкою, програмно-математичного забезпечення КВМ, автоматизації та оптимізації процесів вимірювання присвячені роботи відомих українських вчених О. М. Новікова, П. П. Орнатського, І. Б. Сіроджа, Ю. М. Туза та інших, вчених Росії, Литви та далекого зарубіжжя.

Багато зроблено для підвищення точності ІнВС, проте недостатньо досконало вивчено питання розроблення ІнВС з високими точнісними характеристиками випадкових процесів.

У рамках цієї статті розглянемо розроблення та дослідження ІнВС необхідної точності для аналізу ймовірнісних характеристик випадкових процесів і надамо рекомендації щодо їх реалізації.

Як методологічний стержень для вирішення сформульованої задачі передбачаємо використовувати комплексний підхід до визначення похибок ІнВС.

У процесі створення системи необхідно вирішити такі завдання:

- розроблення інформаційного забезпечення — бази даних вимірювань і бази знань алгоритмів опрацювання вимірювань;
- розроблення математичного забезпечення (МЗ), що реалізує числові методи;
- розроблення ПЗ, яке реалізує МЗ і забезпечує інтелектуальний інтерфейс із користувачем.

Ідея комплексного підходу полягає в тому, щоби розглядати похибку вимірювань як єдине і неподільне ціле, що трансформується зі зміною режимів вимірювань, умов експлуатації та інших факторів. При цьому враховують основні чинники, що впливають на точність статистичних вимірювань: похибки відліків, алгоритмів відновлення сигналів між відрахунками, кроку дискретизації, обсягу вибірки і довжини реалізації. Підхід добре узгоджується з експериментальним методом та імітаційним моделюванням.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕРГОДИЧНОЇ ВЛАСТИВОСТІ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЩІЛЬНОСТІ ЙМОВІРНОСТЕЙ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

Для випадкових ергодичних процесів оцінки одномірної та двомірної $\langle \bar{\omega}_2[X'X''] \rangle$ густини ймовір-

ностей дорівнюють [2]:

$$\langle \bar{\omega}_1[X] \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{\omega}_1[X|\langle x(t) \rangle] dt; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \langle \bar{\omega}_2[X', X''] \rangle &= \\ &= \frac{1}{T - |t'' - t'|} \times \int_0^{T - |t'' - t'|} \bar{\omega}_2[X', X''|\langle x(t) \rangle] dt, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\langle x(t) \rangle$ — вимірена аналоговим способом оцінка реалізації випадкового процесу, а T — її тривалість.

За цифрових вимірювань із рівномірним кроком $T_0 = T_{I+1} - T_I$, де I — номер показання й екстраполяції сигналу $X(T)$ за одним попереднім показником X_I , рівняння (1) і (2) набувають виду:

$$\langle \bar{\omega}_1[X] \rangle = \frac{1}{nT_0} \sum_{i=1}^n \int_{t_i}^{t_{i+1}} \bar{\omega}_1[X|\langle x_i \rangle] dt; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \langle \bar{\omega}_2[X', X''] \rangle &= \\ &= \frac{1}{(n - \mu)T_0} \times \sum_{i=1}^{n-\mu} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \bar{\omega}_2[X', X''|\langle x_i \rangle] dt; \end{aligned} \quad (4)$$

де $\bar{\omega}_1[X|\langle x_i \rangle]$ і $\bar{\omega}_2[X', X''|\langle x_i \rangle]$ — одомірні і двомірні густини ймовірності сигналу у моменти часу.

За комплексного підходу розширюють визначення ергодичних випадкових процесів і отримують алгоритми вимірювання щільності розподілу ймовірностей з оцінкою їх похибок. Із них можна отримати алгоритми вимірювання характеристичних функцій, статистичні характеристики випадкових процесів і вирази для обчислення їх похибок.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА

Сучасні ІнВС дозволяють проводити вимірювання деталі й відразу ж виводити протокол результату. Керувати роботою механізму допомагає персональний комп'ютер. Перевага їх ще і в тому, що вони «запам'ятовують» параметри деталі. За необхідності подальших замірів чутливий наконечник підводять до контрольної точки, і далі робот працює в автоматичному режимі. Отже, виключається людський фактор.

ІнВС дозволяють виконувати роботи у важкодоступних (морське дно, космос тощо) і небезпечних для здоров'я (запильнення простору, радіація, вибухонебезпечність тощо) місцях, скоротити трудомісткість та контрольні операції.

На базі розглянутого раніше комплексного підходу до визначення похибок статистичних вимірювань реалізовано ІнВС. Відповідно до принципів функціонування інтелектуальних ЕОМ та експертних систем схема роботи ІнВС складається з п'яти етапів (рис. 1). На першому — ІнВС за каналом зв'язку сприймає дані вимірювань, а також інформацію стосовно характеру вимірювального завдання, об'єктів

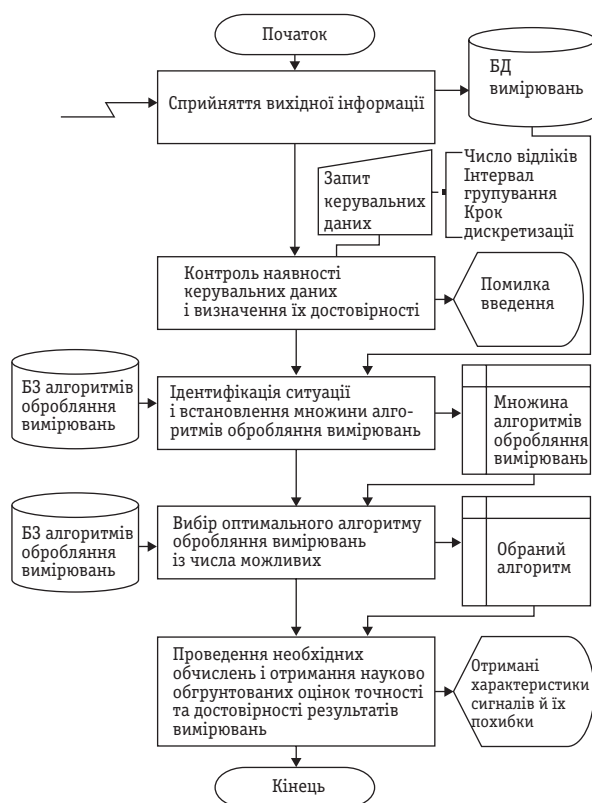


Рис. 1. Схема роботи ІнВС

Fig. 1. Scheme of work InMS

та умов вимірювань, необхідної точності вимірювань, пропонування вимог та обмежень.

Вид і характер цієї інформації має забезпечувати можливість ідентифікації вимірювальної ситуації, яка визначається властивостями об'єкта вимірювань, умовами вимірювань, пред'явленими вимогами і накладеними обмеженнями, та встановлення безлічі алгоритмів опрацювання вимірювань, реалізація яких можлива на основі апаратних і програмних засобів, що входять до ІнВС. Результат цього етапу — створення бази даних (БД) вимірювань.

На другому етапі здійснюється контроль наявності управляючих даних (числа відліків, кроку дискретизації та інтервалу групування) і визначення їх достовірності. У разі виявлення недостовірних даних система оповіщає користувача стосовно введення недостовірних керуючих даних.

На третьому етапі, у відповідності зі схемою роботи ІнВС, на основі наявних у БД вимірювань і бази знань (БЗ) алгоритмів опрацювання вимірювань, виконуються ідентифікація ситуації й встановлення безлічі алгоритмів опрацювання вимірювань.

Четвертий етап за схемою роботи ІнВС полягає у виборі оптимального алгоритму опрацювання вимірювань із числа можливих за допомогою БЗ алгоритмів опрацювання вимірювань.

Оскільки правило вибору цього алгоритму неминуче пов'язано із встановленням характеристик точності результатів вимірювань за використання порівнюваних алгоритмів, вимірювані знання повинні включати всі відомості, необхідні для виконання відповідних процедур: розрахунків, імітаційного моделювання або їх комбінацій.

Після вибору оптимального алгоритму опрацювання вимірювань виконується заключний етап роботи ІнВС — проведення необхідних обчислень і отримання наукового обґрунтування оцінок точності та достовірності результатів вимірювань. У результаті до споживача виводяться отримані характеристики сигналів з оцінкою їх похибок у виді порівняльних таблиць і графіків.

Загальновизнано, що найбільш коректний і адекватний з позицій сучасної теорії вимірювань — ймовірнісно-статистичний підхід до описання як вимірюваних величин, так і властивостей самих систем вимірювань.

Для реалізації описаної схеми роботи ІнВС повинна включати до свого складу такі основні частини:

- базу знань (БЗ), призначену для зберігання довгострокових даних, що описують певну область, (а не поточних даних), і правил, що описують доцільні перетворення даних цієї області;
- вирішувач, який, використовуючи вихідні дані з робочої пам'яті та знання із БЗ, формує таку послідовність правил, які, за застосування до вихідних даних, призводять до вирішення завдання [1].

Компонент набуття знань автоматизує процес наповнення ІнВС знаннями, здійснюваний користувачем-експертом. Пояснювальний компонент пояснює, як система отримала розв'язок задачі (або чому вона не отримала рішення) і які знання вона при цьому використовувала, що полегшує експерту тестування системи та підвищує довіру користувача до отриманого результату. Діалоговий компонент орієнтований на організацію спілкування з користувачем як у ході вирішення завдань, так і в процесі набуття знань і пояснення результатів роботи.

ІнВС працює в двох режимах: режимі набуття знань і в режимі вирішення завдання.

У режимі набуття знань спілкування з ІнВС здійснює (через посередництво інженера зі знань) експерт. У цьому режимі експерт, використовуючи компонент набуття знань, наповнює систему знаннями, які дозволяють ІнВС у режимі рішення самостійно (без експерта) вирішувати завдання з проблемної області. Експерт описує проблемну область у виді сукупності даних і правил. Дані визначають об'єкти,

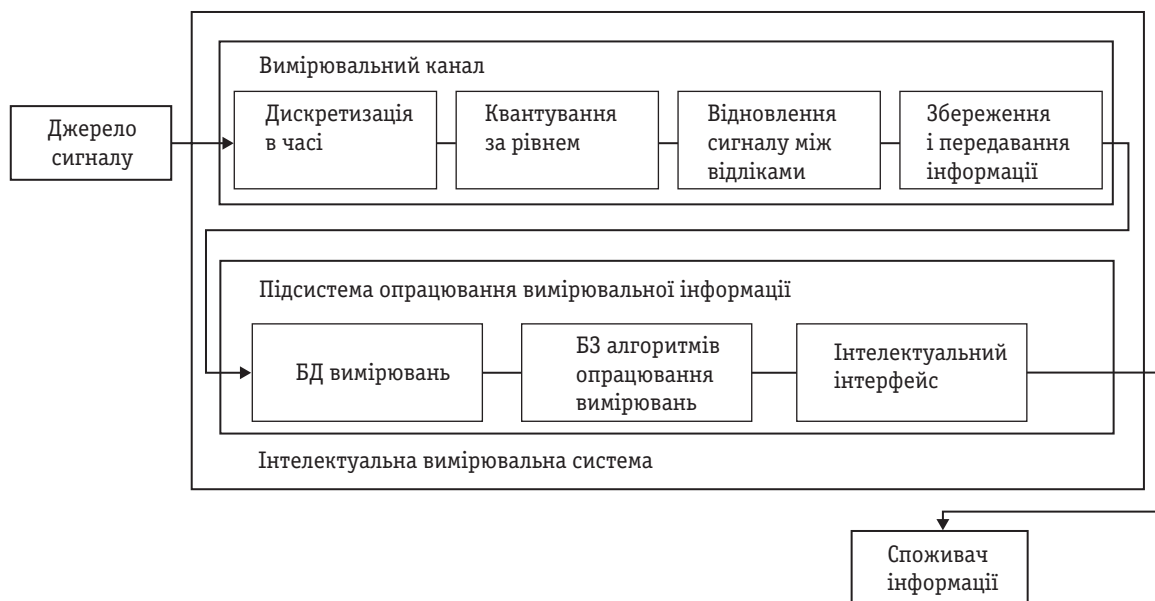


Рис. 2. Інформаційна модель ІнВС

Fig. 2. Information model of InMS

їх характеристики і значення, що існують у сфері експертизи. Правила визначають способи маніпулювання з даними, характерні для певної області [2].

Відзначимо, що режиму набуття знань у традиційному підході до розроблення програм відповідають етапи алгоритмізації, програмування і налагодження, виконувані програмістом. Отже, на відміну від традиційного підходу у разі ІнВС розроблення програм здійснює не програміст, а експерт (за допомогою ІнВС), який не володіє програмуванням.

У режимі консультації спілкування з ІнВС здійснює кінцевий користувач, якого цікавить результат і (або) спосіб його отримання.

У режимі консультації дані про завдання користувача після опрацювання їх діалоговим компонентом надходять у робочу пам'ять. Вирішувач, на основі вхідних даних з робочої пам'яті, загальних даних про проблемну область та правил з БЗ, формує вирішення завдання. ІнВС за вирішення завдання не лише виконує визначену послідовність операцій, а й попередньо формує її. Якщо реакція системи незрозуміла користувачеві, то він може вимагати пояснення.

Інформаційні процеси, що протікають у ІнВС, відрізняються на рис 2.

Сигнал, що містить інформацію стосовно характеру вимірювальної задачі, об'єктів і умов вимірювань, необхідної точності вимірювання, заданих вимог та обмежень, після перетворення на зручну для опрацювання форму (дискретизації в часі, квантування за рівнем, відновлення сигналу між відліками), запам'ятовування і передавання за вимірюваль-

ним каналом, надходить до підсистеми опрацювання вимірювальної інформації (ПВІ).

Тут, на основі наявних БД вимірювань і БЗ алгоритмів опрацювання вимірювань, за безпосередньої участі інтелектуального інтерфейсу здійснюється ідентифікація ситуації й вибір оптимального алгоритму опрацювання вимірювань, на основі якого проводяться необхідні обчислення, а потім отримані характеристики сигналів з оцінкою їх похибок видаються споживачеві інформації.

Дискретизацію в часі й квантування за рівнем вимірювальної інформації для подання її в цифровій формі виконує АЦП. Завдання зберігання інформації вирішуються аналоговими і цифровими запам'ятовувальними пристроями. ПВІ будується на основі мікропроцесорних контролерів, універсальних і спеціалізованих ЕОМ.

Окремо будуються характеристики математичного очікування, дисперсії та кореляційної функції з оцінками їх похибок.

ВИСНОВКИ

Практичний досвід показує, що для складних ІнВС сценарій з однією оболонкою і багатьма базами знань працює не так гладко, як би цього хотілося, за винятком тих випадків, коли прикладні області дуже близькі. Проте, навіть якщо перехід від однієї прикладної області до іншої вимагає модифікації оболонки, принаймні основні принципи її побудови вдається зберегти.

Отже, ІнВС дозволяють вибрати найкращий алгоритм вимірювання ймовірнісних характеристик

і супроводжують результати вимірювань оцінкою їх похибок [3].

Ця подія реалізується завдяки використанню комплексного підходу до визначення похибок статистичних вимірювань. Теоретичний аналіз і експериментальна перевірка цих результатів показали, що комплексний підхід до визначення похибок статистичних вимірювань дозволяє, насамперед, отримати науково обґрунтовані оцінки точності та достовірності результатів вимірювань.

Окрім того, він дозволяє синтезувати швидкі й точні алгоритми вимірювання статистичних характеристик випадкових сигналів. Так, синтезовані алгоритми дозволяють за тієї ж тривалості реаліза-

ції зменшити похибку вимірювання у 2–4 рази порівняно з відомими алгоритмами. І, навпаки, за незмінної точності вимірювань у стільки ж разів можна зменшити тривалість реалізації.

Нарешті, теорія точності, що розробляється, дозволяє отримати ефективні методи зменшення похибок, аналізу та синтезу сучасних ІнВС.

Інтелектуальні вимірювальні системи здатні розпізнавати деталі й їх поверхні з точки зору якості та відповідності заданим геометричним розмірам за кресленням, керувати технологічним процесом і приймати рішення щодо його зміни. У свою чергу, прийняття рішення включає формування проміжних цілей для виконання поставленого завдання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Романов, В.Н. Интеллектуальные средства измерения / В.Н. Романов, В.С. Соболев, Э.И. Цветков; под ред. Э.И. Цветкова // М.: РИЦ «Татьянин день» (Romanov, V.N. intellektualnye sredstva izmerenij / V.N. Romanov, V.S. Sobolev, E.I. Cvetkov; pod red. E.I. Cvetkova // М.: RIC «Tatyanin den»), 1994. 280 с/с.
2. Заико, А.И. Аналоговые измерения многомерных характеристик случайных процессов / А.И. Заико // Метрология (Zaiko A.I. Analogovye izmereniya mnogomernyxarakteristik sluchajnyx processov / A.I. Zaiko // Metrologiya). 1985. № 11. С/С. 3—6.
3. Zhitnikov, V.P. Determination of methodical and instrumental errors of statistical measurements / V.P. Zhitnikov, N.A. Zaiko // High Speed Hydrodynamics: Proc. of 2nd Int. Summer Scientific School. Cheboksary, Russia, 2004. P. 281—285.
4. Урличич Ю.М., Данилин Н.С. Проблемы качества и долговечности современного космического приборостроения. М.: МАКС Пресс (Urlichich Yu.M., Danilin N.S. problemy kachestva i dolgovechnosti sovremennogo kosmicheskogo priborostroeniya. М.: MAKS Press), 2003. — 100 с/с. 5.
5. Обработывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования. / Афонин и др.; Под ред. В.И. Афонина. М.Машиностроение (Obrobatyuyushhee oborudovanie novogo pokoleniya. koncepciya proektirovaniya. / Afonin i dr.; pod red. B.Ji. Afonina. M.Mashinostroenie), 2001. 256 с/с.
6. Электроприводы промышленных роботов. Концепция проектирования. / В.В. Слепцов, В.И. Картовцев, А.А. Лукин. Под ред. Слепцова В.В. М. (Elektroprivody promyshlennyy robotov. Koncepciya proektirovaniya. / V.V. Slepcev, V.I. Kartovcev, A.A. Lukin. pod red. Slepцова V.V. М.): 2003. — 76 с/с.
7. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студентов высших учебных заведений М.: Издательский центр «Академия» (Terexov V.M. Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik dlya studentov vysshix uchebnyx zavedenij М.: Izdatelskij centr «Akademiya»), 2005. — 304 с/с.
8. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: Учебное пособие для ВУЗов. Челябинск: Издательство ЮУРГУ (Usynin Yu.S. Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnoe posobie dlya vuzov. Chelyabinsk: izdatelstvo YUURGU), 2001. — 358 с/с.
9. Лукашкин В.Г., Гарипов В.К., Слепцов В.В., Вишнеков А.В. Автоматизация измерений, контроля и управления / М.: Машиностроение 1 (Lukashkin V.G., Garipov V.K., Slepcev V.V., Vishnekov A.V. avtomatizaciya izmerenij, kontrolya i upravleniya / М.: Mashinostroenie 1), 2005. — 663 с/с.
10. Г. Олссон, Д. Пiani Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект (G. Olsson, D. Piani Cifrovye sistemy avtomatizacii i upravleniya. spb.: Nevskij Dialekt), 2001. 260 с/с. ■

Отримано / received: 01.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.В. Кокінін (Україна).
Prof. V.V. Kokin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.



І. Борис, начальник сектора,
М. Крупей, головний метролог,
В. Галуга, начальник сектора,
ПАТ НВО «Термоприлад», м. Львів

Представлено прилади для вимірювання та регулювання температури та інших фізичних величин.

The devices for measuring and regulation of temperature and others physical quantities are presented.

Ключові слова: пристрої, вимірювання, регулювання, температура, АСУ.
Keyword: devices, measuring, regulation, temperature, ACS.

Ефективність функціонування підприємств не в останню чергу залежить від упровадження енергозощаджувальних систем, автоматизованих систем управління (АСУ), одним із елементів яких є регульовальний пристрій; модернізації застарілого контрольно-вимірювального обладнання, яке вже не відповідає сучасним вимогам як за технічними характеристиками, так і за можливістю взаємодії з більш сучасними приладами.

Наприклад, багаторічний досвід експлуатації, зокрема, Західною електроенергетичною системою термосигналізаторів типу ТКП та ТСМ (ТКП, ТСМ) засвідчив, що вони потребують спеціальних вимог до монтування, недостатньо надійні в процесі роботи, не дозволяють автоматизувати контроль температури за допомогою інформаційно-діагностичних комплексів. Калібрування (повірку) ТКП та ТСМ можна проводити лише в лабораторних умовах. Принцип дії, наприклад, ТСМ побудовано на залежності між температурою і тиском насичених парів заповнювача (для ТСМ-100 — метилхлористий технічний, ТСМ-200 — ацетон технічний) у герметично замкнутій системі [1], за порушення герметичності якої можливе витікання наповнювача, що погіршує екологічний стан довкілля і може нести небезпеку здоров'ю людей.

