

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

А.Я. Недосєка (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосєка

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
м. Київ

В.Л. Венгринович

Інститут прикладної фізики НАН Білорусі, Мінськ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща

М.Л. Казакевич

Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського

НАН України, м. Київ

О.М. Карпаш

Івано-Франківський нац. техн. університет нафти і газу

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський,

В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН

України, м. Львів

Г.І. Прокопенко

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова

НАН України, м. Київ

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка

НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і

природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2021

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія: 960 грн. за річний комплект з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 960 грн. за річний комплект (випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до архіву журналу).

За зміст рекламних матеріалів редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ЦИРУЛЬНИК О.Т., КРЕТ Н.В., ЗВІРКО О.І., НИКИФОРЧИН Г.М. Розроблення методу оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності магистральних трубопроводів з експлуатаційним макророзширенням..... 3

ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЯВОРСЬКИЙ І.М., МАЦЬКО І.Й., ЛИЧАК О.В., ТРОХИМ Г.Р., ДЗЕРИН О.Ю., СТЕЦЬКО І.Г. Пристрої для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх зародження при визначенні технічного стану механізмів 8

ГИЖКО Ю.І., ГОЛОВКО В.М., ГУТОРОВА М.С., ЗВАРИЧ В.М., КОХАНЄВИЧ В.П., КУДРЯ С.О., МИСЛОВИЧ М.В., ОСТАПЧУК Л.Б. Підвищення надійності та подовження ресурсу вітроустановок за рахунок регулюючих засобів та систем діагностики, гармонізованих з європейськими стандартами..... 17

ЧЕКУРІН В.Ф., ПОНОМАРЬОВ Ю.В., ПРИТУЛА М.Г., ХИМКО О.М. Підхід до автоматизації управління газотранспортною системою України..... 23

БАБАК В.П., КУЦ Ю.В., БОГАЧЕВ І.В., ХАЙДУРОВ В.В., ЗВАРИЧ В.М., МИСЛОВИЧ М.В., ЩЕРБАК Л.М., ГИЖКО Ю.І., ГУТОРОВА М.С., ОСТАПЧУК Л.Б. Розроблення методу, методики та засобів контролю елементів будівельних машин та металевих конструкцій з використанням магнітострикційного ефекту..... 32

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

МИНАКОВ С.М., УЧАНІН В.М. Моніторинг напруженого стану мостової пролітної споруди під час монтажу методом насунання 40

ПОЧАПСЬКИЙ Є.П., КЛИМ Б.П., МЕЛЬНИК Н.П., ТОЛОПКО Я.Д., ДОЛІШНІЙ П.М., ВЕЛИКИЙ П.П. Портативні засоби діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами пружних хвиль різної природи 45

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

БАГЛАЙ А.В. Використання особливостей технології та режимів роботи прокатних клітей з діагностичною метою 50

ХРОНІКА

Міжнародна конференція «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» 53

ІНФОРМАЦІЯ

Неруйнівний контроль при спорудженні трансаляскінського трубопроводу 56

Атестаційний центр з неруйнівного контролю при ІЕЗ ім. Є.О. Патона..... 59

Програми професійної підготовки МУАЦ на 2021 р. 61

Видання журналу підтримують:

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-78

EDITORIAL BOARD

L.M. Lobanov (Editor-in-Chief),

A.Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),

V.O. Troitskiy (Deputy Editor-in-Chief),

Ie.O. Davydov, S.A. Nedoseka

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv

V.L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk

K. Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry
of NAS of Ukraine, Kyiv

O.M. Karpash

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk, V.R. Skalskiy, V.M. Uchanin
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv

G.I. Prokopenko

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics
of NAS of Ukraine, Kyiv

A.G. Protasov, S.K. Fomichov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute»

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

V.O. Stryzhalo

G.S. Pisarenko Institute for Problems
of Strength of NAS of Ukraine, Kyiv

M.G. Chausov

National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine, Kyiv

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine,
International Association «Welding» (Publisher)

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.

Tel./Fax: +38 (044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration
of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2021

Subscription index 74475.

4 issues per year (issued quarterly), back issues available.