У 2001 році на ПС 750 кВт «Західноукраїнська» і ПС 330 кВт «Рівне» замість наявних ТКП і ТСМ на діючих оливнонаповнених апаратах (трансформаторах) встановлено нові вимірювальні комплекти: спочатку регулятор РТ-0193 і перетворювач опору ТСМ-1088, а згодом, зважаючи на позитивні відгуки персоналу підстанцій стосовно надійності роботи регуляторів, модернізовано на основі процесора базові регулятори-вимірювачі РТ-0102 (РТ-0102) і термоперетворювачі ТСП-1388М, розроблені й виготовлені ПАТ НВО «Термоприлад». РТ-0102 пройшли державні випробування і занесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки. З метою більш широкого їх застосування в комплекті з ТСП-1388М для вимірювання рідини в потужних трансформаторах фахівці ПАТ НВО «Термоприлад» зверталися до



І. Борис



М. Крупей



В. Галуга

виробників трансформаторів з пропозицією опрацювати можливість використання ними РТ-0102 з введенням відповідних змін до технічної документації на трансформатори. На той час це питання до кінця не було вирішено, але нині, коли поставки приладів з Росії припиняються, воно знову стало актуальним, тим більше, що ціна комплекту (РТ-0102, ТСП-1388М) у рази менша від закордонних аналогів. Для ознайомлення фахівців енергетичних та інших галузей наводимо технічні характеристики РТ-0102.

Призначений він для вимірювання, автоматичного регулювання та сигналізації фізичних величин різних технологічних процесів. Можлива реалізація регулювання в режимі таймера. Експлуатують його за температури навколишнього повітря від мінус 10 до 50 °С, відносної вологості, не більшої за 98 % (за температури повітря 35 °С), атмосферного тиску від 84 до 106,7 кПа.

РТ-0102 можуть працювати як окремі незалежні пристрої й як складові частини систем управління технологічними процесами.

Випускають їх у різних виконаннях:

- РТ-0102 (Щ1) — щитовий у корпусі «Щ1» (рис. 1);
- РТ-0102 (Щ2) — щитовий у корпусі «Щ2» (рис. 2);
- настінний РТ-0102 (рис. 3 а);
- корпус на DIN-рейці (рис. 3 б);
- корпус водостійкий — нестандартне виконання (рис. 6 а);
- безкорпусний — нестандартне виконання (рис. 6 б).

Базовий варіант РТ-0102 — РТ-0102 (Щ1), який за входом може бути одно- і двоканальним, реалізує три закони регулювання:

- двопозиційний з можливістю сигналізації виходу вимірюваної величини за встановлені межі (або, навпаки, входження її до заданих меж);
- трипозиційний;
- пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) з можливістю сигналізації виходу вимірюваної величини за встановлені межі (або, навпаки, входження її до заданих меж).

Можлива реалізація ПІД-регулятора, в тому числі для роботи із засувками, за якої відсутні дво- і трипозиційне регулювання.

Вихід РТ-0102 (Щ1) — двоканальний (в одноканальному регуляторі для двопозиційного та ПІД регулювання другий канал використовують для сигналізації) і реалізовано з двох однакових або різних варіантів виходів (вихідних сигналів):

- * контактів електромагнітного реле;



Рис. 1. РТ-0102 (Щ1) двоканальний

Fig. 1. РТ-0102 (Щ1) two-channelled

* виходу оптосимістора (перемикання відбувається за «переходу через нуль» значення змінної напруги) або трифазного оптосимісторного виходу;

* транзисторного ключа;

* активного комутованого виходу з вихідним сигналом, не меншим від 5 мА або 10 В;

* аналогового виходу (0 — 5), (0 — 20) або (4 — 20) мА;

* виходу симістора на 5 А за 220 В.

ПІД закон регулювання в РТ-0102 (Щ1) з комутованим виходом реалізовано імпульсним сигналом, в якому змінною є шпаруватість імпульсів (наявна широтно-імпульсна модуляція).

Працює він у комплекті з первинними перетворювачами:

▲ термоперетворювачами опору з умовним позначенням номінальної статичної характеристики перетворення (НСХ) 50М, 100М, 50П, 100П (Pt100), Pt500, Pt1000;

▲ термоелектричними перетворювачами з НСХ ХА (К), ХК (L), ПП (S), ПР (В), ЖК (J) або іншими;

▲ перетворювачами з уніфікованим вихідним сигналом постійного струму (0 — 5), (4 — 20), (0 — 20) мА; (0 — 0,1), (0 — 1), (0 — 10) В або імпульсного сигналу з амплітудою 24 В ± 30 % і частотою (0 — 1000) Гц із можливістю задання початкового і кінцевого значень шкали індикації. Залежність — лінійна або відповідає температурній зміні е.р.с. вибраної термопар.

РТ-0102 (Щ1) також застосовують для сумісної роботи з вимірювальними перетворювачами, в яких уніфікований вихідний сигнал не має лінійної залежності від вимірюваної величини. Переважно це стосується дешевих вимірювальних перетворювачів, що працюють з термопарами (наприклад, з НСХ ХА (К), ХК (L) тощо), в яких залежність між їхніми вихідними сигналами та температурою нелінійна.



а) PT-0102 (Щ2)

б) PT-0102 (Щ2)
восьмиканальний

Рис. 2. PT0102 (Щ2)

Fig. 2. PT0102 (Щ2)

Для варіанту зі струмовим входом у регуляторі передбачено вихід +24 В з максимальним струмом 20 мА для живлення перетворювача з уніфікованим вихідним сигналом.

PT-0102 (Щ1) залежно від обраного типу первинного перетворювача вимірює і регулює фізичні величини у різному діапазоні з різною точністю (таблиця 1) та з різною ціною найменшого розряду (таблиця 2).

Ступінь захисту за передньою панеллю — IP54.

PT-0102 (Щ2) має ширші функціональні можливості порівняно з PT-0102 (Щ1). Він вимірює, автоматично регулює, сигналізує та архівує значення температури або інших фізичних величин. У ньому передбачено зв'язок з персональним комп'ютером (ПК), який здійснюється через послідовний інтерфейс RS232 або RS485 трипроводною лінією, гальванічно розв'язаною від інших кіл. Пристрій підтримує протокол MODBUS і видає за ним усі параметри регулювання та архіву. За побудови інформаційних



а)

б)

Рис. 3. PT0102 настінний (а) і на DIN-рейці (б)

Fig. 3. PT0102 wall (a) and on DIN-rack (b)

мереж з використанням декількох пристроїв їх виходи на ПК запараляють. При цьому ідентифікацію кожного пристрою у ПК здійснюють на основі їх комунікаційного номера.

PT-0102 (Щ2) має два режими роботи:

- програмований режим (уставки регулювання змінюються в часі за заданою програмою), за якого реалізують двопозиційний і ПІД закон регулювання;
- режим стабілізації, за якого забезпечують реалізацію трьох законів регулювання (двопозиційного, трипозиційного, ПІД), а також режим ручного регулювання.

За програмованого режиму (рис. 4) криву регулювання задають кусково-лінійною апроксимацією, за якою задану величину k -тої ділянки визначають за формулою:

$$T_{prog}(\Delta t) = T_k + \frac{T_{k+1} - T_k}{\Delta t_k} \times \Delta t,$$

де T_k , T_{k+1} — регульовані величини початку k -тої та $(k + 1)$ — ої ділянок; Δt_k — тривалість k -тої ділянки; Δt — інтервал часу від початку k -тої ділянки; k змінюється від 1 до n (n — кількість ділянок апроксимації).

Таблиця 1.

Table 1.

НСХ первинного перетворювача	Діапазон вимірювання, °C	Границя допустимої основної абсолютної похибки PT-0102
ХА(К)	від мінус 50 до 1250 °C	± 2 °C
ХК(Л)	від мінус 50 до 600 °C	
ПП(С)	від 0 до 1300 °C	
ЖК(Д)	від мінус 100 до 750 °C	
ПР(В)	від 300 до 1600 °C	± 3 °C
50М, 100М	від мінус 50 до 150 °C	± (1 + 0,005 T*) °C або ± (0,5 + 0,001 T) °C або ± (0,1 + 0,001 T) °C
50П, 100П (Pt100), Pt500, Pt1000	від мінус 50 до 600 °C	
уніфікований сигнал	від мінус 999 до 9999**	± 0,25 або ± 0,1**

* T — температура вимірюваного середовища;

** одиниці вимірювання згідно з фізичною величиною.

Таблиця 2.

Table 2.

Ціна найменшого розряду за індикації температури, °C	Число десяткових розрядів за індикації
1 — для термоелектричних перетворювачів;	4 або два по 3
0,01 або 0,1 або 1 — для термоперетворювачів опору (вибирається клавіатурою)	

PT-0102 (Щ2) може працювати з телескопом радіаційного пірометра (наприклад, ТЕРА-50), а також з одночасно приєднаними вісьмома первинними перетворювачами. Вимірювання, регулювання (сигналізація) відбуваються за кожним із восьми каналів (рис. 2б). Окрім цього, спрацює і спільна для всіх каналів сигналізація. На передній панелі восьмиканального PT-0102 (Щ2) розміщено цифрові індикатори для відображення номера каналу, вимічених значень температури і службових символів, вісім світлодіодів для відображення стану вихідних каналів, два світлодіода для відображення спільної для всіх каналів сигналізації та несправності на вході, чотири кнопки для виставлення необхідних параметрів і режимів роботи PT-0102.

Програму взаємодії PT-0102 (Щ2) і ПК записано на диску, який входить до комплекту поставки за замовлення регулятора зі зв'язком із комп'ютером. Вона дозволяє переглядати архіви та візуалізацію процесу вимірювання і регулювання (рис. 5) як в одноканальному варіанті, так і у восьмиканальному.

На базі регулятора-вимірювача PT-0102 на вимогу замовників реалізовано ряд нестандартних приладів як за умовами використання та специфічним компонуванням, так і з розширеними функціональними можливостями, які перед випуском проходять метрологічну або державну метрологічну атестацію. Серед них пристрої для медичного обладнання, для застосування за умов підвищеної вологості, для вимірювання та регулювання відносної вологості повітря психрометричним способом та за допомогою ємнісних перетворювачів вологості (рис. 6) та інші.

Створення, функціонування, розроблення стратегії та практики електротермометрії проводив і проводить ПАТ НВО «Термоприлад» як з урахуванням вимог замовників, так і з урахуванням температурного чинника. Тобто весь температурний діапазон, який застосовують у народному господарстві й розподіляють на низькі (-273 ... -100) °C,

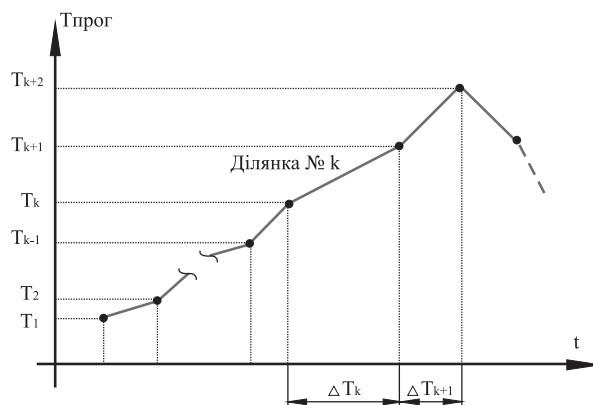


Рис. 4. Крива регулювання у програмованому режимі
Fig. 4. The curve of regulation in programmed regime



а) PT-0102 (Щ2) з ПК

б) восьмиканальний PT0102 (Щ2) з ПК

Рис. 5. Візуалізація процесу вимірювання
Fig. 5. The visualization for process of measuring



а) водостійкий корпус PT-0102



б) безкорпусний PT-0102



в) психрометр на базі PT-0102(Щ2)



г) термогігрометр на базі PT-0102 (Щ2) з ємнісним перетворювачем вологості

Рис. 6. Нестандартні виконання PT-0102
Fig. 6. Non-standard executions of PT-0102


середні (-100 ... +1200) °C та високі температури (+1200 ... +10 000) °C має своє відображення у розробленні та випуску широкого спектра приладів [2].

Фахівці ПАТ НВО «Термоприлад» розробили ряд сучасних пристроїв для вимірювання і регулювання температури та інших фізичних величин, які дозволяють успішно вирішувати проблеми автоматизації технологічних процесів у різних галузях промисловості та сільського господарства.

Регулятори-вимірювачі РТ-0102, окрім застосування в сучасних системах на багатьох об'єктах металургії, хімічної промисловості, машинобудування, сільського господарства тощо, дають можливість у багатьох випадках без великих матеріальних витрат модернізувати старі АСУ, замінивши морально застарілі та технічно відсталі пристрої на більш сучасні. Це підвищує продуктивність і надійність АСУ та мінімізує витрати на переоснащення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Термометры манометрические сигнализирующие типа ТСМ // Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЮД0.005.101.ТО (Nanometric signaling thermometers of model TCM // Technical description and instruction manual UD0.005.101.TO), С/Р. 5
2. Гук О.П. НВО «Термоприлад»: Історія, діяльність, персонал / О.П. Гук, А.І. Кіц, О.Є. Гаєвська, І.П. Паляниця,

М.М. Процевя'т, Я.А. Пастернак, О.І. Лях, Б.І. Стадник, М.Г. Віченюк // Львів: Видавництво Мс (Guk O.P. SPA «Thermoprylad»: Story, activities, personnel / O.P. Guk, A.I. Kits, O.E. Gaevskaya, I.P. Palyanytsya, M.M. Protsevyat, Ya.A. Pasternak, O.I. Lax, B.I. Stadnyk, M.G. Vichenuk // Lviv: Publishing House Mc), 2006. — С/Р. 46. 

Отримано / received: 02.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Л.А. Назаренком (Україна).

Prof. L.A. Nazarenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

Академія метрології України

Національний університет «Львівська політехніка»

ДП «Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем» («Система»)

Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології

«Technical Using of Measurement — 2016»

м. Славське, 1—5 лютого 2016 року

До участі в конференції запрошуються аспіранти та магістри технічних університетів України та Європи, а також провідні українські та закордонні науковці у сфері метрології.

Напрями роботи конференції:

- Теорія й практика вимірювань та випробувань.
- Застосування інформаційно-вимірювальних технологій у промисловості.
- Стандартизація й сертифікація в світлі Європейської інтеграції.
- Метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань.
- Кваліметрія.
- Автоматика та прилади.

Під час конференції планується проведення школи-семінару, де відбудуться виступи з доповідями провідних науковців у сфері метрології.

Робочі мови конференції:

українська, російська, англійська.

НАУКОВИЙ КОМІТЕТ

Голова: Володарський Є.Т., д.т.н., проф.,
президент Академії метрології України
Заступник голови: Микийчук М.М. д.т.н., проф.,
директор ІКТА (НУ «ЛП», Львів)

Матеріали конференції: у виді збірника тез доповідей планується опублікувати на електронному носії. Матеріали доповідей, виголошені на конференції та рекомендовані до публікації, будуть опубліковані відповідно до вимог журналу «Метрологія та прилади».

Надсилати матеріали та заявки з темою листа «TUM-2016» в електронному виді на адресу:
natalia.gots@lp.edu.ua
поштою за адресою:
м. Львів, 79016, вул. С.Бандери 12, ІКТА, кафедра МСС
для Гоц Наталії Євгенівни (відповідальний секретар)
тел.: (067) 927-08-53

Запрошення, заявки на участь в конференції та іншу інформацію можна знайти на сайті Академії метрології України: <http://amu.in.ua/developments>

УДК [551.506:519.233.5]:[621.311.25:556.55]

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ВОДИ У ВІДКРИТИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ АЕС

Н. Косач, доктор технічних наук, професор кафедри «Авіаційні прилади та вимірювання»,

Н. Бейнер, аспірант кафедри,

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків

Презентовано удосконалений алгоритм прогнозування температури циркуляційної води в контрольних точках на гідротехнічних спорудах, що беруть участь у системі оборотного водоохолодження АЕС, ґрунтуючись на методах математичної статистики. Виявлено критерії, що дозволяють визначати репрезентативність вибірки, а також уведення виправлення, що враховують попередній стан об'єкта дослідження та вітровий вплив.

The prediction of the circulating water temperature conditions at the open hydraulic structures accompanying NPP water recycling is an important task of the power unit operation. It is explained by the limitation of water temperature fed to the unit pumping facility.

This article suggests using the advanced prediction algorithm of the circulating water temperature at the check points of the

open hydraulic structures based on the methods of mathematical statistics.

To improve the prediction accuracy the criteria have been revealed determining the sample representativity, and the amendments have been introduced permitting to consider the preceding conditions of the research object as well as the wind action.

It was pointed out the mean result error to be about $\pm 0,5$ °C, and it is very essential at the seasonal behavior of the NPP power limiting.

The paper implements the algorithm developing the predictive model of the circulating water temperature based on the trendline development, which in the best advantage approximates the actual data. For this, the additional comparative analysis of different regression equations (linear, exponential, parabolic, logarithmic) is given for each sample.

Ключові слова: водопостачання АЕС, циркуляційна вода, прогноз температури води, водоймище-охолоджувач, гідротехнічні споруди.

Keywords: NPP water supply, circulating water, water temperature prediction, cooling pond, hydraulic structures.

Основне завдання гідротехнічних споруд (ГТС) під час проектування й експлуатації АЕС — забезпечення оптимальної температури охолодженої циркуляційної води для досягнення необхідного вакууму в конденсаторах турбінних установок, оскільки вони неефективні й не розраховані на тривалу роботу за температури циркуляційної води вище 33 °C [1, 2]. Звичайно навіть невелике підвищення фактичного значення температури циркуляційної води, проти розрахункового, призводить до істотного зниження коефіцієнта корисної дії АЕС [3].

У зв'язку зі зростанням вимог до ефективності експлуатації відкритих ГТС в оборотних системах водопостачання АЕС з'являється необхідність підвищення точності прогнозування температурного режиму гідроохолоджувачів у їхніх контрольних точках. Це можна досягти шляхом обліку за моделювання чинників, що раніше не брали до уваги. Так, детерміновані методи й загальноприйняті математичні моделі гідротермічних процесів, які будуються на основі рівнянь теплопереносу й механіки рідини, достатньо узагальнено описують об'єкт дослідження [4]. За оцінювання температурного режиму відкритих ГТС, зокрема, водойм-охолоджувачів і бризкальних установок різних модифікацій не враховують випадковий характер метеоумов, а також попередній стан об'єкта дослідження як динамічної системи. Тому інженерні рішення, прийняті на основі таких «миттєвих» оцінок, не можуть слугувати достатньо



Н. Косач



Н. Бейнер

© Косач Н., Бейнер Н., 2015

репрезентативним матеріалом для описання процесу розвитку температурного режиму циркуляційної води, що може призвести або до неможливості виробітку заявленої потужності, або до невиправданого недовиробітку, за наявності запасів за потужністю, й як наслідок зниження економічних показників АЕС у цілому [5].

Мета статті — удосконалення алгоритму прогнозування температури циркуляційної води в контрольних точках ГТС системи оборотного водопостачання, ґрунтуючись на методах математичної статистики кліматичних умов за тривалий період часу на прикладі температурного режиму ГТС Запорізької АЕС (ЗАЕС).

КРИТЕРІЇ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РЕПРЕЗЕНТАТИВНІСТЬ ВИБІРКИ

Використання методів математичної статистики для прогнозування температури охолодної води у контрольних точках ГТС доцільно лише за умови формування репрезентативної вибірки даних. Як основні вимоги до вихідної інформації, за дослідження динаміки процесу, висунуто такі критерії:

- зіставність даних. Одна із найважливіших умов, необхідних для правильного відображення часовим рядом реального процесу — співставність рівнів ряду. Тому температурні дані в кожній із контрольних точок порівнювалися за умови, що зіставні кліматичні умови (температура навколишнього середовища, швидкість і напрямок вітру), однакова кількість працюючих енергоблоків АЕС і кількість працюючих циркуляційних насосів, що беруть участь у системі технічного водопостачання;
- повнота інформації. Для успішного вивчення динаміки процесу важливо, щоби інформація була повною, часовий ряд мав достатню довжину. За вивчення сезонних коливань на базі місячних даних опрацьовано інформацію більше ніж за 5 років;
- відповідність інтервалів спостережень сезонним обмеженням;
- виявлення аномальних даних (викидів), аналіз їх походження та їх виключення або заміна дійсними значеннями;
- облік попереднього стану об'єкта.

Для опрацювання інформації в роботі використовували такі бази даних (БД):

- оперативних прогнозів погоди (сайт gismeteo.ua);
- архівних метеорологічних даних;
- потужностей роботи енергоблоків ЗАЕС;
- температурного режиму гідротехнічних споруд ЗАЕС.

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗУВАННЯ TEMПЕРАТУРИ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ВОДИ У КОНТРОЛЬНИХ ТОЧКАХ ГТС

У процесі вдосконалення алгоритму прийнято такий підхід до визначення його основних моментів.

Вхідні дані:

- 1.Зазначити передбачувану температуру навколишнього середовища на заявлену дату ($t_{\text{пр}}$, °C) і параметри для вітру (швидкість v , м/с і напрямок).
- 2.Зазначити потужність роботи АЕС на заявлену дату, (N , МВт). Планування диспетчерського графіка навантажень АЕС на наступну добу здійснює Державне підприємство «Енергоринок». Рішення ухвалюється, ґрунтуючись на складі працюючого основного встаткування й робочої потужності, що заявляється, відповідно до Положення [6].

- 3.Зазначити кількість працюючих циркуляційних насосів, (n , од). Розрахунок виконують на основі режимної карти роботи ГТС [7].

Формування репрезентативної вибірки:

- 1.Вибрати записи із БД, які відповідають умові: $t_{\text{пов.пр.}} \pm 2^\circ\text{C}$.
- 2.На основі даних щодо потужності роботи АЕС (N , МВт) на заявлену дату визначити кількість працюючих енергоблоків ($n_{\text{бл}} = 1 \dots 6$).
- 3.Провести уточнення вибірки за режимом роботи АЕС: відкинути всі дані, які не відповідають умові $n_{\text{бл.пр.}} = n_{\text{бл.пот.}}$, де $n_{\text{бл.пр.}}$ — необхідна кількість працюючих енергоблоків на заявлену дату (прогнозу); $n_{\text{бл.пот.}}$ — кількість працюючих енергоблоків для кожного поточного запису із БД.

- 4.Зробити уточнення вибірки за кількістю працюючих циркуляційних насосів: залишити всі значення, які відповідають умові: $n \pm 1$.

- 5.Ґрунтуючись на даті, визначити сезон року: зима, весна, літо, осінь. Зробити уточнення вибірки й привести її у формалізований інтерв'яльний ряд для подальшого аналізу.

Інформацію можна вважати репрезентативною, якщо сезон року на заявлену дату відповідає сезонному запису із БД.

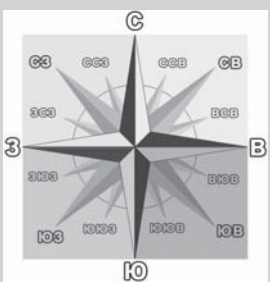
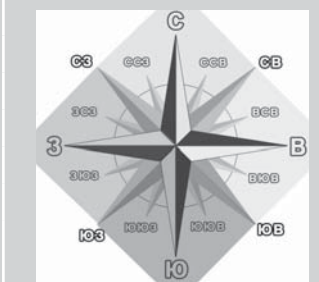
Для уточненої вибірки сформувати додаткову базу даних: три попередні записи для кожного поля з інформацією стосовно стану об'єкта. Таке уточнення дасть можливість урахувати попередній стан об'єкта в цілому й дозволить відкинути нерепрезентативну інформацію, а також «викиди».

- 6.Зробити уточнення вибірки за параметрами вітрового впливу:

* визначити групу вітрового впливу на заявлену дату, для вибіркового (поточного) і попереднього

Таблиця 1. Розподіл вітрового впливу за групами і категоріями

Table 1. Wind action distribution on groups and categories

Групи	Напрямок вітру	Категорії	Категорія I	Категорія II
I	ССЗ, З, ССВ	I		
II	ВСВ, В, ВЮВ			
III-	ЮЮВ, Ю, ЮЮЗ			
IV	ЗЮЗ, СЗ, ЗСЗ			
V	ССВ, СВ, ВСВ			
VI	ВЮВ, ЮВ, ЮЮВ	II		
VII	ЮЮЗ, ЮЗ, ЗЮЗ			
VIII	ЗСЗ, СЗ, ССЗ			

Таблиця 2. Розподіл вітрового впливу за силою вітру

Table 2. Wind action distribution on the wind force

Категорія	I	II	III	IV	V	VI
Найменування	Тихий	Легкий	Слабкий	Помірний	Свіжий	Сильний
Сила вітру, м/с	0-1,5	1,6-3,3	3,4-5,4	5,5-7,9	8-10,7	> 10,8

значень (I — VIII). Зробити уточнення для категорії, на основі аналізу попередніх даних (табл.1).

* зробити порівняння сили вітру. Визначити категорію (табл. 2). Зіставити силу вітру на заявлену дату з попередніми даними за 3 дні. Виявити тенденцію. Відкинути явні «викиди».

7. Для кожного окремого ряду (вибірки) побудувати такі рівняння регресії: лінійне, експонентне, параболічне й логарифмічне. Провести аналіз і вибрати краще з них.

Для оцінювання якості моделі потрібно використовувати коефіцієнт детермінації. Чим він ближчий до 1, тим тісніший зв'язок результувальної ознаки Y (температури води) з досліджуваними чинни-

ками X (температури повітря). Вибрати найбільш оптимальне й точне рівняння регресії для кожної конкретної вибірки окремо.

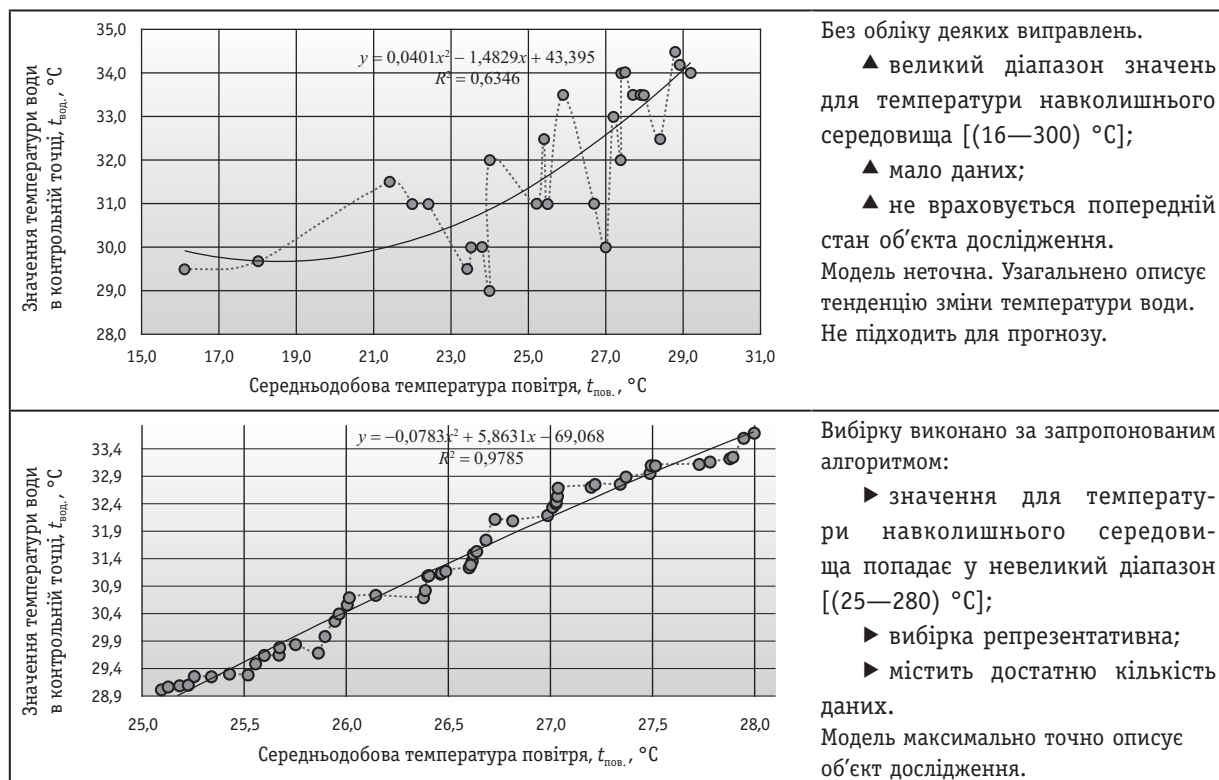
Як приклад розглянуто контрольну точку каналу, що підводить, у районі насосної станції (НС) №42: сезон — літо, вітер відповідає V-ій групі ССВ, СВ, ВСВ (табл. 1), II-ій категорії (середня швидкість (2—3) м/с).

Реалізовано алгоритм побудови прогнозової моделі температури циркуляційної води на основі побудови лінії тренду, яка щонайкраще апроксимує фактичні дані. Для цього обрано регресійний аналіз, що дозволяє скоротити помилку прогнозової моделі. Порівняльний аналіз рівнянь регресії наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Порівняння показників для різних видів рівнянь регресії

Table 3. Parameter comparison for different types of regression equations

Показники	Лінійна регресія	Параболічна регресія	Експонентна регресія	Логарифмічна регресія
Коефіцієнт кореляції	0,7369	0,7966	0,7370	0,7069
Коефіцієнт детермінації	0,543	0,6345	0,5431	0,4997
Рівняння регресії	$y = 0.396x + 21.908$	$y = 0.040x^2 - 1.483x + 43.395$	$y = 23.264e^{0.0125x}$	$y = 8.702 \ln x + 3.901$
Надійність рівняння регресії	значима	значима	значима	значима
Надійність коефіцієнтів	0,3963 (незначима);	-1,4829 (значима); 0,04 (значима);	0,0124 (незначима);	8,7023 (значима);
Помилка апроксимації	1.83	1.35	0	1.82
Коефіцієнт еластичності	0	-1.32	0	0



Графічний приклад регресійного аналізу

Graphic example of the regression analysis

Потрібно зазначити, що використовувати регресійний аналіз для прогнозування температури циркуляційної води у конкретній контрольній точці можна лише за умови виконання всіх пунктів описаного вище алгоритму. Якщо не уточнювати вихідну вибірку даних, то неможливо здійснити прогноз необхідної точності за цим методом. Як приклад розглянуто дві вибірки для однієї й тієї ж контрольної точки й вхідних параметрах (рисунок).

Усе викладене вище свідчить, що принципово важливо виконувати уточнення вибірки за кожним із критеріїв. Отримане у такий спосіб рівняння регресії благополучно проходить перевірку на значимість і може використовуватися для визначення легітимного прогнозного значення за рахунок максимально уточненої моделі. Однак, ураховуючи, що за такого прогнозу ймовірність попадання в будь-яку точку прямує до нуля, фактичне значення досліджуваного показника Y за значення незалежного показника $X = X_0$ ніколи в точності не збіжиться із точковим прогнозом \hat{Y}_0 , а перебуватиме в деякому інтервалі, який містить \hat{Y}_0 (тут X_0 — прогнозне значення середньодобової температури навколишнього середовища). Тому на практиці важливий саме інтервальний прогноз.

При цьому обов'язково потрібно визначити довірчий інтервал для прогнозу, тобто розрахувати границі інтервалу, в якому зосереджуватиметься 95 %

можливих значень Y за необмежено великою кількістю спостережень і $X = X_0$ [8]:

$$\left[\hat{Y}_0 - t_v s_{\hat{Y}}, \hat{Y}_0 + t_v s_{\hat{Y}} \right], \quad (1)$$

де \hat{Y}_0 — прогнозне значення температури води у контрольній точці; t_v — табличне значення t — критерію Стюдента для степеня свободи $(n-2)$ й рівня значимості $\nu = 5\%$ [9]; $s_{\hat{Y}}$ — оцінка дисперсії прогнозу, яка визначається за формулою [8]:

$$s_{\hat{Y}}^2 = s^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right), \quad (2)$$

де n — кількість елементів у вибірці; \bar{X} — середнє значення середньодобової температури повітря для цієї вибірки; s^2 — оцінка дисперсії помилок регресії.

Для визначення границь довірчого інтервалу для індивідуальних значень залежної змінної необхідно обчислити оцінку сумарної дисперсії [10]:

$$s_p^2 = s_{\hat{Y}}^2 + s^2 = s^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} + 1 \right). \quad (3)$$

При цьому границі для довірчого інтервалу прогнозу індивідуальних значень для температури циркуляційної води Y визначають у такий спосіб:

$$\left[\hat{Y}_0 - t_v s_p, \hat{Y}_0 + t_v s_p \right]. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як показали результати виконаних досліджень, удосконалений алгоритм дозволяє здійснювати прогноз

температури циркуляційної води у контрольованих точках відкритих ГТС. При цьому середня похибка результату перебуває у границях $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Такий прогноз украй актуальний за сезонних режимів обмеження потужності. Попередні розрахунки показали, що, якщо прогнозне значення температури циркуляційної води $t_{\text{вод.пр.}}$ визначатиметься з похибкою $\pm 0,5^\circ\text{C}$, то це дозволить збільшити номінальну потужність одного енергоблока на 0,3%. За перерахування у грошовий еквівалент сума складе близько 690 грн/год (розрахунки проведено для відпускної вартості електроенергії АЕС, рівної 0,23 грн/кВт). Для п'яти блоків за добу це складатиме 82800 грн. (передбачається, що на одному блоці проводяться регламентні роботи).

ВИСНОВКИ

Розроблений алгоритм прогнозування температури циркуляційної води в ГТС АЕС на основі статистичного опрацювання довгочасних даних стосовно кліматичних умов у районі АЕС із урахуванням


усіх виправлень і уточнень дозволяє добитися необхідної точності її визначення — прогнозні значення температури циркуляційної води не виходитимуть за межі $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Використовуючи запропонований алгоритм можна адаптувати удосконалену систему прогнозу температурного режиму циркуляційної води у контрольованих точках для подібних об'єктів атомної енергетики із уведенням деяких виправлень. При цьому немає необхідності прораховувати кожного разу гідротермічний режим для всієї водойми або складної системи відкритих ГТС.

Запропонований метод відрізняється істотною простотою й високою точністю на відміну від наявних громіздких математичних моделей, які на практиці складні в реалізації.

Природно, ефективність запропонованого алгоритму суттєво підвищиться за рахунок упровадження автоматизованої комп'ютеризованої системи моніторингу гідротермічних параметрів, яка дозволить фіксувати параметри з достатньою точністю й надійністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Богославчик П.М. Гидротехнические сооружения ТЭС и АЭС/ П.М. Богославчик, Г. М. Круглов — Минск: Высшая школа (Bogoslavchik, P.M., Kruglov, G.G. Hydraulic Structures of TPP and NPP. The Highest School, Minsk), 2010. — 270 с/р.
2. Зорин В.М. Атомные электростанции. Основной технологический процесс / В.М. Зорин — М.: Издательский дом МЭИ (Zorin, V.M. Nuclear Power Plants. Primary process. Izdatel'skiy dom MEI, M.), 2010 — 184 с/р.
3. Стерман Л.С. Тепловые и атомные электрические станции / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ (Serman, L.S., Lavygin, V.M., Tishin, V.M. Thermal and Nuclear Power Plants. 4nd Edition. Izdatel'skiy dom MEI, M.), 2008. — 464 с/р.
4. Макарова И.И. Моделирование гидротермических процессов водоемов-охладителей ТЭС и АЭС / И.И. Макарова, А.С. Соколов, В.С. Шульман. — М.: Энергоатомиздат (Makarov, I.I., Sokolov, A.S., Shul'man, V.S. Hydrothermal Process Simulation of Cooling Ponds at TPP and NPP. Energoatomizdat, M.), 1986. — 174 с/р.
5. Саяпин П.Г. Указания по нормированию показателей работы гидроохладителей в энергетике / П.Г. Саяпин, Е.И. Яковенко — Волгоград: Южтехэнерго (Sayapin, P.G., Yakovenko, E.I. Regulations on Performance Factor Normalization of Hydrocoolers in Power Engineering. Yuzhtekhenergo, Volgograd), 1980. — 37 с/р.
6. Положение об оперативно-технологическом взаимодействии между Днепровской электроэнергетической системой ГП НЭК «Укрэнерго» и ОП «Запорожская АЭС» НАЭК «Энергоатом» во время их взаимодействия в условиях параллельной работы в составе ОЭС Украины 00.ГД.ПЛ.03.Б — Энергодар: ОП ЗАЭС (Provision of Operational and Technological Relations between the Dnieper Electricity System of «Ukrenerg» and «Zaporizhzhya NPP» NAEC «Energoatom» during their Interaction in a Parallel Operation in the IPS of Ukraine. 00.GD. PL.03.B — Enerhodar: Zaporizhzhya NPP), 2012. — 46 с/р.
7. Инструкция для эксплуатации линейных гидротехнических сооружений 00.гц.вс.из.10-12 — Энергодар: ОП ЗАЭС (Linear Hydraulic Structures Operating Instructions. 00.gts.vc.ie.10-12, Enerhodar: Zaporizhzhya NPS), 2012. — 22 с/р.
8. Kahane L.H. Regression Basics 2nd Edition. / Leo H. Kahane. — Los Angeles: SAGE Publications, 2008 — 934 p.
9. Rawlings J.O. Applied regression analysis: a research tool. — 2nd ed. / John O. Rawlings, Sastry G. Pentula, David A. Dickey. — USA: Springer texts in statistics, 1998 — 658 p.
10. Lewis-Beck C. Applied Regression An Introduction. — 2nd ed. / Colin Lewis-Beck, Michael Lewis-Beck — London: SAGE Publications, 2015 — 120 p. 

Отримано / received: 07.10.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., В.Б. Большаковим (Україна).
D.Sc. (Tech.) V.B. Bolshakov, Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 621.396.96

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СИСТЕМИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

О. Костира, доктор технічних наук, доцент кафедри основ радіотехніки,

В. Лівнов, аспірант кафедри,

Харківський національний університет радіоелектроніки

Отримано узагальнену модель ультразвукової (УЗ) системи локального позиціонування. Розроблено математичний вираз, що дозволяє оцінити максимальну відстань між УЗ випромінювачами у відкритому просторі. Розроблено структурну схему, а також алгоритм роботи системи. Отримано практичні дані стосовно залежності амплітуди сигналу на УЗ приймачі від його відстані до випромінювача.

The generalized model of the ultrasonic local positioning system ULPS is obtained. The model allows estimating the error in determining the coordinates caused by noise in the audio channel. The mathematical expression that enables to estimate the maximum distance between the ultrasonic transducers in open space is developed. Block diagram and algorithm of the system are developed. The dependence of the amplitude of ultrasonic signal at the receiver from its distance from the emitter is calculated.

Ключові слова: ультразвукова система, характеристики, визначення координат, точність.

Keywords: ultrasonic system, characteristics, determination of coordinates, accuracy.

Ультразвукову систему локального позиціонування (УСЛП) можна застосовувати для високоточного визначення координат рухомих об'єктів у тих місцях, де зв'язок із супутниковими навігаційними системами недоступний або вони не забезпечують необхідної точності. УСЛП забезпечує сантиметровий рівень точності місцевизначення за низької її собівартості порівняно з вартістю GPS приймачів такого класу точності, вищою на порядки. УСЛП можна з успіхом застосовувати у роботизованих складських приміщеннях, забезпечувати контроль місцеперебування співробітників у шахтних комплексах, на закритих полігонах, а також просторову орієнтацію людей з обмеженим зором у виробничих і громадських будинках тощо [1].

Описання УСЛП наведено у [2, 3]. У [3] також проведено моделювання УСЛП у системі автоматизованого проектування Mathcad з метою визначення величин основних похибок системи.

У цій статті описано обладнання й принцип функціонування макета УСЛП, а також подано результати вимірювань основних характеристик системи.

УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ УСЛП

Узагальнену модель УСЛП подано на рис. 1. До її складу належать такі модулі: моделі сигналу й шуму; модель багатопроменевості зонд-сигналу; моделювання затримки сигналу у звуковому каналі. З використанням зазначених модулів реалізовано алгоритм визначення координат об'єктів, оцінюються похибки місцевизначення й виконується візуалізація отриманих результатів.

Від узагальненої моделі переходимо до функціональної моделі системи, яка складається з таких функціональних модулів: УЗ випромінювача, звукового каналу, УЗ приймача, попереднього підсилювача, детектора сигналу й граничного обладнання, що визначає часове



А. Костира



В. Лівнов

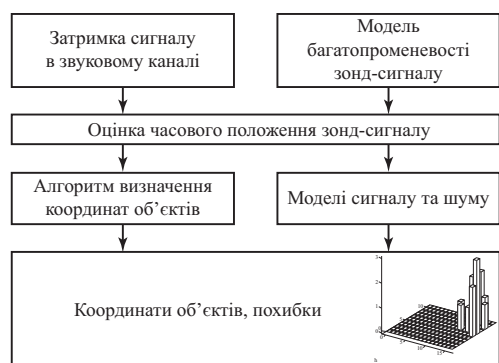


Рис. 1. Узагальнена модель УСЛП

Fig. 1. The generalized model ULPS

положення УЗ сигналу. У моделі цим модулям відповідають такі блоки: генератор зонд-сигналу (УЗ випромінювач), генератор шуму (звуковий канал і внутрішні шуми обладнання), суматор (звуковий канал, УЗ приймач), вузькосмуговий фільтр (УЗ приймач), обмежувач амплітуди (попередній підсилювач УЗ мітки), фіксатор рівня (аналогічний модуль) і граничне обладнання (компаратор УЗ мітки).