\$72, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$60, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

The editorial board is not responsible
for the content of the promotional material.

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

TSYRULNYK O.T., KRET N.V., ZVIRKO O.I., NIKIFORCHYN G.M. Development of the method for assessment of serviceability and residual life of the main pipelines with service macrodelamination..... 3

YUZEFOVYCH R.M., YAVORSKYI I.M., MATSKO I.Y., LYCHAK O.V., TROKYM G.R., DZERYN O. Yu., STETSKO I.H. Devices for detection of defects at early states of their initiation at determination of technical condition of mechanisms 8

HYZHKO Yu.I., HOLOVKO V.M. HUTOROVA M.S., ZVARYCH V.M., KOHANIEVYCH V.P., KUDRYA S.O., MYSLOVYCH M.V., OSTAPCHUK L.B. Increase of reliability and extension of service life of windpower units due to application of regulation means and diagnostic systems harmonized with the european standards 17

CHEKURIN V.F., PONOMARYOV Yu.V., PRYTULA M.H., KHYMKO O.M. An approach to automation of management of gas transmission system of Ukraine 23

BABAK V.P., KUTS Yu.V., BOGACHEV I.V., KHAIDUROV V.V., ZVARYCH V.M., MYSLOVYCH M.V., SHCHERBAK L.M., HYZHKO Yu.I., HUTOROVA M.S., OSTAPCHUK L.B. Development of the method, procedure and means of control of elements of construction machinery and metal structures using magnetostriction effect..... 32

INDUSTRIAL

MINAKOV S.M., UCHANIN V.M. Monitoring the stressed state of bridge span structure during mounting by sliding method 40

POCHAPSKYI E.P., KLYM B.P., MELNYK N.P., TOLOPKO Ya.D., DOLISHNII P.M., VELYKYI P.P. Portable means for diagnostics of products and elements of structures by the parameters of elastic waves of different nature..... 45

BRIEF INFORMATION

BAGLAY A.V. Use of the features of the technology and operating modes of mill stands for diagnostic purposes 50

NEWS

International Conference «Problems of corrosion and corrosion protection of structural materials» 53

INFORMATION

Non-destructive testing during the construction of the Alaskan pipeline 56

Attestation Center of Non-Destructive Testing of E.O. Paton Electric Welding Institute 59

Professional training programs of the Interdisciplinary Training and Certification Center for 2021 61

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,
Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ТА ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМ МАКРОРОЗШАРУВАННЯМ*

О.Т. Цирульник, Н.В. Крет, О.І. Звірко, Г.М. Никифорчин

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: otsyulnyk@gmail.com

Проведено експертизу дефектності експлуатованих 40 років прямокутних колін/гинів труб компресорної станції газотранспортної системи та лінійної надземної ділянки 30 років експлуатованого магістрального газопроводу–перехід через водні перешкоди в гірській місцевості неруйнівним методом ультразвукового контролю товщини стінок труб з застосуванням товщиноміру з А/В сканом MVX (DakotaUltrasonics). Комплекс діагностичних ознак спричиненого воднем макророзшарування всередині стінки труби магістрального трубопроводу доповнено новою діагностичною електродіагностичною ознакою, а саме поляризаційним опором, за зниженням якого на величину > 30 % можна прогнозувати таке посилення напружено-деформованого стану на зовнішній поверхні труби, яке створює небезпеку виходу макродефекту на поверхню. Розроблено метод оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності труб системи магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням, який враховує роль водню в процесах розвитку такого типу макродефектів, експлуатаційну деградацію металу та використання неруйнівних методів контролю пошкодженості металу всередині труб. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: експлуатаційна деградація, сталі магістральних трубопроводів, діагностичні ознаки макророзшарування

Розшарування трубопровідних сталей є відомою проблемою. Цей тип дефектності може бути пов'язаний з металургійними особливостями отримання труб чи листового прокату, з якого виготовляють труби. Розшаруванню, зокрема, сприяють наявність частинок карбідів та інших неметалевих включень, мікротріщини на міжфазних межах зерен, текстура, смугастість структури, анізотропія пластичної деформації тощо [1, 2]. Важлива роль у їх розвитку належить атомарному водню, який дифундує до дефектів та накопичується у них, рекомбінуючи до молекулярного стану. Це створює надлишковий тиск у порожнині і, відповідно, напруження в її околі, які приводять до подальшого розшарування, змінюючи ступінь дефектності з мікро- на макрорівень. На стадії виготовлення труби це буде металургійний водень.

Макророзшарування може бути пов'язане не лише з металургійними особливостями отримання труб чи листового прокату, але і з умовами експлуатації трубопроводів. Водень, що утворюється у результаті корозійної чи біокорозійної взаємодії металу поверхні труби з ґрунтовим середовищем [3] чи транспортованим продуктом [4], дифундує до дефектів, молізується та накопичується у них, створюючи високий тиск та сприяючи утворенню розшарування та його поширенню. І що вища наводнювальна здатність середовища, то більший ризик прояву руйнування такого характеру.

Напруження, які виникають у металі в результаті інтенсивного наводнювання, можуть бути сумірні з його характеристиками міцності [5], тому руйнування можливе навіть за відсутності зовнішнього навантаження [6].

Посилюють утворення розшарування у трубах чинники, які сприяють декогезії на межі матриця–включення та інтенсифікують наводнювання металу. Це, зокрема, попереднє пластичне деформування, циклічне навантаження та підвищена температура експлуатації тощо.

Діагностування лінійної ділянки магістрального газопроводу з макророзшаруванням. Діагностування проводили ультразвуковим товщиноміром з А/В сканом MVX (Dakota Ultrasonics). Виявлені надзвичайно обширні розшарування на лінійній частині магістрального газопроводу в гірській місцевості. Зокрема, на двох ділянках лінійної надземної частини 30 років експлуатованого магістрального газопроводу – переходах через водні перешкоди у гірській місцевості. В одному випадку (рис. 1, а) макророзшарування виявили тільки у верхній частині труби, однак довжиною 4,5 м, а в іншому (рис. 1, б) – кільцеве розшарування по всьому тілу труби між двома сусідніми кільцевими зварними з'єднаннями, які й обмежили подальший розвиток дефекту. Розміри виявлених розшарувань в обох випадках виходять далеко за допустимі норми [7].

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.

© О.Т. Цирульник, Н.В. Крет, О.І. Звірко, Г.М. Никифорчин, 2020

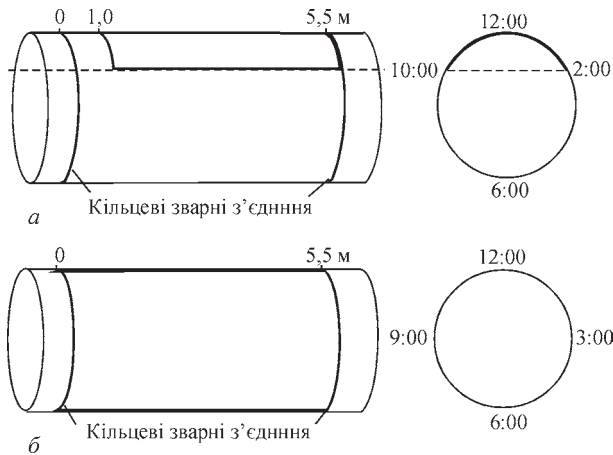


Рис. 1. Окреслені контуром розшарування всередині стінки труб магістрального газопроводу

Діагностування дефектності гину труби відводу газу. Дослідили гин експлуатованої 40 років відвідної від газокompресорної станції труби з зовнішнім діаметром 219 мм і номінальною товщиною стінки 18 мм (рис. 2). Гин розташований у надземній частині, максимальний робочий тиск в трубі 5,5 МПа, температура металу могла сягати 80 °С. Гин труби на 90° виконано холодним способом без термообробки. Матеріал труби – сталь 20.