УЗ зонд-сигнал, випромінюваний УЗ випромінювачами, формується відповідно до виразу:

$$u_0(t) = A \cdot \cos(2\pi f t) \cdot \left[\eta\left(t + \frac{\tau}{2}\right) - \eta\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right], \quad (1)$$

де A , f , τ — амплітуда, частота, тривалість сигналу відповідно; η — функція Хевісайда.

В УСЛП застосовують УЗ сигнал з несучою частотою 40 кГц і тривалістю 1 мс, відтак, у межах тривалості сигналу укладається 40 періодів частоти; отже, тривалість становить: $\tau = 40 / f$.

У звуковому каналі до корисного УЗ сигналу додається шум $h_{ch}(t)$, а також суміш відбитих від стін і перешкод сигналів $m(t)$, так званий ефект багатоприменовості, після приймання зонд-сигналу до нього додаються внутрішні шуми обладнання $h_{in}(t)$.

Отже результувальний сигнал — це суміш корисного сигналу й шумів:

$$s(t) = u(t) + h_{ch}(t) + m(t) + h_{in}(t). \quad (2)$$

В УСЛП застосовують вузькосмугові УЗ приймачі, що мають резонанс на частоті 40 кГц. Для виконання моделювання смугового фільтра, що має характеристику, аналогічну УЗ приймачу, сигнали й шум перетворюють в частотну область із використанням перетворення Фур'є [4]:

$$s_w(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-2\pi f i t} dt. \quad (3)$$

Частотну характеристику смугового фільтра представимо у виді:

$$k_w(f) = e^{-b \cdot (f - fs)^2}, \quad (4)$$

де $fs = 40$ кГц — центральна частота смуги пропускання фільтра; b — її ширина (щодо несучої частоти).

Спектр сигналу на виході фільтра визначають як:

$$s_{w1}(f) = s_w(f) \cdot k_w(f). \quad (5)$$

За допомогою зворотного перетворення Фур'є визначають сигнал на виході фільтра у часовій області:

$$s_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{w1}(f) \cdot e^{-2\pi f i t} df. \quad (6)$$

Внаслідок того, що підсилювач УЗ мітки має обмежений динамічний діапазон, установлюють обмеження амплітуди сигналу на рівні 0,5 В:

$$s_2(t) = s_1(t) - (s_1(t) - lm) \cdot \eta(s_1(t) - lm). \quad (7)$$

Аби підняти крутизну фронту прийнятого сигналу й збільшити розмах останнього, застосовують фіксатор рівня. Останній зміщує постійну складову сигналу у такий спосіб, що нижні піки імпульсів на його виході перебувають на нульовому рівні. Щоби промодельовати роботу фіксатора, визначимо сигнал на ємності, коли на вході присутній зонд-сигнал

$$sc(t) = s_2(t) \cdot [1 - ds_2(t)] + [sc(t - \tau) + udc] \cdot ds_2(t). \quad (8)$$

У цьому виразі:

$sc(t - \tau)$ — сигнал на ємності у момент часу, що відстає від поточного на величину τ ;

udc — величина напруги, на яку розряджається ємність у схемі фіксатора за час τ ;

$ds_2(t) = \eta[s_2(t) - sc(t - \tau)]$ — функція, що визначає динаміку вхідного сигналу в момент часу t (0 — падіння, 1 — зростання).

Зонд-сигнал на виході фіксатора:

$$s_3(t) = s_2(t) - sc(t). \quad (9)$$

Наступний модельований вузол системи — граничне обладнання. Оскільки розмах корисного сигналу на виході фіксатора рівня становить 1 В, поріг виявлення фронту сигналу встановлюється на рівні 0.5 В: $A_{por} = 0.5$. Сигнал на виході граничного обладнання приймає значення 1, якщо поріг перевищено, і 0 — якщо ні:

$$s_4(t) = \eta[s_3(t) - A_{por}]. \quad (10)$$

Похідна сигналу на виході граничного обладнання:

$$\sigma_{s_4}(t) = \frac{ds_4(t)}{dt}. \quad (11)$$

Фізичний зміст цієї похідної — функція Дірака, що має стрибок у момент часу, коли сигнал $s_3(t)$ дорівнює порогу виявлення. Використовуючи фільтрувальну властивість дельта-функції, визначають часове положення прийнятого зонд-сигналу:

$$ts = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot \delta_{s_4}(t) dt. \quad (12)$$

Для визначення абсолютної похибки оцінки часового положення зонд-сигналу використовуємо вираз:

$$\Delta t = \frac{\sum_{i=1}^n |ts_i - \bar{t}|}{n}, \quad (13)$$

де n — кількість вимірювань; ts_i — часове положення сигналу за i -ї шумової реалізації; \bar{t} — середнє значення n -ї кількості вимірювань.

Систематичні похибки розраховують за формулою:

$$\Delta t_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^n (ts_i - \bar{t})}{n}. \quad (14)$$

Оскільки значення затримки зонд-сигналу у звуковому каналі для такої моделі дорівнює 0, дійсне значення часового положення $tr = 0$.

У результаті проведеного моделювання роботи системи в пакеті Mathcad отримані значення похибок становлять:

* абсолютна похибка оцінки часового положення сигналу $\Delta t = 22,75$ мкс;

* систематична похибка — $\Delta t_{\text{sys}} = 385,38$ мкс.

СКЛАД ТА ПРИНЦИП ФУНКЦІОНУВАННЯ УСЛП

Спрощену структурну схему системи, у складі якої всього два УЗ випромінювача, наведено на рис. 2. УСЛП складається з таких блоків:

- базової станції (2). Це центральна сполучна ланка в системі. Вона призначена для формування імпульсів, які подаються на УЗ випромінювачі (3) і перетворюються ними на звук (на зонд-сигнали), який поширюється в області позиціонування (5). Також вона забезпечує опитування міток (4) за радіоканалом й передавання отриманих даних до персонального комп'ютера (ПК (1)).

- УЗ міток (4). Це мікропроцесорні пристрої, що мають у своєму складі УЗ приймачі. Їх установлюють на об'єкті позиціонування. Вони забезпечують приймання УЗ датчиками зонд-сигналів, їх опрацювання й обмін інформацією з базовою станцією за радіоканалом. Також вони повідомляють користувачеві стосовно наближення до ключових об'єктів (К0) за допомогою мініатюрного навушника, що входить до їхнього складу.

- персонального комп'ютера (1). Програмне забезпечення для ПК аналізує отримані дані, розраховує координати міток, виводить результати на екран у графічному й числовому видах, а також повідомляє міткам стосовно наближення їх до К0.

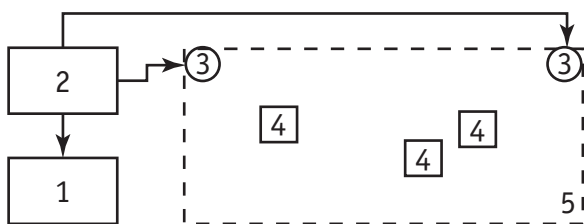


Рис. 2. Структурна схема УСЛП

Fig. 2. Block diagram of ULPS

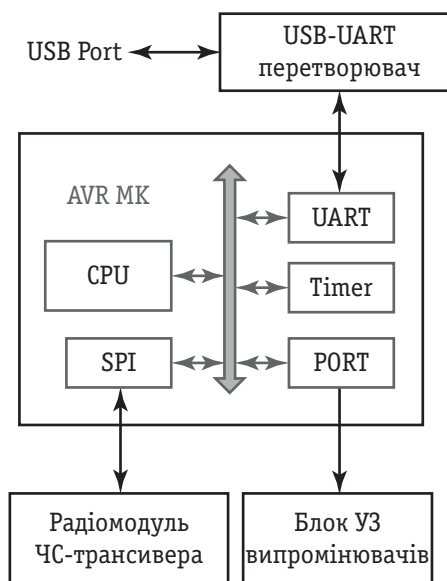


Рис. 3. Структурна схема базової станції

Fig. 3. Block diagram of base station

Зупинимось докладніше на будові базової станції й УЗ мітки.

БАЗОВА СТАНЦІЯ

Структурну схему модуля представлено на рис. 3. «Серце» базової станції — мікроконтролер (МК) з AVR архітектурою. Для забезпечення радіозв'язку з мітками використовують радіомодуль ЧМ-трансивера. Обмін інформацією й керування радіомодулем із МК здійснюють за допомогою інтерфейсу SPI.

Блок УЗ випромінювачів, призначений для формування зонд-сигналів, складається з електронних ключів, підвищувальних трансформаторів і двох випромінювачів. Блок управляється з паралельного порту введення/виведення МК.

Для передавання даних на ПК застосовують універсальний асинхронний приймач-передавач UART, інформація з якого надходить на UART-USB перетворювач, який передає її до ПК за USB-портом.

Для роботи системи необхідне формування й вимірювання відрізків часу. Це здійснюють за допомогою таймера-лічильника, що входить до складу архітектури МК.

УЛЬТРАЗВУКОВА МІТКА

На рис. 4 зображено структурну схему мітки. Вона також управляється МК із AVR архітектурою. Для радіозв'язку застосовують радіомодуль такого ж типу, що й у базовій станції.

УЗ приймач необхідний для приймання зонд-сигналів і перетворення їх на електричні імпульси.

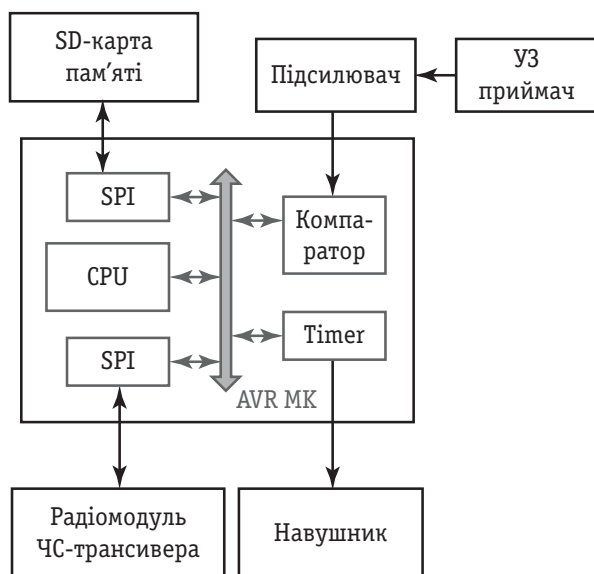


Рис. 4. Структурна схема УЗ мітки

Fig. 4. Block diagram of US mark

Далі ці імпульси надходять на вхід підсилювача, який доводить їхню амплітуду до рівня порядку декількох вольт. Посилені імпульси подаються на вхід компаратора, що входить до складу МК, який фіксує передній фронт прийнятих зонд-сигналів.

Також до складу мітки входить SD-карта пам'яті, на якій зберігають мовні повідомлення стосовно КО. Робота з картою відбувається за інтерфейсом SPI. Навушник підключається до ШИМ-виходу внутрішнього таймера.

Для визначення часу затримки зонд-сигналу й формування часових інтервалів також застосовують внутрішній таймер МК.

АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ

Алгоритм роботи УСЛП наведено на рис. 5.

Алгоритм забезпечує почергову роботу кожного з УЗ випромінювачів. При цьому паралельно в часі протікає два процеси — один у радіоканалі, а другий — в УЗ каналі.

Спочатку базова станція синхронізує всі УЗ мітки з моментом випромінювання зонд-сигналу шляхом відправлення за радіоканалом відповідного пакету даних. В УСЛП використовують три види пакетів: синхронізації міток (ПСМ), адресації міток (ПAM) і відповіді мітки (ПBM). Кожний пакет складається із двох частин: байтів синхронізації й байтів даних. Для ПСМ і ПBM байти синхронізації дорівнюють нулю, а для ПAM — відповідають порядковому номеру мітки. Одночасно з відправленням ПСМ базова станція формує зонд-сигнал, який перетворюється першим випромінювачем на ультразвук. З моменту відправлення ПСМ запускаються лі-

чильники часу затримки на всіх УЗ мітках і очікується приймання затриманого зонд-сигналу. У момент приймання першого імпульсу зонд-сигналу лічильник мітки зупиняється й фіксується час затримки. До приходу наступного ПСМ приймання зонд-сигналів блокується для того, щоб УЗ імпульси, відбиті від стін й інших об'єктів, не впливали на роботу системи. Паралельно із прийманням зонд-сигналів відбувається опитування міток за радіоканалом. Базова станція відправляє ПAM з адресою опитуваної УЗ мітки, у відповідь мітка пересилає ПBM із даними, що містять зафіксований час затримки зонд-сигналу.

На цьому перший етап завершується і починається другий етап, який відрізняється від першого тим, що у процесі його праці працює другий УЗ випромінювач. Наприкінці другого етапу відбувається відправлення базовою станцією часу затримки, отриманого від усіх міток, до ПК. Після цього відбувається перехід до першого етапу, і робочий цикл замикається. Для розширення зони дії системи може застосовуватися більша кількість випромінювачів, кратна двом (4, 6 і т.д.), відстань між якими визначається розміром зони упевненого приймання УЗ сигналу приймальним пристроєм мітки. У цьому випадку відправлення даних відбувається після роботи кожної пари УЗ випромінювачів.

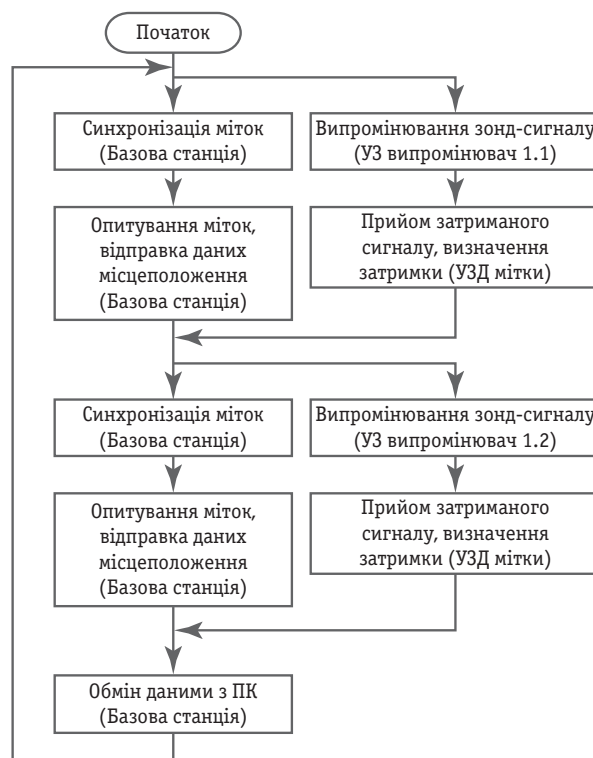


Рис. 5. Алгоритм роботи УСЛП

Fig. 5. The algorithm for work of ULSP

У ПАМ також утримуються два байти даних, які використовуються для передавання міткам інформації стосовно наближення їх до КО. Якщо мітка перебуває на відстані, що перевищує критичну відстань до КО, базова станція передає ПАМ з нульовими байтами даних. У тому випадку, якщо фіксується наближення мітки на критичну відстань до КО або ближче, у першому байті даних ПАМ передається номер найближчого КО, а в другому — відстань від нього до мітки. Критична відстань задається користувачем у додатку для ПК.

Якщо УЗ мітка приймає ПАМ із полем даних, відмінних від нуля, вона відтворює мовне повідомлення з номером найближчого КО й відстанню до нього.

ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ВІДСТАНІ МІЖ УЗ ВИПРОМІНЮВАЧАМИ

З урахуванням того факту, що ультразвук має більшу величину загасання у повітрі й передати його на більші відстані неможливо (на відміну від ЕМ хвиль), то й обмеження на дальність дії системи накладає саме звуковий канал. Як відзначалося вище, для збільшення дальності дії до системи додають додаткові випромінювачі, тому визначимо максимальну відстань між парою сусідніх випромінювачів або максимальну дальність поширення ультразвуку від УЗ випромінювача до УЗ мітки, на якій ще відбувається упевнена реєстрація зонд-сигналу УЗ міткою.

Як УЗ випромінювачі в УСЛП застосовують п'єзокерамічні приймачі-випромінювачі MAXSONAR-UT. У документації на них зазначено рівень звукового тиску (РЗТ) 117 дБ за амплітуди вхідного сигналу 30 В (яку забезпечує базова станція). Як відомо, РЗТ визначається на відстані 1 м від випромінювача [4].

Як УЗ приймачі мітки застосовують п'єзокерамічні сенсори TR4010R1, які мають чутливість -70 дБ. При цьому в документації за рівень 0 дБ прийнято значення 10 В/Па.

РЗТ на відстані R від УЗ випромінювача визначається з виразу [5, 6]:

$$SPL_R = SPL_{R0} - 20 \lg \frac{R}{R0} - \alpha \cdot R - ATT \text{ (дБ)}, \quad (15)$$

де SPL_{R0} — РЗТ на опорній відстані $R0 = 1$ м від УЗ випромінювача ($SPL_{R0} = 117$ дБ); α — коефіцієнт загасання звуку.

Явище розсіювання УЗ відбувається через різку зміну властивостей середовища (його щільності й модулів пружності) на границі неоднорідностей, розміри яких порівняні з довжиною хвилі. У повітрі, наприклад, це можуть бути рідинні краплі. Явище поглинання УЗ може бути зумовлене різними механізмами, такими як в'язкість і теплопровідність се-

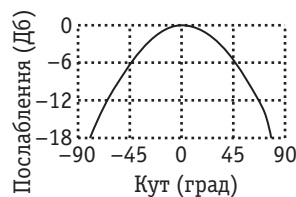


Рис. 6. ДН УЗ випромінювача й приймача

Fig. 6. The diagram of directivity for US radiator and detector

редовища, взаємодія хвилі з різними молекулярними процесами речовини тощо. Визначити значення коефіцієнта α для частоти f можна за допомогою виразу:

$$\alpha = f \cdot 66 \cdot 10^{-6} - 1,8 \text{ (дБ/м)}. \quad (16)$$

Для частоти $f = 40$ кГц отримуємо $\alpha = 0,84$ дБ/м.

Коефіцієнт АТТ визначає величину ослаблення РЗТ сигналу, зумовлену відхиленням траєкторії поширення зонд-сигналу від центральної осі діаграми направленості (ДН) УЗ приймача. Останню зображено на рис. 6 [5].

Розрахунки проведено для 2-х крайніх випадків:

1) зонд-сигнал поширюється через центральну вісь ДН УЗ приймача, $ATT = 0$ дБ;

2) зонд-сигнал поширюється під кутом 90° до центральної осі ДН УЗ приймача, $ATT = 18$ дБ.

Визначаємо амплітуду електричного сигналу на виході приймача.

$$U = p \cdot 10^{\frac{SEN}{20} + 1} = U = 2 \cdot 10^{\frac{SPL_{R0} - 20 \lg R - \alpha \cdot R - ATT + SEN - 80}{20}} \quad (B), \quad (17)$$

де $p = 2 \cdot 10^{\frac{SPL}{20} - 5}$ (Па) — поріг чутливості синусоїдальної звукової хвилі частотою 1 кГц;

$$SEN = 20 \lg \frac{M}{M_0} \text{ (дБ)}; SEN = -70 \text{ дБ} — \text{чутливість}$$

УЗ приймача в децибельній відносній шкалі;

$$M_0 = 10 \text{ В/Па} — \text{опорний рівень};$$

$$M = U/p \text{ (В/Па)} — \text{чутливість УЗ приймача [8]}.$$

Рівняння (17) розв'язано графічним методом для 2-х величин ослаблення: $ATT_1 = 0$ дБ і $ATT_2 = 18$ дБ (на рис. 7 верхній і нижній графіки відповідно) за граничного значення $U = 200$ мкВ.

Як впливає із графіка, для ослаблення $ATT_1 = 0$ дБ максимальна дальність дії становить $R_1 = 23,7$ м, для ослаблення $ATT_2 = 18$ дБ — $R_2 = 10,6$ м.

ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСЛП

Основна характеристика УСЛП, що визначає її склад і конфігурацію, — дальність дії УЗ каналу. Вимірювання залежності амплітуди сигналу на виході УЗ приймача від відстані до УЗ випромінювача проводили у приміщенні зі звуковбирним покриттям

для 2-х різних випадків, які відповідають різному куту поширення зонд-сигналу щодо центральної осі ДН приймача, із кроком 1 м. Результати вимірювань представлені у виді графіків на рис. 8.

Із рис. 8 випливає, що за граничного рівня 200 мкВ (пунктирна лінія) вимірюване значення дальності дії $R_1 = 24$ м і $R_2 = 11$ м для рівнів ослаблення $ATT_1 = 0$ дБ і $ATT_2 = 18$ дБ відповідно.