Причиною діагностування стала поява на зовнішній поверхні труби в розтягнутій зоні гину про-

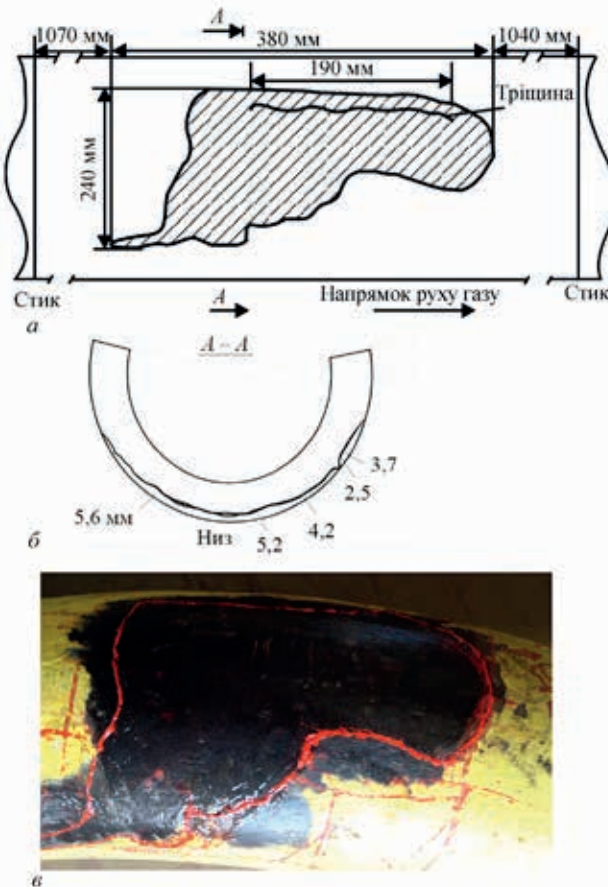


Рис. 2. Вигляд розшарування у стінці гину відвідної труби системи магістральних газопроводів (а), переріз труби з дефектом (б) та фото гину (в)

тяжної тріщини. Однак, це не спричинило розгерметизації трубопроводу, він надалі витримував у цій ділянці робоче навантаження, тому постало питання можливості подальшої безпечної експлуатації цього гину. Тріщина виходить на зовнішню поверхню гину не з контуру розшарування, тобто з вершини, а з середини поверхні розшарування, на значній віддалі від його контуру (приблизно 60 мм). Очевидно, що місце розриву вказує на максимальний напружено-деформований стан у стінці між поверхнею розшарування і зовнішньою поверхнею труби.

Вплив експлуатаційних навантажень на поширення дефекту типу розшарування. Методом гідроопресування проаналізували можливість поширення експлуатаційного розшарування на сусідні ділянки гину. Для цього гин експлуатованої 40 років відвідної від газокompресорної станції труби методом гідроопресування піддали внутрішньому тиску в півтора рази більшому за максимальний робочий, тобто при 8,25 МПа, що відповідає нормам на проведення опресування [8]. Повторний контроль виявив збільшення площі розшарування (рис. 3). Малоімовірно, щоб тріщина поширювалася під таким навантаженням за відсутності в порожнині розшарування тиску газу через вихід тріщини на зовнішню поверхню труби. Тому слід допустити, що у стінці труби сформувалося кілька внутрішніх сепаратних макропорожнин, а за гідроопресування здатні поширюватися лише ті, що закриті в об'ємі стінки гину.

Діагностування дефектності гину труби вузлу заміру газу. Діаметр труби - 426 мм, матеріал – сталь 20. Номінальна товщина труби 12,0 мм. І у цьому випадку виявили на великій площі її зовнішньої поверхні макророзшарування на розтягнутій частині гину (рис. 4). Розшарування розміром близько 800×450 мм охопило сегмент «7...12 год.», розташовується воно в основному ближче до внутрішньої поверхні труби. Однак на останніх стадіях розвитку розшарування з'явилася тенденція

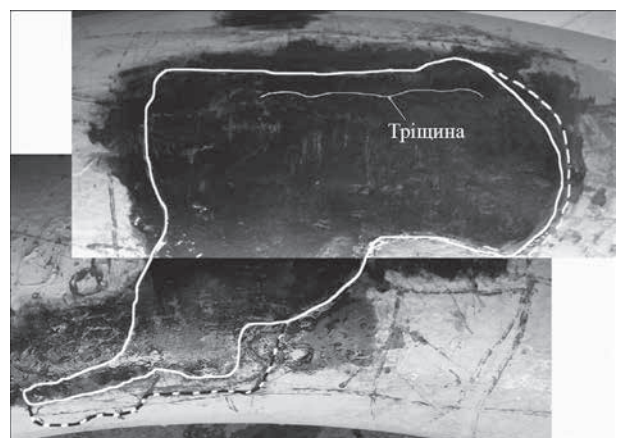


Рис. 3. Розшарування у стінці гину відвідної труби компресорної станції магістральних газопроводів (суцільна лінія) та його поширення після гідроопресування (штрихова лінія)

переміщення його контуру ближче до зовнішньої поверхні, де робочі напруження більші.