Наступна важлива характеристика УСЛП — похибка зчитування координат міток. Для визначення цієї характеристики встановимо тестову УЗ мітку нерухомо в області позиціонування на координатах $x = 5$ м, $y = 5$ м, база УЗ випромінювачів $b = 10$ м, відступ першого випромінювача від краю області позиціонування $d_1 = 0$ м. Похибка визначається за результатами 20 вимірювань координат тестової мітки. Діаграму отриманих даних наведено на рис. 9. За осями x і y на цьому графіку відкладено зсуви отриманих координат щодо дійсних, а за віссю z — кількість повторень координати в певній точці.

Абсолютні похибки зчитування координат x і y визначимо за допомогою виразу:

$$\Delta A = t_{j, n-1} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}}{\sqrt{n}}, \quad (18)$$

де ΔA — похибка вимірювання координати x або y ; $n = 20$ — кількість вимірювань; A_i — i -е вимірювання координати; \bar{A} — середнє значення ряду вимірювань; $t_{j, n-1}$ — коефіцієнт Стюдента, для 20-ти вимірювань його значення становить 2,1.

Провівши вимірювання, отримуємо такі значення абсолютних похибок:

$$\Delta A_x = \pm 0,085 \text{ см}; \Delta A_y = \pm 0,143 \text{ см}.$$

Систематичні похибки розраховують із використанням виразу (14).

де A — дійсне значення координати.

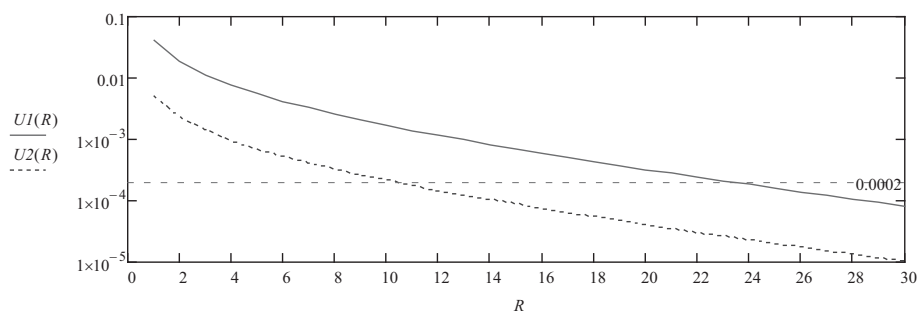


Рис. 7. Залежності амплітуди на УЗ приймачі від його відстані до УЗ випромінювача (теоретичні дані)

Fig. 7. The dependences of amplitude on US detector from his distance to radiator (theoretical data)

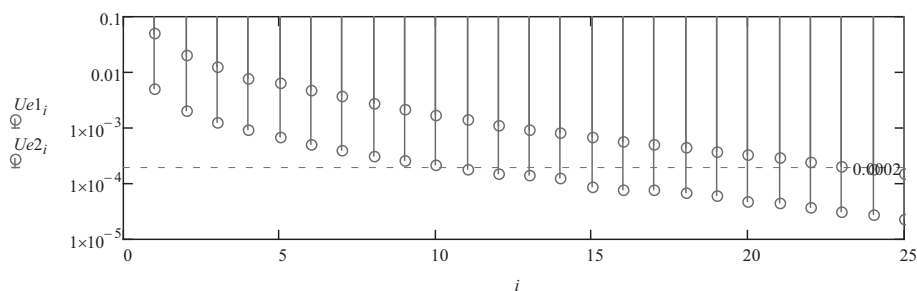


Рис. 8. Залежності амплітуди на УЗ приймачі від його відстані до УЗ випромінювача (експериментальні дані)

Fig. 8. The dependences of amplitude on US detector from his distance to radiator (experimental data)

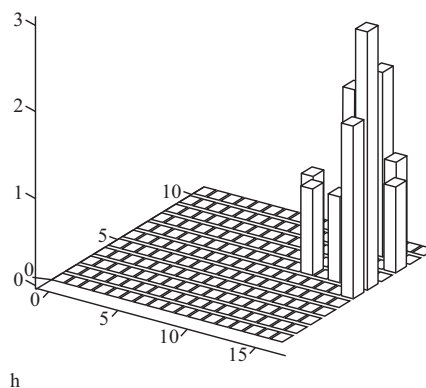


Рис. 9. Діаграма отриманих координат мітки
Fig. 9. The diagram for obtained coordinates of mark

Після підстановки результатів вимірювання, отримуємо:

$$\Delta R_x = 1,42 \text{ см}; \Delta R_y = 2,41 \text{ см}.$$

ВИСНОВКИ


Розроблено узагальнену модель ультразвукової системи локального позиціонування, яка дозволяє врахувати основні види похибок її роботи.

Отримано математичний вираз, що дозволяє оцінити дальність дії розробленої ультразвукової системи у відкритому просторі.

Розроблено структурну схему, а також алгоритм роботи УСЛП, проведено лабораторні дослідження системи, які показали високий ступінь відповідності експериментальних даних результатам, отриманим розрахунковим шляхом.

Надалі планується дослідження впливу багатопроменевості поширення УЗ сигналу на похибки місцевизначення локальної системи позиціонування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Candy BrainPort allows thttplndtoseethetongue [electronicresource]/©2001-2012MEMBRANA-Access:\ WWW/URL: <http://www.membrana.ru/particle/1131>)
2. Пат. 71860 Україна, МПК (2012.01) G01S 11/00. Спосіб ультразвукового локального позиціонування рухомих об'єктів / Лівнов В.О., Коваль Ю.О., заявник та власник Харківський нац. університет радіоелектр. — № u2012 01318, подано 08.02.2012, опубл. 25.05.2012 бюл. № 14. (Pat. 71860 Ukraine, IPC (2012.01) G01S 11/00. The method of ultrasonic local positioning moving objects / V.A. Livnov, Y.A. Koval, the applicant and the owner Kharkov National University of Radioelectronics. — № u2012 01318, filed 08.02.2012, publ. 25.05.2012 bul. № 14.)
3. Костыря А.А., Ливнов, В.А. Математическое моделирование работы ультразвуковой высокоточной системы локального позиционирования / А.А. Костыря, В.А. Ливнов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. (Kostyrya A.A., Livnov V.A. Mathematical modeling of ultrasonic precision local positioning system / A.A. Kostyrya, V.A. Livnov // Radiotekhnika: Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection) 2014. Вып./Vol. 177, с/р. 28—36.
4. Ширман Я.Д. Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Ширман Я.Д. Манжос В.Н. // М.: Радио и связь, (Shearman Ya.D. Manzhos V.N. The theory and technology of processing radar information on the background noise / Shearman Ya.D. Manzhos V.N. // М.: Radio and Communications) 1981. — 416 с/р.
5. Ультразвуковые датчики. Особенности применения и выбора. [Электронный ресурс] / © 2005—2015 ООО Глававтоматика — Режим доступа (Ultrasonic sensors. Features of application and selection. [Electronic resource] / © 2005-2015 LLC Glavavtomatika — Accessmode): \WWW/URL: http://www.mega-sensor.ru/articles/2011/01/12/articles_3.html
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И.П. Голямина. — М.: «Советская энциклопедия» (Ultrasound. Little encyclopedia / chapter. Ed. IP Golyamina. — М.: «Soviet Encyclopedia»), 1979. — 257 с/р.
7. Звуковое давление. [Электронный ресурс] / — Режим доступа (Sound pressure. [Electronic resource] / ©2003—2015 Wikipedia® — Access): \WWW/ URL https://ru.wikipedia.org/wiki/Звуковое_давление.
8. Микрофон. [Электронный ресурс] / — Режим доступа (Microphone [Electronic resource] / © 2003—2015 Wikipedia® — Access): \WWW/URL <https://ru.wikipedia.org/wiki/Микрофон>. 

Отримано / received: 17.09.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.І. Сухаревським (Україна).
Prof. O.I. Suharevsky, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 006.91:21.03.519.95

MODELING AND EVALUATION OF THE AGING AND DEGRADATION PROCESS OF SEALED ENCLOSURE SYSTEM OF NUCLEAR POWER PLANT

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТАРІННЯ І ДЕГРАДАЦІЇ ГЕРМОПРОХОДОК АЕС

V. Skliarov, PhD in Technical Science, scientific secretary
M. Huriev, chief research marker,
A. Zabelskyi, engineer of I category,
National Scientific Centre «Institute of Metrology»,
Kharkov

В. Склярів, кандидат технічних наук, вчений секретар,
М. Гур'єв, кандидат технічних наук, провідний
науковий співробітник,
А. Забельський, інженер I категорії,
ННЦ «Інститут метрології», м. Харків

This paper considers the methodology for the evaluation of aging and degradation of equipment during the designed operational lifecycle. Conclusions are applicable when extending the designed operational lifecycle of nuclear power plants and facilities with long operational lifecycle (30 years or more). Analysis of possible mechanisms of aging of equipment is carried out. As an example, the evaluation of aging and degradation of sealed enclosure system of nuclear power plant localizing safety system is shown. The conservative methods of evaluation of the arising stresses are applied.

У роботі розглядається методологія оцінювання старіння і деградації обладнання в період проектного терміну експлуатації. Висновки застосовні за продовження проектного терміну експлуатації енергоблоків атомних електростанцій та об'єктів, що мають тривалий термін експлуатації (30 і більше років). Аналізуються можливі механізми старіння обладнання. Як приклад наводиться оцінка старіння і деградації системи герметичних огорожень локалізуювальної системи безпеки атомної електростанції. Реалізуються консервативні методи оцінки напруг, що виникають.

Keywords: methods of calculation, finite elements modeling, quantitative evaluation, the aging process, degradation of the material, reliability.

Ключові слова: методи розрахунків, кінцеві елементи моделювання, кількісні оцінки, процеси старіння, деградація матеріалів, надійність.

INTRODUCTION

Currently, the operational lifecycle of the most of nuclear power plants in Ukraine is over 30 years. During the designed operational lifecycle the materials of NPP equipment were exposed to operational aging.

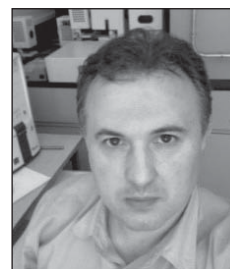
According to the classical definition [1], «The aging of metals is the change in the mechanical, physical and chemical properties of metals and alloys in the process of maturing. Aging is caused by the thermodynamic nonequilibrium of the original state and the gradual approximation of the structure to the equilibrium state in a sufficient diffusion mobility of atoms». The analysis of mechanisms of aging of materials and evaluation of the measurement properties and characteristics of materials with long operational lifecycle allows to prevent the damage of the equipment. Selection of methods and means of nondestructive inspection allows to determine the change of material properties of the operational mechanisms of damage, to perform non-destructive testing of NPP equipment and carry out preventive safety measures [2].

MOTIVATION AND MAIN TASK

According to [3], the main purpose of the strategic planning of the nuclear-power complex (NPC) is to provide cost-efficient and competitive functioning of the NPC as a whole and



V. Skliarov



M. Huriev



A. Zabelskyi

its individual facilities for the period up to 2030 and the further prospect in the next determining conditions of:

- ultimate implementation of all relevant standards and requirements for safety of the NPC facilities and limiting their impact on the population and the environment;
- ensure energy security of Ukraine;
- ensure effective use of previously implemented investments in the development of NPC;
- ensuring of uninterrupted functioning of NPC after 2030;
- minimization of the negative economic, social, environmental and other consequences of the functioning of the NPC during the period up to 2030 and in the longer term.

To achieve these goals, the strategy identifies the main tasks and solutions. The key directions of this activity are to extend the operational lifecycle of the operating NPPs.

The service life of the nuclear power plant is largely determined by the actual state of the materials from which the main equipment is manufactured. Justification of resources of nuclear power equipment is carried out in accordance with the «Norms for the calculation of strength of the equipment and pipelines of nuclear power plants» by the characteristics of resistance to destruction under static and cyclic loading, taking into account technological features of manufacturing and operating conditions. The basic mechanical properties for the calculation are taken from the «Norm for the calculation of strength of the equipment and pipelines of nuclear power plants» (PNAE G-7-002-86). Such approach to the evaluation would be absolutely acceptable only if the materials does not change its properties during operation. However, the work of NPP at an acceptable level of nuclear plant capacity factor associated with high *operational thermo-strength loads*, radiation damage, corrosion and corrosion-mechanical impacts. This causes changes in physical and mechanical properties and structure of the materials, especially in the most unfavorable zones where the operational impact is maximal. As a result, characteristics of the materials deteriorate compared to the baseline [2].

The dominant role in the safety system of the reactor facility is performed by localizing fittings on the border of the Sealed Enclosure System (SES). Working capacity and control of the reactor facility is provided via sealed penetration of Localizing Safety Systems (LSS). The importance of maintaining of LSS sealed penetration in the operational state has confirmed the accident of March 11, 2011 at the NPP «Fukushima-1». The loss of all safety barriers resulted in a release

of significant amounts of radionuclides into the environment, and due to that, the 7th - the highest level on the international scale INES [4] was given to this accident.

Accounting and analysis of potential mechanisms of aging and methods of control on the identifying the aging processes will allow to create a mathematical model for the calculating by existing software systems.

METHODOLOGY AND CALCULATION

The experience on prolongation the operational lifecycle of acting nuclear power plants shows that depending on the type and conditions of the process equipment and pipelines the primary mechanisms of aging are:

- the thermal aging;
- the low-cycle fatigue;
- the stress corrosion cracking;
- the erosion-corrosion deterioration of metal;
- the multi-cycle fatigue.

These mechanisms provide the main contribution to the accumulation of irreversible changes in the metal and influence to the residual life of the equipment. These mechanisms defined by complex of controlled aging effects of metal and its evaluation criteria.

Processes of aging elements of LSS SES arise under the interaction of operational parameters. Table 1 shows the possible mechanisms of aging processes and types of metal control [5–6].

According to the technical regulations for equipment, besides the external examination, the acquisition of initial information on the technical and operational condition of the equipment is carried out. The following data are taken into account and analyzed:

- modes of operation of the equipment;
- the operating conditions of the equipment;
- malfunctions during the operation;
- the presence (absence) of equipment defects;
- irregularities in the operation of the NPP due to the aging of equipment;
- control of leak-tightness of equipment components;
- the presence of conditions which lead to the degradation of the mechanical properties of the equipment;
- the presence of possible physical and mechanical mechanisms of aging.

The presence of physical and mechanical mechanisms of aging requires additional research.

In particular, besides the operating conditions of the equipment, the material, thermodynamic and radioactive modes of operation, the state of the radiation environment (background radiation) at the

Table 1. Possible mechanisms and processes of the metal aging of elements of LSS SES

Possible mechanisms of aging		Processes of aging				
		Deterioration of mechanical properties	Modification of structure of material and defects precipitation	The development of defects in materials	The development of defects - thinning of the walls	The development of defects - change in shape and size
Physical	Thermal and radiation aging	*	*			
	Fatigue	*	*	*		
Mechanical	Accumulation of deformations			*		*
	Static destruction			*		*
	Mechanical deterioration, pounding			*		*
Chemical	Corrosion deterioration				*	
	Corrosion cracking			*		
	Corrosion	*		*	*	
	Changing of the chemical composition of materials	*	*		*	*
Control methods for the detection of the aging process		Control of mechanical properties by hardness	External inspection	External inspection	Ultrasonic thickness measurement	External inspection

location of the equipment and chemical impacts are indicated.

Thus, for LSS SES the following types of steel are applied [6]:

- Austenitic stainless steel of type 08X18H10T;
- Corrosion-resistant steel of type 20GSL;
- Steel 20.

The sealed penetration and piping of the sealed enclosure system are operated under the following physical effects [6]:

- Temperature of the working fluid in the pipes and pipe sealed penetrations is to be from 8°C to 270°C;
- Internal fluid pressure in the pipes and pipe sealed penetrations is to be from 0.1 MPa to 14.0 MPa;
- Outdoor ambient temperature in the pipes and sealed penetrations is to be from 5°C to 50°C;
- Equivalent dose of gamma radiation in sealed penetrations and pipelines is to vary from 0.8 mSv/h to 8.0 mSv/h;
- The absorbed dose rate of neutron radiation in the area of pipe and pipe sealed penetration is absent.

According to [7-10], the chemical effect on pipes and sealed penetrations have the following mediums:

- High-pressure nitrogen;
- Compressed air of pneumatic systems;
- Live steam;

- Gas purge;
- 1st coolant system;
- Boric acid;
- Bidistilled water;
- Industrial water;
- Raw water.

Evaluation of mechanical mechanisms of aging is carried out by visual inspection (external examination). In case of mechanical damage the equipment must be replaced.

3.1 Evaluation of physical aging mechanisms

To evaluate the physical mechanisms of aging of the stainless steel of type 08Kh18N10T and 20 GSL the experimental work was performed and the final report «Monitoring of the mechanical properties of metal fittings by destructive methods» [10] was submitted.

The aim of the experimental work was the identification of the tensile strength R_m and yield strength $R_{p0.2}$ compliance [11] and under the influence of physical factors of:

- fluid temperature of 270°C;
- internal pressure of 16.5 MPa;
- the absorbed dose of gamma radiation of 8.0 mSv/h.

For experimental studies from the materials of equipment were manufactured:

- 64 samples for tensile testing;
- 60 samples for study of the propensity to intergranular corrosion;
- 5 samples for testing on the impact strength;
- 59 samples for the microarray study.

Based on the performed experimental research and analysis of the results, it was concluded that after 27 years of operation, fittings made of steel 08X18H10T, 20GSL and steel 20 retained their tensile strength and yield stress [10, 11].

3.2 Evaluation of chemical aging mechanisms

In the NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology» the methodology for study of corrosion of stainless steels was developed and the studies of corrosion of stainless steels used in the reactors VVER-440 and VVER-1000 [7—9] were carried out. In [7, 8] the corrosion of steel 08X18H10T and 06X18N10T was studied in laboratory tests in the coolant with three pH values: 5.0; 7.2 and 10.0. The chemical composition of the corrosive medium is presented in Table 2.

Selected compositions of corrosive medium are similar to that of the coolant of reactor VVER-1000 while working on power (composition 2) and under hypothetical deviations from the values of the quality of the coolant pH (compositions 1, 3). The pH measurements of corrosive medium before and after the test were conducted at room temperature. The composition of the corrosive medium after overload and weighing of the samples has been changing to freshly prepared. The kinetics of oxidation was determined by periodic weighing of samples [8]. Weighing results of samples shows the mass decreasing. The irregular mass decrease is noted, i.e. after reducing the mass of the sample, it may increase and then decrease again. These features of corrosion kinetics show different solubility of oxide films on stainless steel at different stages of oxidation. As a flow of water, except weak convection one, does not exist in test autoclave, a jet flushing, as in the reactor, is also not possible. Thus, the loss of mass is related to the partial dissolution of the oxide in the corrosion medium. The image of corrosion layers obtained by scanning electron microscopy confirms this assumption. There is the uniform reduction of weight of the samples of stainless steel 08X18H10T.

We define the mass decrease in time t equal to 50 years ($50 \times 365 \times 24 = 438 \times 10^3$ hours) and a decrease in the thickness of the sample H at a density of stainless steel 08X18H10T — $\rho_{08X18H10T} = 7.9 \times 10^3$ kg/m³.

According to monographs [12, 13], the corrosion rate Δm of steel of type 08X18H10T is 0.4 mg/m²×h. Reducing of the thickness of the walls of the sealed

Table 2. The aqueous composition and the pH medium for the autoclave tests

The medium composition	The components of the corrosive medium		
	Composition 1	Composition 2	Composition 3
H ₃ BO ₃ , g/dm ³	32.5	7.0	7.5
KOH, g/dm ³	0.11	0.025	6.6
NH ₄ OH, g/dm ³	-	28	-
pH	5.0	7.2	10.0

penetration is:

$$H_{08X18H10T} = (\Delta m_{08X18H10T} \times t) / \rho = (0.4 \cdot 10^{-6} \times 438 \cdot 10^3) / 7.9 \cdot 10^3 = 22.177 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0.022 \text{ mm}.$$

According to [14], the corrosion rate of the metal is inversely proportional to the tensile strength of the metal R_m . Therefore, the corrosion rate of the steel 20 at a conservative estimate, and at $R_m^{08X18H10T} = 559$ MPa, $R_m^{20} = 398$ MPa, at operating conditions defined as follows:

$$\Delta m_{20} = (\Delta m_{08X18H10T} \times R_m^{08X18H10T}) / R_m^{20} = (0.4 \cdot 10^{-6} \times 559) / 398 = 0.561 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2 \times h$$

Reducing of the thickness of the pipe wall for the steel of type 20 at $\rho_{20} = 7.859 \times 10^3$ kg/m³ is equal to:

$$H_{20} = (\Delta m_{20} \times t) / \rho_{20} = 0.5616 \cdot 10^{-6} \times 438 \cdot 10^3 / 7,859 \cdot 10 = 31.335 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0.031 \text{ mm}.$$

Given the fact that the immutability of tensile strength R_m and yield strength $R_{p0.2}$, but taking into account the chemical thinning, we assume a change in thickness.

CALCULATION AND EVALUATION

A powerful tool in computer modeling and numerical simulation of the objects with complex geometric configurations and multicomponent physical structure is the finite element method [15-18].

The finite element method and the mathematical model of the object allows the detailed calculation of stresses and strains in the equipment under static and dynamic impacts. Using the finite element method allows to calculate the items of equipment with complex geometric shapes and to make conclusions and recommendations for the further use, replacement or strengthening.

As an example, we consider the sealed penetration with an outer diameter of 159 mm and a wall thickness of 4 mm ($\varnothing 159 \times 4$).

Operating conditions: calculated internal pressure of 0.6 MPa, design temperature of the internal environment -33°C . The 3D solid model of the sealed penetration is shown in Fig. 1.

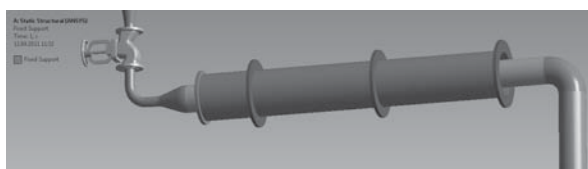


Fig. 1 3D solid model

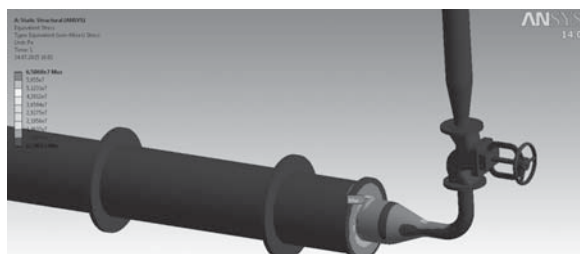


Fig. 2 The results of calculation with the original wall thickness of 4 mm.

Calculations for the static strength show that the conditions according to [11] are met.

The results are displayed in Fig. 2.

The value R_m is 65.86 MPa, which does not exceed the static strength of 231 MPa according to [11].

Predicting the wall thinning of sealed penetration under the influence of chemical aging mechanisms, we perform the calculations of the static strength while reducing the wall thickness by 10%, 20% and 30%.

The results of calculations of static strength of sealed penetration of sizes $\varnothing 159 \times 4$ while reducing its thickness by 10%, 20% and 30% are given in Fig. 3-5 and Table 3. Thinning of 10%, 20% and 30% corresponds to a thickness of 3.6 mm, 3.2 mm and 2.8 mm, respectively.

As a result of these studies we can conclude that this sealed penetration designed with a significant margin of static stress.

CONCLUSIONS

The algorithm and mathematical model proposed in this article was tested and adopted during the works on extending the designed operational lifecycle of the units 1 and 2 of the Rivne nuclear power plant. The analysis and calculation of more than 20 sizes of sealed penetrations relating to LSS SES were carried out.

The results of calculations of static strength were taken into account in the calculations for seismic sta-

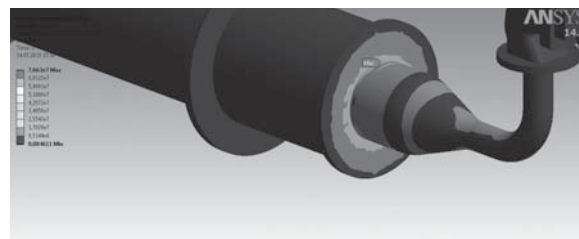


Fig. 3 The calculation results in the wall thinning by 10%.

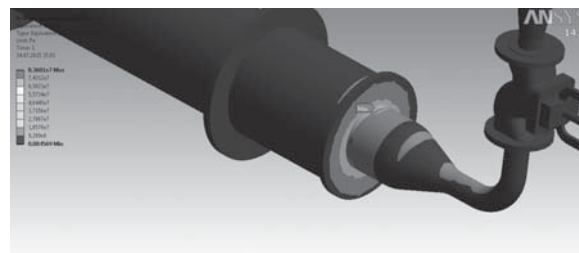


Fig. 4 The calculation results in the wall thinning by 20%.

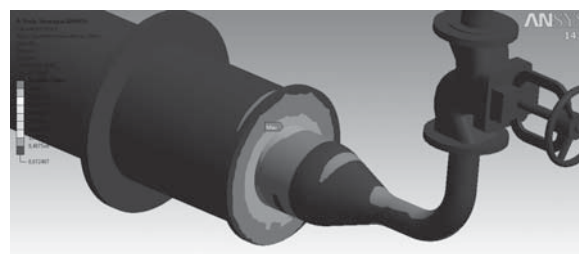


Fig. 5 The calculation results in the wall thinning by 30%.

bility. In the evaluation of seismic stability calculations were carried out based on the mechanisms of aging. The proposed methodology allowed to conclude that the equipment meet the requirements of PNAE G-7-002-86 [11] and to extend the designed operational lifecycle of nuclear power plant units for 30 years.

The knowledge of mechanisms of operational damage of materials in the most loaded areas of the construction with the possibility of periodic quantitative evaluation of the material properties will allow to predict with confidence the boundaries of safe operation of the main equipment of the nuclear power plant.

Perspective directions for further researches are the determination of mechanical properties of materials by the parameters of hardness in area of stress concentration and metrological assurance of works on extending the designed operational life cycle of the units of type VVER-1000 (BWR, PWR, FBR, HTGR) up to 60 years and more.

Table 3. The maximum values of static stress in sealed penetration


The value of the size reduction of the walls of sealed penetration	Original size, 4 mm	10 %, 3.6 mm	20 %, 3.2 mm	30 %, 2.8 mm
The maximum static stress, MPa	65.86	76.63	83.60	85.38

ACKNOWLEDGEMENTS

The presented work is made on the basis of the huge volume of material accumulated during the work on the extension of the designed operation lifecycle of units 1 and 2 of type VVER-440 of the Rivne nuclear

power plant in the period from 2009 to 2011. The authors would like to express gratitude to the staff of the Rivne nuclear power plant and all the colleagues who participated in the carrying out the work on extending the designed operation lifecycle of the Rivne NPP.

REFERENCES

1. Skakov Y.A. The aging of metal alloys // Metallurgy (Materials of Symposium). M.: Metallurgy, 1971. pp 118—132.
2. Bakirov M.B. Development and application of methods and tools for monitoring the stage of materials for NPP: Dis. Drs. Tehn. Sciences. All-Russian Research and Design Institute of Nuclear Power Engineering, Moscow, 2002. <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-i-primenenie-metodov-i-sredstv-kontrolya-sostoyaniya-materialov-na-aes#ixzz3f2UoMQGF/>
3. «Energy Strategy of Ukraine for the period till 2030», adopted by The Order of CMU No. 145 «On the adoption of Energy Strategy of Ukraine for the period till 2030», dated 15/03/06.
4. Gauntt Randall. Fukushima Daiichi Accident Study Report / Randall Gauntt, Donald Kalinich, Jeff Cardoni [et al.] // Sandia National Laboratories. — 2012. — 298 p.
5. MT T.O.03.171-05. Method for determination of the current state of the sealed enclosure systems of localizing safety systems of units VVER-1000 of nuclear power plant in Ukraine and evaluation of the residual term of their operation.
6. The Working Program for the technical condition evaluation of the components of sealed enclosure system in order to prolong the operational lifecycle. Unit No.1, 2. 191-210- PR OTS-10.
7. Krasnorutskiy V.S., Petelguzova I.A., Gritsina V.M., et al. The corrosion of stainless steels in conditions simulating primary coolant system of VVER-1000 reactors. The corrosion behavior of the mixed feed of fuel. Issues of atomic science and technology. 2011. No.2. Series: Physics of radiation damages and radiation materials science, pp. 80-87.
8. Krasnorutskiy V.S., Petelguzov I.A., Gritsina V.M., et al. Investigation of the effect of water chemistry on corrosion processes on materials of the core of VVER reactors. Issues of atomic science and technology. 2010. No.5. Series: Physics of radiation damages and radiation materials science, pp. 58-66.
9. Zuek V.A., Rud R.A., Petelguzov I.A., Tretyakov M.V. The methodology of the study of corrosion films on stainless steel. Issues of atomic science and technology. 2010. No.1. Series: Physics of radiation damages and radiation materials science, pp. 141—149.
10. The final report «Monitoring the mechanical properties of metal of the SVB valve bodies of units No.1,2 by destructive methods.» Kiev. SDC «Vector», 2008. — 61 p.
11. The Norms of calculation of strength of the equipment and pipelines of nuclear power units (PNAE G-7-002-86) / Gosatomenerg nadzor of the USSR. — M.: Energoatomizdat, 1989. — 525 pages.
12. Azarenkov N.A., Lytovchenko S.V., Nekludov I.M., Stoev P.I. Corrosion and protection of metals. — Training course.- Kharkiv: 2007, 187 p.
13. Melekhov R.K., Pohmursky V.I. Constructive materials for power equipment. Properties. Degradation. Kiev: Naukova Dumka, 2003. — 384 p.
14. Semenov I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. Corrosion and Corrosion Protection / Edition by Semenova. M.: FIZMATLIT, 2002, 336 p.
15. Lukashevich A.A., «Modern numeric methods of construction mechanics» Publishing House of Khabarovsk State Technical University, 135 (2003).
16. Bruyaka V.A., «Engineering analysis in ANSYS Workbench» Samara State Technical University, 271 (2010).
17. Shah, Ch. «Mesh Discretization Error and Criteria for Accuracy of Finite Element Solutions» <<http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2002-Int-ANSYS-Conf-9.PDF>>.
18. ANSYS 5.6 Theory Reference <<http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>>. 

Отримано / received: 17.09.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. В.Б. Большаковим (Україна).
D. Sc. (Techn.), V.B. Bolshakov, Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 006.91:21.03.519.95

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗРАЗКІВ (КОМПЛЕКСІВ) ОЗБРОЄННЯ І ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ У ПРОЦЕСІ ПЕРЕВЕДЕННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЮ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

О. Дзисюк, начальник Метрологічного центру військових еталонів,

В. Бойко, начальник науково-дослідного відділу військових еталонів —
заступник начальника Метрологічного центру,

Ю. Рондін, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідного відділу,
Метрологічний центр військових еталонів Збройних Сил України, м. Харків

Визначено й обґрунтовано актуальні питання метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки під час переведення на експлуатацію за технічним станом у сучасних умовах. Розроблено пропозиції щодо систематизації й узагальнення організаційних, технічних і нормативних основ метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки у процесі такого переведення.

Pressing questions of metrological assurance of arms and the military techniques are defined and proved at transition to operation on a technical condition in modern conditions. Offers concerning ordering and generalization of organizational, technical and standard bases of metrological assurance of arms and the military techniques are developed at transition to operation on a technical condition.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, експлуатація, озброєння, військова техніка, технічний стан.
Keywords: metrological assurance, operation, arms, military techniques, technical condition.

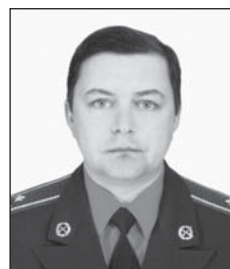
Виконання положень стратегії національної безпеки України, захисту територіальної цілісності в сучасних умовах, як показав попередній аналіз проведених антитерористичних операцій, вимагає нових форм і способів застосування військових структур і, відповідно, ефективного використання наявного у Збройних Силах (ЗС) України озброєння та військової техніки (ОВТ) [1].

Багаторічний досвід вирішення завдань підтримання боєздатності ОВТ свідчить, що вона визначається, у тому числі, ефективністю науково-технічного супроводження (НТС) ОВТ — комплексу науково-дослідних робіт та організаційно-технічних заходів, які спеціально організуються Замовником (Міністерством оборони України) у взаємодії з Виробником (організаціями промисловості) на всіх етапах життєвого циклу ОВТ з метою оптимізації їхньої якості за рахунок своєчасного впровадження результатів науково-технічних досліджень [2].

Підтримання боєготовності зразків (комплексів) ОВТ на етапі експлуатації, стосовно завдань НТС, згідно з нормативно-правовими документами, здійснюють за такими основними напрямками: експлуатація протягом попередньо призначеного терміну служби; продовження призначення показників засобів ОВТ; експлуатація протягом продовженого терміну служби. Наявна система НТС зразків (комплексів) ОВТ на етапі експлуатації — достатньо витратна, слабо адаптивна до мінливої військово-політичної обстановки [3]. Наочне підтвердження тому — проведення антитерористичних операцій. Ці питання набули найбільшої актуальності під час проведення бойових дій. Більша частина ОВТ, яку використовували в їх проведенні, перебуває



О. Дзисюк



В. Бойко



Ю. Рондін

в експлуатації понад 20–25 років і за своїм станом потребує значного обсягу робіт з відновлення технічної придатності [4].

Аналіз результатів проведення антитерористичних операцій свідчить стосовно низького рівня системи контролю та діагностування технічного стану зразків (комплексів) ОВТ у процесі підготовки до проведення операцій. Окрім того, встановлено повне скорочення підрозділів технічного забезпечення щодо накопичення, збереження та постачання матеріально-технічних засобів. Виконання експлуатаційних процесів у обмежені терміни з високою якістю й ефективністю вимагає планування цих процесів та управління діяльністю штатних фахівців.

У сучасних умовах найбільш оптимальний варіант ефективної експлуатації зразків (комплексів) ОВТ — експлуатація за технічним станом, яка передбачає проведення операцій із визначення, діагностування й прогнозування реального стану зразків (комплексів) ОВТ протягом їх життєвого циклу. За допомогою засобів контролю та діагностування проводять контроль технічного стану апаратури, а прогнозування виконують за результатами вимірювання параметрів апаратури засобами вимірювальної техніки військового призначення (ЗВТВП). Результати таких вимірювань — основа для ухвалення рішень стосовно необхідності її технічного (в тому числі й метрологічного) обслуговування, часу обслуговування й обсягів [3].

Військово-метрологічне забезпечення зразків (комплексів) ОВТ на етапі експлуатації — це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на досягнення повноти контролю, точності вимірювань, заданих у тактико-технічному завданні (ТТЗ) тактико-технічних характеристик (ТТХ) на об'єкт експлуатації [5].

Потрібно відзначити, що на сьогодні чинним наказом Міністра оборони України (№ 904 від 19.12.2014) затверджено “Порядок експлуатації за технічним станом виробів авіаційної техніки державної авіації, за якими розробник (виробник) не виконує своїх обов’язків із супроводження експлуатації та підтримання льотної придатності”. Він стосується пілотованих і безпілотних літальних апаратів та їх обладнання, виробів (промислової продукції), що належать до авіаційної техніки. Наказом визначено також функції учасників робіт з переведення та експлуатації виробів авіаційної техніки за технічним станом, порядок їх переведення на експлуатацію за технічним станом, організаційні питання експлуатації та перелік документів,

що розробляються під час проведення робіт з переведення та експлуатації виробів авіаційної техніки за технічним станом.

Основні вимоги до метрологічного забезпечення (МлЗ) зразків (комплексів) ОВТ у процесі переведення на експлуатацію за технічним станом: точність і достовірність вимірювань (контролю) заданих у ТТЗ тактико-технічних характеристик, при цьому необхідно також забезпечити оптимальні оперативність, ресурсні показники і повноту функціонального діагностування.

Ці вимоги можна реалізувати, насамперед, подальшим розвитком технічної, організаційної і методичної основ МлЗ зразків (комплексів) ОВТ.

Мета статті — визначення і обґрунтування напрямків удосконалення метрологічного забезпечення зразків (комплексів) ОВТ під час переведення їх на експлуатацію за технічним станом.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Переведення ОВТ на експлуатацію за технічним станом [2] — це виконання комплексу наукових досліджень та організаційно-технічних заходів, які надають можливість використовувати ОВТ за призначенням поза межами значень календарних та ресурсних показників, установлених розробником (виробником).

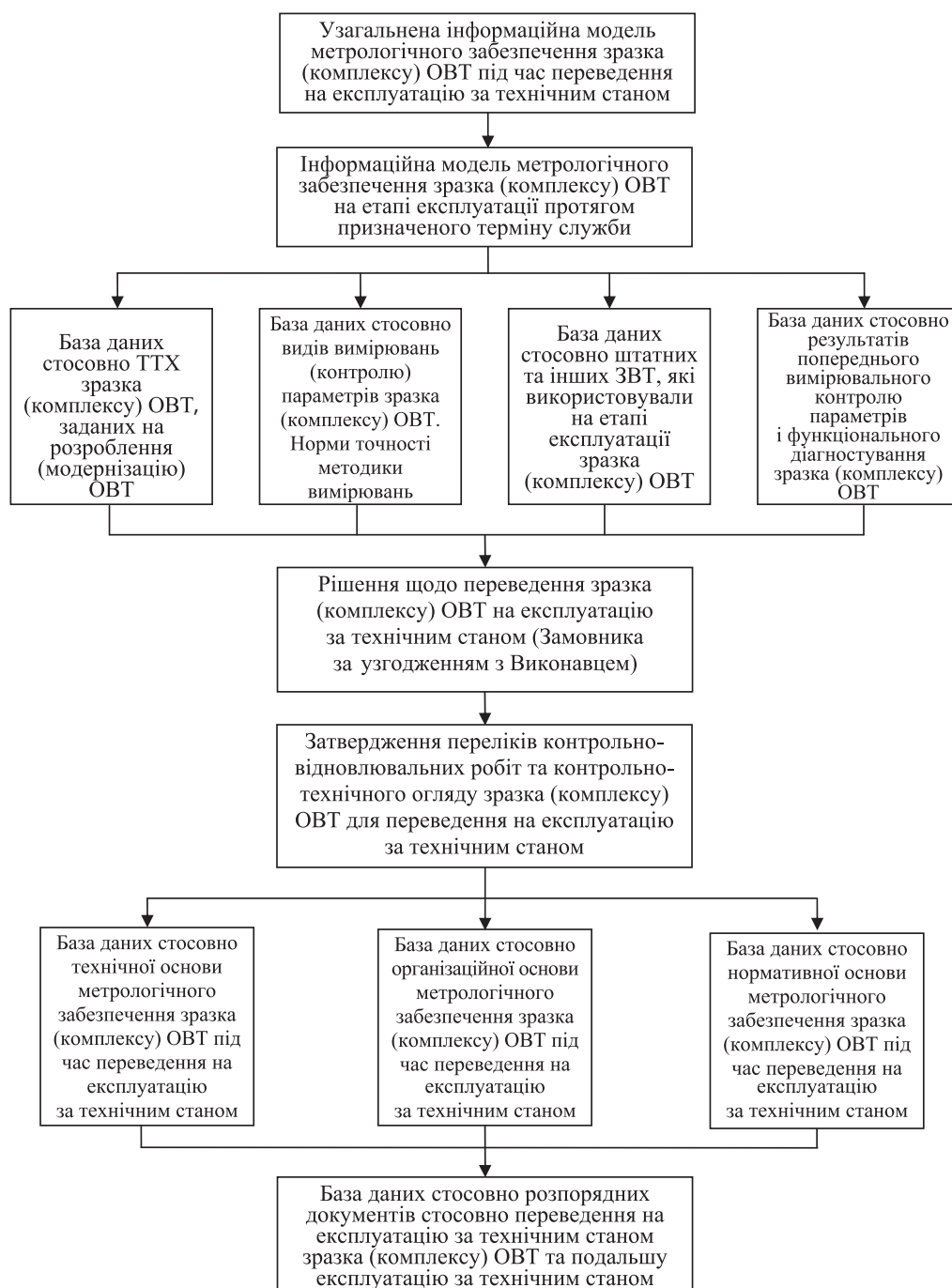
Технічний стан як сукупність властивостей зразка (комплексу) ОВТ, які змінюються в процесі експлуатації, характеризуються відповідністю фактичних показників якісних ознак встановленим у нормативній (технічній) документації у визначений момент часу. Технічний стан зразка (комплексу) ОВТ оцінюють за результатами вимірювального контролю його параметрів і функціонального діагностування.

Сьогодні для оцінювання якості МлЗ систем (комплексів) успішно використовують методи і засоби сучасних інформаційних технологій [6]. На рисунку представлено розроблений варіант інформаційної моделі МлЗ зразка (комплексу) ОВТ під час переведення на експлуатацію за технічним станом.

Вихідні дані для розроблення моделі — тактико-технічні характеристики зразка (комплексу) ОВТ, задані у ТТЗ на його розроблення, та технічна документація на експлуатований зразок (комплекс) ОВТ.

На цій основі формують основні інформаційні модулі — бази даних.