Дуже важливо, що повторним обстеженням цього об'єкту через 6 місяців виявили підростання дефекту (рис. 4, площа П). Адже відомо, що наявність дефектів типу розшарування цілком можлива ще на етапах виготовлення гинів труб, при виявленні яких дефектоскопією, за умови перевищення порогу чутливості методу діагностування, відбувається вибракування таких труб [7]. Однак, реальні умови тривалої експлуатації таких об'єктів спричиняють розвиток цих дефектів від мікро- до макророзмірів. Тому обов'язково потрібно встановити експлуатаційні чинники та механізм такого заповільненого підростання дефектів типу розшарування.

Поширення розшарування у стінці гину відвідної труби після гідропресування підтверджує висновок про ризик розвитку мікрodefektів типу розшарування до макророзмірів внаслідок дії експлуатаційних навантажень і актуалізує проблему діагностування

таких об'єктів системи транспорту вуглеводних продуктів з огляду на ризики їх аварійних відмов.

Аналіз напруженого стану труби газопроводу з воднем, ініційованим макророзшаруванням. Прийняли для подальших розрахунків наступні геометричні параметри труби та макрodefektу: зовнішній діаметр 440 мм, товщина стінки труби 18 мм, довжина дефекту уздовж осі труби 700 мм, кут його розхилу у поперечному перерізі «10...2 год.», тобто дефект знаходиться у верхній частині труби. Глибина залягання розшарування складає 4 мм від зовнішньої поверхні. Найбільше напруження на зовнішній поверхні труби буде в центрі відшарованої оболонки (над розшаруванням), тобто відповідати «12 год.» і середині вздовж осі труби, що склало задачу для розрахунку. Прийняли два значення тиску в трубі p , 3 та 7 МПа, враховуючи можливий діапазон робочих тисків у газопроводі. Розглядали різний тиск водню у порожнині p_H , обмеживши його значенням 7 МПа, зважаючи на те, що напруження, спричинені тиском молекулярного водню в дефектах (внутрішніх порожнинах), можуть бути співмірні та вищі за границю витривалості сталі згідно з теоретичними розрахунками та експериментальними даними [9]. В результаті визначали тангенціальні напруження σ_θ , як найважливіші з огляду на порушення цілісності труби, а також еквівалентні напруження σ_{eq} за IV теорією міцності Губера-Мізеса. Характер впливу тиску водню у порожнині стінки труби на рівень тангенціальних та еквівалентних напружень у загальному однаковий. Напруження на зовнішній поверхні труби збільшуються зі зростанням p_H (рис. 5, 6), а на внутрішній – спадають.

Розраховані напруження є досить високими, зважаючи на можливість розриву верхнього шару металу (відшарування) над порожниною. Зокрема, за максимально прийнятого тиску водню 7 МПа вони близькі до границі плинності, для прикладу, ферито-перлітних сталей, що широко застосовуються у газотранспортній мережі. Якщо ж допустити у два рази менші напруження, то вони приблизно відповідатимуть границі втомної витривалості, що теж складає небезпеку руйнування. При цьому високі напруження у металі довкола дефекту обумовлюють об'єднання окремих тріщин та утворення розшарування значної площі. Існує небезпека порушення цілісності верхнього шару металу над макрodefektом за механізмом корозійно-механічного руйнування, коли тріщина розвивається перпендикулярно поверхні розшарування і виходить на зовнішню поверхню труби. Необхідні для цього напруження можуть бути ще меншими, оскільки тріщиностійкість експлуатованого металу може різко знизитися порівняно з вихідним станом, і, крім того, тріщина буде рости у наводненому матеріалі, що істотно впливає на швидкість її поширення [10].