У вихідних даних представлено такі інформаційні модулі: база даних стосовно ТТХ зразка (комплексу) ОВТ; база даних стосовно видів вимірювань (контролю) параметрів, норм точності, методик



Узагальнена інформаційна модель МлЗ зразка (комплексу) ОВТ під час переведення на експлуатацію за технічним станом

The generalized information model for metrological assurance of the arms and the military techniques sample (complex) while translating on operation on a technical condition

вимірювань; база даних стосовно штатних та інших ЗВТ, які використовували на етапі експлуатації; база даних стосовно результатів останнього за строком вимірювального контролю параметрів і функціонального діагностування зразка (комплексу) ОВТ.

Після прийняття Замовником (узгодженого з Виконавцем) рішення щодо переведення зразка (комплексу) ОВТ на експлуатацію за технічним станом розробляють переліки контрольно-відновлювальних

робіт (КВР) та контрольно-технічного огляду (КТО) зразка (комплексу) ОВТ для переведення на експлуатацію за технічним станом.

На їх основі формують бази даних стосовно технічної, організаційної та нормативної основ МлЗ процесу переведення на експлуатацію за технічним станом. МлЗ зразка (комплексу) ОВТ в процесі переведення на експлуатацію за технічним станом повинно гарантувати повноту, достовір-

ність, контроль, точність вимірюваних ТТХ ОВТ.

За результатами виконання КВР і КТО формується база даних стосовно розпорядних документів щодо переведення на експлуатацію за технічним станом зразка (комплексу) ОВТ.

Ефективне й якісне виконання вимог насамперед визначається складом технічної основи МлЗ зразка (комплексу) ОВТ.

У своєму складі вона повинна мати:

- штатні засоби вимірювальної техніки та контролю, вбудовані або додані до штатних комплексів об'єктів випробувань; усі ЗВТ повинні бути атестованими, повіреними (каліброваними) та відповідати вимогам за точністю та достовірністю вимірювань;
- комплекс стандартизованих ЗВТ за різними видами вимірювань, які використовують у процесі переведення на експлуатацію за технічним станом;
- апаратуру приймання, контролю й опрацювання сигналів інформаційно-вимірювальних систем (єдиного часу, навігаційно-часового забезпечення тощо);
- спеціальну метрологічну техніку (робочі та військові еталони, повірочні (калібрувальні) установки тощо), призначену для МлЗ робочих ЗВТ в процесі переведення на експлуатацію за технічним станом.

Це зумовлено насамперед тим, що сучасна апаратура зразків (комплексів) ОВТ: бронетанкової техніки, зенітно-ракетних комплексів, безпілотних літальних апаратів тощо, — широко використовує сигнали даних інформаційно-вимірювальних систем [7].

База даних стосовно організаційної основи МлЗ зразка (комплексу) ОВТ під час переведення на експлуатацію за технічним станом формується на основі чинних нормативно-правових документів [5, 8]. До складу комісії з переведення на експлуатацію ОВТ за технічним станом включають посадових осіб від Замовника, структурних підрозділів Генерального штабу, командування видів ЗС України, в інтересах яких виконують переведення, науково-дослідних установ ЗС України (за напрямом діяльності), організаційних структур Виконавця.

Стосовно проблем МлЗ такі структури — Центральне управління метрології та стандартизації озброєння ЗС України, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, служби метрології та стандартизації видів ЗС України.

База стосовно нормативної основи МлЗ процесу переведення зразків (комплексів) ОВТ на експлуатацію за технічним станом формується також насамперед на основі чинних нормативно-правових документів у сфері військової метрології.

Безпосередню методичну основу МлЗ повинні складати затверджені методики проведення метрологічної експертизи: переліків контрольно-відновлювальних робіт та контрольно-технічного огляду; методик виконання процесу переведення на експлуатацію ОВТ за технічним станом; методик атестації, повірки (калібрування) стандартизованих, спеціальних ЗВТ (вимірювальних систем, комплексів). Методична основа МлЗ також повинна містити методики атестації окремих засобів вимірювань та апаратури системи єдиного часу, навігаційного забезпечення [10].

Найважливішою складовою методичної основи МлЗ повинна бути методика комплексної оцінки якості та готовності системи МлЗ до проведення робіт з переведення зразків (комплексів) ОВТ на експлуатацію за технічним станом.

База даних стосовно переведення на експлуатацію за технічним станом зразків (комплексів) ОВТ формується на основі розпорядних документів, які розробляє Головна організація і затверджує Замовник за результатами виконання всього комплексу контрольно-відновлювальних робіт та контрольно-технічного огляду зразка (комплексу) ОВТ.

Основні напрямки удосконалення МлЗ переведення зразків (комплексів) ОВТ на експлуатацію за технічним станом визначаються насамперед перспективами розвитку ОВТ. Тенденції розвитку: створення високоточної зброї оптичного інфрачервоного діапазонів, гіперзвукової зброї, з використанням нової елементної бази, інформаційних технологій та реалізації новітніх результатів досліджень у сфері озброєння. Необхідно визначити при цьому принципову обставину: на сьогодні не виконуються об'єктивні вимоги — забезпечення випереджувального розвитку ЗВТ. Необхідна оптимізація парку сучасних ЗВТ за критерієм достатності із забезпеченням необхідної точності вимірювань і контролю. Необхідно також упровадження до системи МлЗ автоматизованих систем контролю і діагностики, створення мобільних військових еталонів.

ВИСНОВКИ

1. У сучасних умовах забезпечення високого рівня підготовки військ (сил) для виконання завдань за призначенням, визначення та оцінок фактичних властивостей зразків (комплексів) ОВТ в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації, переведення на експлуатацію за технічним станом — достатньо ефективне.

2. Оперативне об'єктивне прийняття рішення із переведення ОВТ на експлуатацію за технічним

станом залежить від багатьох чинників, у тому числі, від ефективності системи МлЗ зразків (комплексів) ОВТ на етапі експлуатації.

3. Представлено узагальнену інформаційну модель МлЗ зразка (комплексу) ОВТ за пере-

ведення на експлуатацію за технічним станом. Визначено основні напрямки удосконалення технічної, організаційної та методичної основ МлЗ переведення ОВТ на експлуатацію за технічним станом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Положення про організацію розроблення (модернізації) озброєння і військової техніки для потреб Збройних Сил України / Затверджено наказом Міністра оборони України від (Regulations about the organization of working out (modernization) arms and the military techniques for needs of Armed forces of Ukraine / Is confirmed by the order of the Minister of Defense of Ukraine from) 10.08.2010 № 416.
2. Порядок експлуатації за технічним станом виробів авіаційної техніки державної авіації, за якими розробник (виробник) не виконує своїх обов'язків із супроводження експлуатації та підтримання льотної працездатності / Затверджено наказом Міністра оборони України від (A method of operation behind a technical condition of products of aviation techniques of the state aircraft behind which the developer (manufacturer) does not carry out the duties on support of operation and maintenance of flight work capacity / It is confirmed by the order of the Minister of Defense of Ukraine from) 19.12.2014 № 904.
3. Ланецький Б.М. Науково-технічне супроводження експлуатації та ремонту засобів зенітних ракетних систем: основні положення, сучасний стан та пропозиції щодо удосконалення / Б.М. Ланецький, В.В. Бурцев, В.І. Карпенко, В.В. Лісовенко // ХУПС. — Системи обробки інформації (Lanetsky B.M Scientific and technical support of operation and repair of means of antiaircraft rocket systems: substantive provisions, a modern condition and offers concerning improvement / B.M. Lanetsky, V.V. Burtsev, V.I. Karpenko, V.V. Lisovenko // HUPS. — Systems of processing of the information). — № 3(52). — 2006. — С/Р. 75—80.
4. Алексеєнко О.В. Аналіз проблемних питань технічного забезпечення антитерористичної операції та визначення напрямів їх вирішення / О.В. Алексеєнко, О.О. Челобітченко, Н.К. Багдасарян, І.В. Овчаренко // Труды НУОУ ім. Івана Черняховського (Alekseenko A.V. Analysis of problem questions of technical assurance of antiterrorist operation and definition of directions of their decision / A.V. Alekseenko, A.A. Chelobitchenko, N.K. Bagdasarjan, I.V. Ovcharenko // Works of a NUOU of a name. Ivan Chernjahovsky). — 2014. — № 4(125). — С/Р. 85—92.
5. Демидов Б.А. Системно-концептуальные основы деятельности в военно-технической области / Б.А. Демидов, А.Ф. Величко, И.В. Волощук. Под ред. Демидова Б.А. — Н.-К. Технол. Парк (Demidov B.A. System of an activity basis in military-technical area / B.A. Demidov, A.F. Velichko, I.V. Voloshchuk. Under the editorship of Demidov B.A. — N.-K. Technological. Park), 2006. — 1152 с/р.
6. Гриценко В.И. Информационные технологии: вопросы развития и применения / В.И. Гриценко, Б.Н. Панышин // К.: Наукова думка (Gritsenko V.I. Information technologies: development and application questions / V.I. Gritsenko, B.N. Panshin // K: Scientific thought), 1988. — 272 с/р.
7. Білецький І.Г. Особливості застосування безпілотної розвідувальної авіації в сучасних військових конфліктах / І.Г. Білецький, В.В. Андронов // ХУПС. — Системи озброєння і військова техніка (Biletsky I.G. Features of application of pilotless prospecting aircraft in modern military conflicts / I.G. Biletsky, V.V. Andronov // HUPS. — Systems of arms and the military techniques). — 2010. — № 1(21). — С/Р. 118—124.
8. Хижняк В.В. Завдання метрологічного забезпечення військ та напрями їх виконання в умовах реформування Збройних Сил України / В.В. Хижняк, В.Ю. Камінський // Наука і оборона (Hizhnjak V.V. A problem of metrological assurance of armies and a direction of their performance in the conditions of reforming of Armed forces of Ukraine / V.V. Hizhnjak, V.Yu. Kaminsky // The Science and defense). — 2009. — № 2. — С/Р. 55—60.
9. Буренок В.М. Управление качеством вооружения и военной техники / В.М. Буренок, А.А. Ивлев, С.С. Смирнов // Военная мысль (Burenok V.M. Quality management of arms and the military techniques / V.M. Burenok, A.A. Ivlev, S.C. Smirnov // Military thought). — 2006. — № 8. — С/Р. 18—23.
10. Гаврилов А.Б. Деякі погляди на проблемні питання організації метрологічного забезпечення через призму метрологічної експертизи документації на озброєння і військову техніку, що розробляється (модернізується) / А.Б. Гаврилов, С.В. Красинський // ХУПС. — Системи озброєння і військова техніка (Gavrilov A.B. Some sights at problem questions of the organization of metrological assurance through a prism of metrological examination of the documentation on arms and the military techniques which is developed it (is modernized) / A.B. Gavrilov, S.V. Krasinsky // HUPS. — Systems of arms and the military techniques). — 2010. — № 1(21). — С/Р. 48-54. ■

Отримано / received: 22.09.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Г.В. Худовим (Україна).
Prof. G.V. Hudov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 658.562.012.7:628.3

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ СТІЧНИХ ВОД

Ю. Шатохіна, кандидат технічних наук, викладач кафедри управління якістю та проектами, Чернігівський національний технологічний університет

Визначено номенклатуру показників, які потребують подальшого розвитку методів їх контролю, на підставі аналізу сучасних тенденцій технологій очищення вод.

The range of indicators that require further development of control methods, based on an analysis of current trends in the water treatment technologies are determined.

Ключові слова: стічні води, оперативний контроль якості, біохімічне споживання кисню, знезараження.
Keywords: wastewater, operational quality control, biochemical oxygen consumption, decontamination.

На сьогодні залишається актуальною проблема контролю якості стічних вод, оскільки певні етапи процесу їх очищення наразі або не мають методів контролю, або мають ті методи контролю, які прийняті для природних вод, але не відповідають специфічним умовам процесу очищення, наприклад, за тривалістю визначення показника. Зрозуміло, що відсутність поетапного контролю якості процесу очищення не може не впливати на те, що в Україні практично 100% очисних станцій не забезпечують необхідного рівня очищення за окремими компонентами [1, 2].

Питання керування послугами водопостачання і водовідведення розглядаються у понад 500 міжнародних стандартах ISO [3]. В Україні гармонізовано з міжнародними стандарти, значна кількість яких належить до методів контролю і використовує міжнародний досвід (зокрема, ДСТУ ISO 5815-2:2009 «Визначення біохімічного споживання кисню після n днів (БСК $_n$)», ДСТУ EN 12255-6:2008 «Процеси очищення стічних вод активним мулом»), а також створено вітчизняні методи контролю і нормативні документи (НД), зокрема [4—7], тому факт недостатності контролю можна пояснити безперервним розвитком сучасних технологій та специфічними особливостями процесів, які заважають застосовувати загальновідомі для водних ресурсів методи контролю. Сучасні технології передбачають для очищення води використання як хімічних реагентів, так і біологічних істот, а також мають різну тривалість — від декількох хвилин до декількох діб, тому для контролю якості використовують хімічні, фізико-хімічні, фізичні, мікробіологічні методи контролю. Розвиток науки і техніки, а також зростання вимог до якості і безпечності продукції змушують постійно вдосконалювати методи її контролю і відповідну нормативну документацію.

Мета роботи — виявити номенклатуру показників, які потребують подальшого розвитку методів їх контролю.

Для її досягнення обрано такі завдання:

- проаналізувати сучасні тенденції технологій очищення вод;
- визначити етапи очищення стічних вод, які недостатньо забезпечені методами

контролю, а також номенклатуру важливих щодо цих етапів показників.



Методика досліджень — аналітичні дослідження сучасних тенденцій очищення стічних вод і забезпеченості контролю їх якості нормативними документами.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Процес очищення стічних вод схематично представлено на рис. 1. Видно, що після механічної обробки, яка передбачає грати, пісколовки, відстійники (етап 1), стічні води направляють або на біологічне (етап 2), або на реагентне (етап 3) очищення.

Контроль біологічного очищення стічних вод у аеротенку визначається законодавчими та нормативними документами, у тому числі [8—10], а також ДБН В.2.5-75:2013 [11], в якому значна кількість технологічних і конструктивних параметрів (використання схеми з регенерацією мулу, тривалість аерації, навантаження на мул, приріст мулу тощо) потребує визначення такого показника стічної води, як біохімічне споживання кисню (БСК) за п'ять, двадцять чи більше діб. Аналіз тривалості деяких метрологічних робіт, представлений на рис. 2а, за даними лабораторії каналізаційно-очисних споруд (КОС) м. Чернігова, виявляє, що тривалість визначення показника БСК перевищує час перебування стічних вод у процесі очищення.

Так, тривалість перебування стічних вод на каналізаційно-очисній станції біологічного очищення, наприклад, м. Чернігова дорівнює лише дві доби, а визначення показника БСК₅ потребує п'ять діб; тобто існує необхідність, на додаток до традиційних точних методів, розроблення експрес-методів з урахуванням специфіки процесу очищення. Можливість визначення загальної біомаси активного мулу в аеротенку як експрес-методу контролю процесу очищення нами отримано з використанням сучасного мікроскопа Delta Optical Genetic Pro шляхом вимірювання параметрів гідробіонтів [12]. Такі методи, незважаючи на їхню меншу точність, дозволяють оперативно отримати необхідну інформацію.

Останнім часом біологічне очищення стічних вод шляхом створення анаеробних і аеробних зон, у кожній з яких стічна вода міститься протягом 4–5 годин, тому тривалий контроль БСК₅ традиційним методом не забезпечує реалізації оперативних дій. Контроль якості цих процесів здійснюють шляхом гідробіологічного аналізу активного мулу з використанням мікроскопів нового покоління ULAB XSP-139TP, що дозволяє розширити номенклатуру контрольних показників, сприяє досягненню позитивного результату [13, 14]. Наявний РНД 31-05-2007 з такого аналізу [15] розраховано на використання застарілої

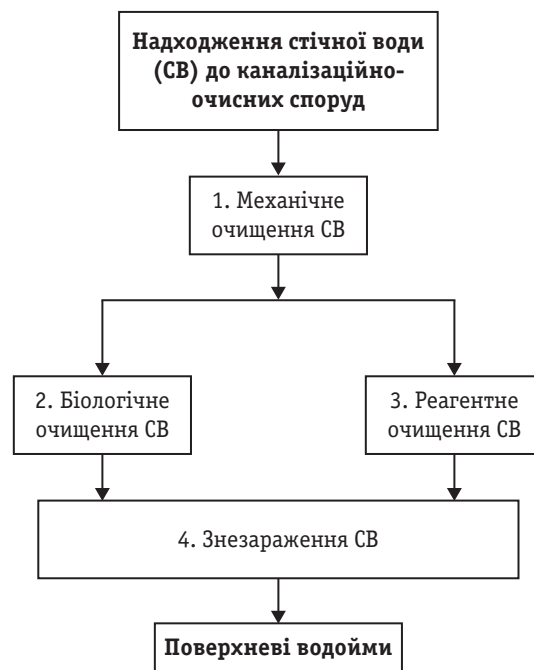


Рис. 1. Основні етапи очищення стічних вод

Fig. 1.

моделі мікроскопа, яка не дозволяє отримати запропоновані нові кількісні показники щодо контролю якості процесу, тому цей НД доцільно актуалізувати, а лабораторії КОС забезпечити сучасними приладами контролю, як це передбачено Загальнодержавною програмою «Питна вода України» [16].

Якщо очищення стічних вод здійснюють не біологічним шляхом, а реагентним (рис. 1, п. 3), то в цьому випадку також виявляється потреба в експрес-методах. Так, на станції реагентного очищення стічних вод у м. Славутичі мінімальна тривалість перебування цих вод дорівнює 7 годинам, за цей час потрібно проаналізувати показники води і визначити дозу реагенту (коагулянту), що здійснюють за кількістю завислих речовин (ЗР). За РДН 03-05-2002 [17] тривалість визначення ЗР дорівнює 6–8 годинам. Наступна технологічна операція — процес коагуляції — здійснюється ще протягом двох годин і завершується виділенням бруду у вигляді пластівців, після чого очищена вода потрапляє у р. Дніпро.

Як показано на рис. 2б (варіант А), підготовка до управлінських рішень, яка полягає у визначенні дози коагулянту за кількістю ЗР, відбувається значно триваліше, ніж сам процес коагуляції (очищення). Це призводить до того, що забруднювальний осад може випасти не на території КОС, а у поверхневій водоймі. Використання експрес-методу [18], який базується на номограмі, отримуваний на основі даних конкретної станції, дозволяє суттєво прискорити цей процес (рис. 2б, варіант Б), а максимальна

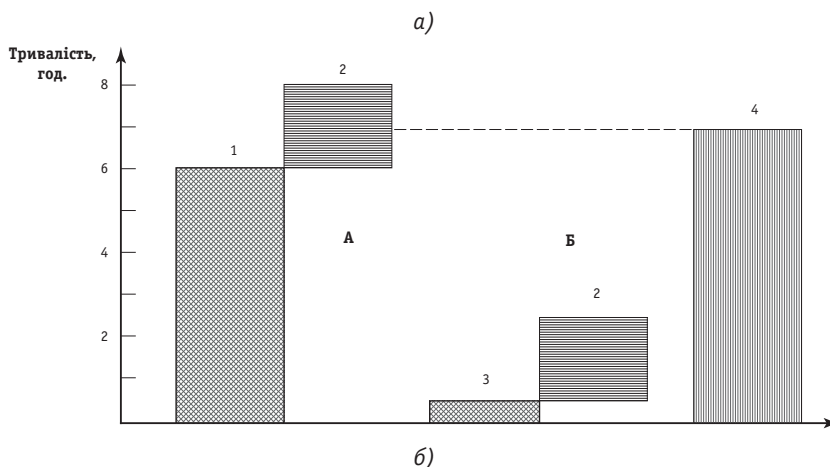
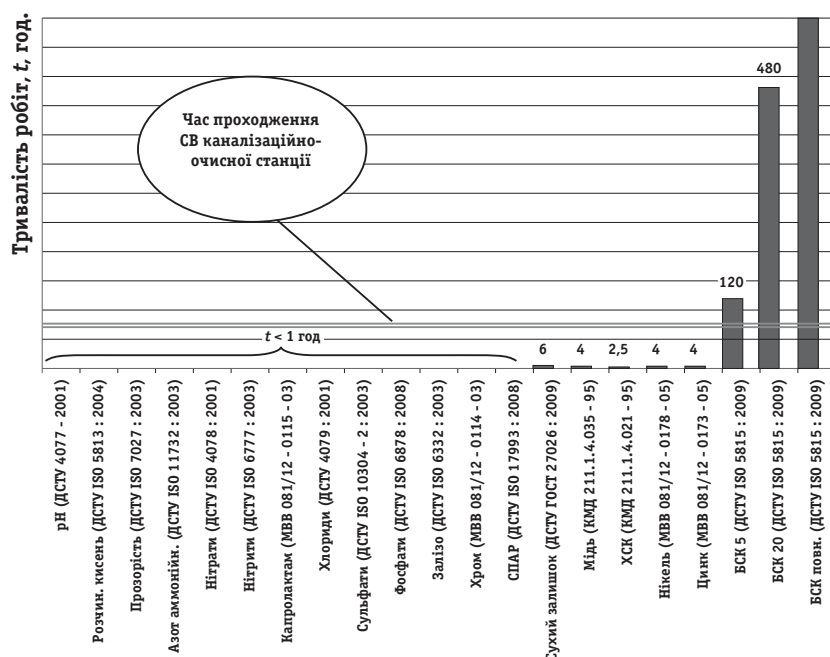


Рис. 2. Деякі метрологічні роботи з контролю показників стічних вод на прикладі КОС м. Чернігова (а) і м. Славутича (б): 1 — визначення завислих речовин традиційним методом; 2 — тривалість процесу коагуляції; 3 — визначення завислих речовин експрес — методом; 4 — тривалість перебування стічних вод на станції очищення

Fig. 2. Рис. 2. Деякі метрологічні роботи з контролю показників стічних вод на прикладі КОС м. Чернігова (а) і м. Славутича (б): 1 — визначення завислих речовин традиційним методом; 2 — тривалість процесу коагуляції:

3 — визначення завислих речовин експрес — методом; 4 — тривалість перебування стічних вод на станції очищення

відносна похибка визначення концентрації ЗР, отримана протягом трьох місяців, дорівнювала 22 %. Ураховуючи нестабільність вхідної стічної води, встановлену нами у попередніх дослідженнях [19], подальшого розвитку потребує перегляд математичних залежностей, які використовують для побудови номограм.

Обов'язковий етап очищення стічної води (рис. 1, етап 5) — її знезараження. План щодо безпеки води викладено спеціалістами ВООЗ [20–22]; визнано, що не існує єдиної моделі (яка б вирішувала усі проб-

леми, незважаючи на особливості джерел водопостачання та забруднення). Встановлено, що в Європейському регіоні неінфекційні захворювання становлять 77 %, і значну роль у цьому відіграють саме побічні продукти знезараження води, які відомі як канцерогенні сполуки. Так, побічні продукти знезараження діоксидом хлору води із поверхневих джерел викликають не лише канцерогенний, а й ембріотоксичний ефект, виявлений, на жаль, за реальних умов населених пунктів Італії.

Широко розповсюджено знезараження вод газоподібним хлором, але за обробки хлором стічних вод, які містять залишкову кількість лікарняних препаратів, що виводяться із організму людини, утворюються не лише відомі небезпечні сполуки (зокрема, тригалометани, хлорфеноли), а й нові високотоксичні гідрофобні сполуки, які можуть потрапити до джерел водопостачання [20]. Так, у поверхневих водах Європи до найбільш поширених ліків належать диклофенак, еритроміцин тощо [23], які спочатку потрапляють до побутових стічних вод внаслідок неповного засвоєння організмом хворої людини, а потім, у складі недостатньо очищених стоків, переходять до поверхневих водойм. Для цих сполук невідомо

мі не лише наслідки тривалого впливу на організм людини, а й токсичність продуктів, які утворюються з цих ліків під час знезараження стічних вод або за окислювальних методів очищення стоків. Тому, незважаючи на наявність методів контролю концентрації речовини-знезаражувача [24], контроль якості кінцевої продукції здійснюється недостатньо, потребує розвитку щодо виявлення номенклатури контрольних показників, які врахують токсичність побічних продуктів знезараження, у тому числі за тривалого впливу на організм людини.

Літературні джерела свідчать, що позитивний ефект знезараження створює не окремий знезаражувач, а суміш оксидантів [20]: хлору, хлорнуватистої кислоти, діоксиду хлору, озону, гідропероксидних сполук, — але поки що відсутні НД щодо використання такої суміші та методів контролю.

ВИСНОВКИ

* На додаток до традиційних точних, але тривалих методів визначення показників води (біохімічного споживання кисню, концентрації завислих речовин) потребують розвитку оперативні методи контролю якості окремих етапів процесу очищення стічних вод, зокрема, для біологічного очищення — контроль мікроорганізмів з використанням сучасних приладів, для реагентного очищення — контроль

процесу коагуляції. Подальшого розвитку потребує аналіз (з урахуванням можливих змін стану стічних вод) математичних залежностей, які використовують для побудови номограм в експрес-методах.

* Контроль якості кінцевої продукції за знезараження здійснюється недостатньо, потребує розвитку щодо врахування токсичності побічних продуктів знезараження, у тому числі за тривалого впливу на організм людини. Потребує розвитку метод контролю знезараження з використанням суміші оксидантів.

* Потребує актуалізації нормативний документ з гідробіологічного аналізу активного мулу аеротенків, розрахований на використання застарілої моделі мікроскопа, що стримує використання запропонованих показників щодо контролю якості процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Іванова (Шатохіна) Ю.В. Оцінка забезпеченості основних етапів життєвого циклу стічних вод нормативними документами / Ю.В. Іванова (Шатохіна), А.С. Зенкін, Ю.А. Федорченко, Н.С. Мазук // Восточно — европейский журнал передовых технологий (Ivanova (Shatokhina) Yu., Zyenkin A., Fedorchenko Yu., Mazuk N. (2012). Assessin gawai lability of the main stages of the life cycle of waste water with regulations. Eastern — European Journal of Enterprise Technologies). — 2012. — №3/6 (57). — С/Р. 56—61.
2. Щетинин А.И. Опыт реконструкции очисных сооружений с применением технологии нитро-денитрификации [Текст] / А.И. Щетинин, Ю.М. Мешенгиссер, М.А. Есин, Б.Ю.Малбиев// Водопостачання та водовідведення. — К.: ТОВ «Гнозіс» (Schetinin A., Meshengisser Yu., Yesin M., Malbay B. (2011). Experience of reconstruction of treatment facilities using the technology of nitro-denitrification. Water supply and sewage). — 2011. — № 3. — С/Р. 41—49.
3. Глобальні проблеми води. Як можуть допомогти стандарти ISO // Стандартизація, сертифікація, якість (Global problem sofwater. How ISO standards can help (2012). Standardization, certification, quality). — 2012. — № 5. — С/Р. 16.
4. Патент України №106110, МПК (G01J 3/14 (2006. 1) G 02B 5/04 (2006. 01)) UA 85406 C2. Пристрій для визначення ступеня забрудненості водних об'єктів / Бурачек В.Г., Семака О.М. — № 106110; заявл. 09.12.10; опубл.25.07.14, Бюл.№ 14 (Patent of Ukraine № 106110, IPC (G01J 3/14 (2006. 1) G 02B 5/04 (2006. 01)) UA 85406 C2. The device for determining the degree of contamination of water objects / Burachek V., Semaka O. — № 106110; appl. 09/12/10; publ. 07.25.14, Byul. № 14.).
5. Петрук В.Г. Розробка системи контролю світлорозсіювальних характеристик водних середовищ/ В.Г. Петрук, І.В. Васильківський, С.М. Кватернюк, М. Турчик, Н.В. Лопатинська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — Вінниця (Petruk V., Vasilkivsky I., Kvatarniuk S., Turchyk M., Lopatynska N. (2006). Development of the control system of light-scattering characteristics of water environments. Journal of Vinnitsa Polytechnic Institute), — 2006. — № 5. — С/Р. 22—29.
6. Міхалева М.С. Розвиток нормативно — технічного забезпечення оперативного визначення характеристик рідин для контролю стічних вод: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.02 «Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення» / М.С. Міхалева. — Львів (Mihalyeva M. The development of normative — technical support of operative determination of characteristics of liquids for control of sewage: Abstract of dissertation for the degree of PhD.: spec. 05.01.02 «Standardization, certification and metrological support» / M. Mihalyeva. — Lviv), — 2012. — 21 с/р.
7. Гончарук В. Контроль якості води. Нові державні стандарти для визначення токсичних показників/ В. Гончарук, Н. Кушевська, Г. Терлецька // Стандартизація, сертифікація, якість (Goncharuk V., Kushchevskaya N., Terletska G. (2010). Control of water quality. New national standards for determining toxic indicators. Standardization, certification, quality). — 2010. — № 5. — С. 63—70.
8. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 р. № 1264 — XII // Відом. Верхов. Ради України. — 1991. — № 41. (в редакції станом на 18.11.2012 року) (Environmental Protection Law of Ukraine dated 25.06.1991. № 1264 — XII // Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine. — 1991. — № 41. (ineditionas of 18.11.2012 year)).
9. Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами: Затв. постановою КМ України від 25.03.99 р. № 465 (Rules of surface water pollution in verse waters: approved. Cabinet of Ministers of Ukraine from 03.25.99 g. № 465.).
10. ДСТУ EN 12255 — 6:2008 Станції очищення стічних вод. Частина 6. Процеси очищення стічних вод ак-

- тивним мулом (EN 12255 — 6:2002, IDT). — Введ. 01.01.2010. — К.: Держстандарт України (EN 12255 — 6: 2002. Waste water treatment plants — Part 6: Activated sludge process).
11. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування — ДБН В. 2.5 — 75:2013 [Чинний від 2014-01-01]. — К.: Міністерство регіон. розвитку, будівництва та ЖКГ України (Sewerage. External network and facilities. The main provisions of the design — DBN V. 2.5 — 75: 2013 [Effective as of 2014-01-01]. — К.: Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine), 2012. — 194 с/р.
 12. Шатохіна Ю. Контроль функціонування аеротенку за фізичними показниками нитчастих бактерій / Ю. Шатохіна // Метрологія та прилади (Shatokhina Yu. (2013). The control operation of the aeration tank by physical indicators filamentous. Metrology and instruments). — 2013. — № 2 (40). — С/Р. 60—63.
 13. Бляшина М.В. Анаеробно-аеробне очищення міських стічних вод з використанням волокнистого носія: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец.05.17.21 «Технологія водоочищення» / М.В.Бляшина. — К. (Blyashina M. anaerobic and aerobic treatment of urban wastewater using fiber media: Abstract to dissertation for the degree of PhD.: spec.05.17.21 «Water purification technology» / M.V. Blyashyna. — К.), — 2015. — 20 с/р.
 14. Жукова В.С. Очищення стічних вод від сполук азоту з використанням іммобілізованих мікроорганізмів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец.05.17.21 «Технологія водоочищення» / В.С. Жукова. — К. (Zhukova V. Wastewater treatment from compounds of nitrogen using immobilized microorganisms: Abstract to dissertation for the degree of PhD.: spec.05.17.21 «Water purification technology» V.S. Zhukova. — К.), — 2013. — 19 с/р.
 15. РНД 31-05-2007. Методичні рекомендації з виконання гідробіологічного аналізу активного мулу аеротенків / Міністерство з питань житлово-комунального господарства України. — К. (BID 31-05-2007. Guidelines the implementation of hydrobiological analysis of activated sludge aerotanks / Ministry of Housing Ukraine. — К.), — 2007. — 14 с/р.
 16. Загальнодержавна цільова програма «Питна вода України» на 2011–2020 роки: затверджено Законом України № 2455-IV від 3 березня 2005 р // Уряд. кур'єр. — 2005. — 13 квітня — Орієнтир (The targeted national program «Drinking Water of Ukraine» for 2011-2020, approved by the Law of Ukraine № 2455-IV of March 3, 2005 // Government Courier. — 2005-April 13 — Oriyentyr. — № 14. — Р. 1.). — № 14. — С/Р. 1.
 17. РНД 03-05-2002. Методика виконання вимірювань масової концентрації завислих речовин. — Державний комітет України з питань житлово — комунального господарства. — К. (BID03 — 05 — 2002. Methods of measuring of mass concentration of suspended solids. — State Committee of Ukraine for housing — communal services. — К.), — 2004. — С. 31—40.
 18. Шатохіна Ю.В. Дослідження кореляції між показниками стічної води для оперативного контролю ХСК і завислих речовин [Електронний ресурс] / Ю.В. Шатохіна, О.В. Ковальов // Енергетика і автоматика. — К.: Національний університет біоресурсів і природокористування України (Shatokhina Yu, Kovalev A. (2014). Study of correlation between indicators of wastewater for operational control of COD and suspended solids. Power engineering and automatics. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine). — 2014. — № 2 — С/Р. 50—60. — Режим доступу: <http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eia-2014-2-9.pdf>.
 19. Шатохіна Ю.В. Якість процесу очищення стічних вод як функція складу вхідного потоку / Ю.В. Шатохіна, Л.М. Клінцов, О.М. Шкінь, Н.С. Мазук // Технологический аудит и резервы производства (Shatokhina Yu., Klintsov L., Shkin A., Mazuk N. (2013). Quality of the process of wastewater treatment as a function of composition the input stream. Technology audit and production reserves). — 2013. — № 1/1(9). — С/Р. 36—38.
 20. Стрикаленко Т.В. Обеззараживание в системе реализации плана ВОЗ по обеспечению безопасности воды / Т.В. Стрикаленко, В.Ф. Мариевский, Ю.В. Нижник, Т.Ю. Нижник, А.И. Баранова // Водопостачання та водовідведення (Strikalenko T., Maryevskyy V., Nyzhnyk Yu., Nyzhnyk T., Baranova A. (2014). Decontamination in the implementation of Plan WHO water safety. Water supply and sewage). — К.: 2014. — № 5. — С/Р. 27—34.
 21. Guidelines for Drinking-Water Quality. // 3th Edition Incorporating the 1-st and 2-nd Addenda. — Vol. 1: Recommendations. — Geneva, Switzerland: WHO, 2008. — 668 p.
 22. Guidelines for Drinking-Water Quality. 4-th Edition. — Vol. 1: Recommendations. — Geneva, Switzerland: WHO, 2011. — 564 p.
 23. Орестов Е. О новейших тенденциях в водоподготовке. / Е. Орестов // Вода и водоочистные технологий. — К. (Orestov E. About the new esttrends in water preparation. Water and wastewater treatment technologies), 2014. — № 3. — С/Р. 14—18.
 24. ДСТУ ISO 7393-1-2003 Якість води. Визначання незв'язаного та загального хлору. Частина 1. Титриметричний метод із застосуванням N, NI — діетил — 1,4 — фенілендіаміну (ISO 7393 - 1 : 1985, IDT). — Введ. 01.07.2004. — К.: Держспоживстандарт України (ISO 7393-1:1985. Water quality — Determination of free chlorine and total chlorine — Part 1: Titrimetric method using N, N-diethyl-1,4-phenylenediamine). — 14 с/р. ■

Отримано / received: 08.09.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Г.І. Хімичевою (Україна).
Prof. G.I. Khymycheva, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

ХАРКІВСЬКА ФІЛІЯ ДП «УкрНДНЦ»

Харківська філія ДП «Український і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» запрошує державних повірників, повірників метрологічних служб підприємств та організацій, фахівців калібрувальних, випробувальних та вимірювальних лабораторій, керівників та фахівців метрологічних служб підприємств, а також спеціалістів, які працюють у напрямках стандартизації, сертифікації та управління якістю, пройти курс підвищення кваліфікації. (Ліцензія Міністерства освіти і науки України Серія АЕ № 636067. Дата видачі ліцензії — 10.03.2015 р.). Після закінчення курсу слухачі отримують посвідчення або посвідчення з сертифікатом ДП «УкрНДНЦ».

Заняття проводяться: на базі підприємств-замовників за узгодженими напрямками і вартістю навчання;
на базі Харківської філії ДП «УкрНДНЦ» згідно з планом набору слухачів.

План набору слухачів на 2016 рік

Ч/ч	Курс	Період навчання
1. Підвищення кваліфікації фахівців повірочних та калібрувальних лабораторій з повірки та калібрування:		
1.1	ЗВ геометричних величин	28.03 — 08.04; 05.12 — 16.12
1.1.1	спеціалізованих ЗВ геометричних величин на залізничному транспорті	28.03 — 01.04; 05.12 — 09.12
1.1.2	колієвимірювальних шаблонів	
1.1.3	шаблонів вагонного господарства	
1.2	ЗВ механічних величин	16.05 — 27.05
1.2.1	ЗВ маси	
1.2.2	локомотивних швидкостемірів	
1.3	ЗВ маси, об'єму, місткості та витрати	16.05 — 27.05; 04.07 — 15.07
1.4	ЗВ температури, тиску, витрати	14.03 — 25.03; 14.11 — 25.11
1.4.1	ЗВ температури, тиску	
1.5	ЗВ електричних величин	08.02 — 19.02; 19.09 — 30.09
1.5.1	ЗВ електричних величин на залізничному транспорті	08.02 — 12.02; 19.09 — 23.09
1.6	ЗВ радіотехнічних величин	08.02 — 19.02; 19.09 — 30.09
1.6.1	ЗВ радіотехнічних величин на залізничному транспорті	08.02 — 12.02; 19.09 — 23.09
*Вартість навчання з ПДВ: за 1 тиждень — 2 496,00 грн.; за 2 тижні — 3 792,00 грн.		
2. Підвищення кваліфікації фахівців за курсами:		
2.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві	08.02 — 19.02; 11.04 — 22.04; 13.06 — 24.06; 17.10 — 28.10
2.1.1	Забезпечення єдності вимірювань на підприємстві (для метрологів з досвідом роботи)	13.06 — 17.06
2.2	Метрологічна експертиза технічної документації	11.04 — 22.04; 13.06 — 24.06; 17.10 — 28.10
2.3	Забезпечення єдності вимірювань в закладах охорони здоров'я	11.04 — 15.04; 13.06 — 17.06; 17.10 — 21.10
2.4	Забезпечення єдності вимірювань ВК ВІС та АСК ТП. Метрологічний контроль ВК	11.04 — 22.04; 13.06 — 24.06; 17.10 — 28.10
2.5	Забезпечення компетентності калібрувальних лабораторій підприємств	13.06 — 17.06
2.6	Забезпечення єдності вимірювань при проведенні контролю технічного стану транспортних засобів	У міру комплектування, 1 тиждень
2.7	Забезпечення обліку кількості та контролю якості вугілля при прийманні на підприємствах	
2.8	Розроблення і валідація методик вимірювань та випробувань. Оцінка похибки та невизначеності вимірювань	08.02 — 12.02; 14.11 — 18.11
2.9	Технічне регулювання в Україні. Оцінювання відповідності продукції	25.01 — 29.01; 12.09 — 16.09
2.10	Розробка, впровадження, забезпечення функціонування та проведення внутрішнього аудиту систем управління якістю	18.01 — 22.01; 24.10 — 28.10
2.11	Стандартизація, розробка та впровадження нормативних документів	25.01 — 29.01; 12.09 — 16.09
2.12	Тепловізійні вимірювання. Тепловізійні методи контролю і діагностика	01.02 — 05.02; 28.11 — 02.12
2.13	Забезпечення єдності вимірювань та проведення випробувань в електротехнічних лабораторіях	
2.13.1	Проведення вимірювань та випробувань електротехнічними лабораторіями	
2.14	Забезпечення компетентності повірочних лабораторій	31.10 — 04.11
2.15	Вимоги до калібрувальних та випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Внутрішній аудит в лабораторіях	29.02 — 04.03; 04.07 — 08.07; 03.10 — 07.10; 19.12 — 23.12
2.15.1	Вимоги до калібрувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Оцінювання невизначеності вимірювань	
2.15.2	Вимоги до випробувальних лабораторій відповідно до ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Оцінювання невизначеності вимірювань	
2.16	Підготовка підприємств до проведення метрологічного нагляду	31.10 — 04.11
*Вартість навчання з ПДВ: за 1 тиждень — 2 496,00 грн.; за 2 тижні — 3 792,00 грн.		
3. Тематичні семінари:		
3.1	Особливості забезпечення єдності вимірювань в сучасних умовах. Вимоги Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»	09.02 — 10.02; 12.04 — 13.04; 14.06 — 15.06; 18.10 — 19.10 *Вартість з ПДВ — 1 266,00 грн.
3.2	Стандартизація. Актуальні питання сьогодення. Вимоги Закону України «Про стандартизацію»	26.01 — 27.01; 13.09 — 14.09 *Вартість з ПДВ — 792,00 грн.
4. Підготовка кандидатів в аудитори:		
4.1	Підготовка кандидатів в аудитори з оцінки відповідності продукції за технічними регламентами (1-й модуль)	25.01 — 29.01; 12.09 — 16.09 *Вартість з ПДВ — 2 520,00 грн.
4.2	Підготовка кандидатів в аудитори з оцінки відповідності продукції за технічними регламентами (2-й модуль)	У міру комплектування груп, 4 дні *Вартість з ПДВ — 2 016,00 грн.
*Вартість навчання подано на 31.08.15 р. і може бути змінено		

На замовлення підприємств:

- проводимо комплектування додаткових груп;
- надсилаємо інформаційні листи з тематикою запланованих курсів навчання;
- розробляємо нові курси з урахуванням потреб замовника.

61002, м. Харків, вул. Мироносицька, 40, кімн. 3;
 моб. тел: 050-403-84-90; тел./факс: (057) 752-00-89, 752-00-69; e-mail: hf_ukmdnc@i.ua
 Навчально-методичний відділ