Електрохімічна оцінка деградації механічних властивостей експлуатованої трубної сталі.

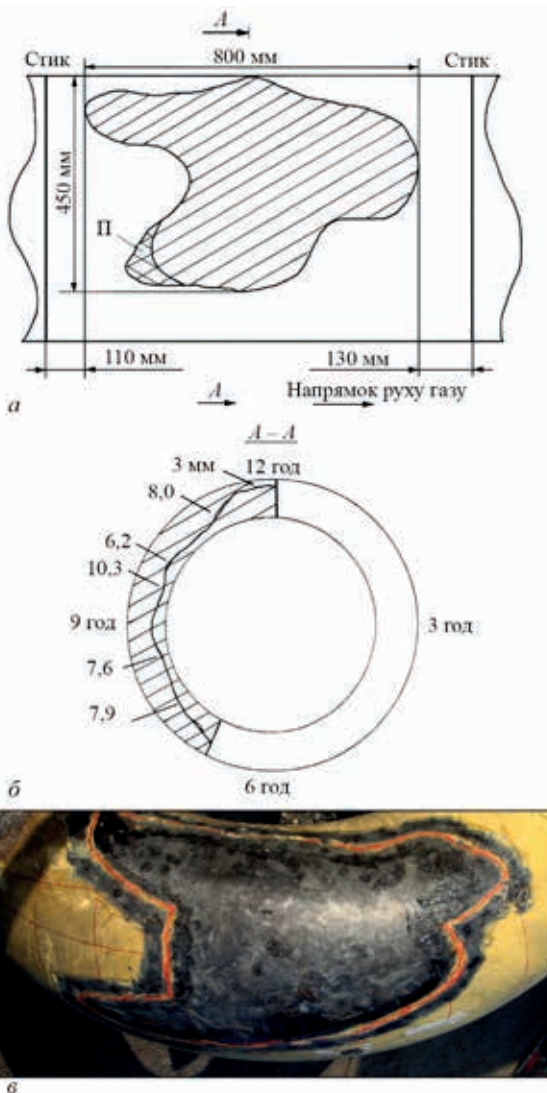


Рис. 4. Вигляд розшарування у стінці гину відвідної труби системи магістральних газопроводів (а) та його поширення впродовж експлуатації (П), а також переріз труби з дефектом (б) та фото гину (в)

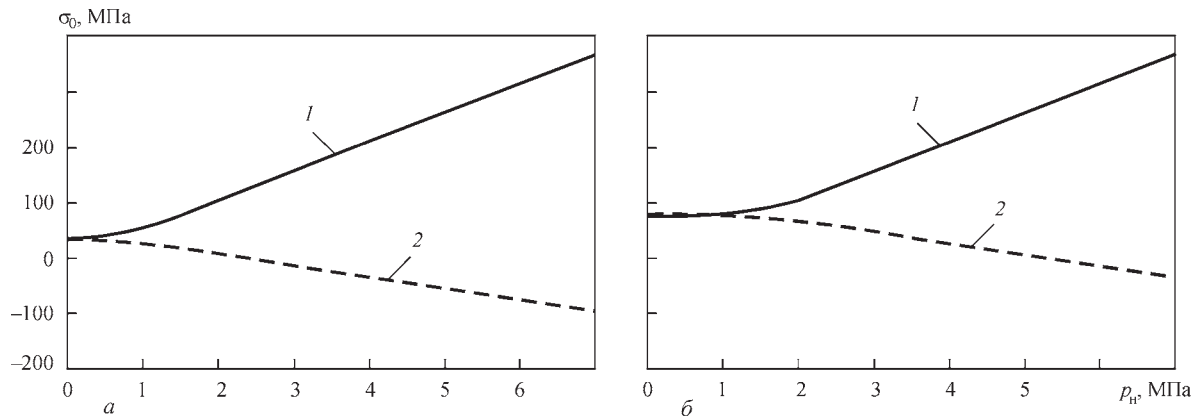


Рис. 5. Залежність тангенціальних σ_0 напружень на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхні труби (точка «12 год.») від тиску водню p_H у порожнині; тиск в трубі $p = 3$ (а) та 7 МПа (б)

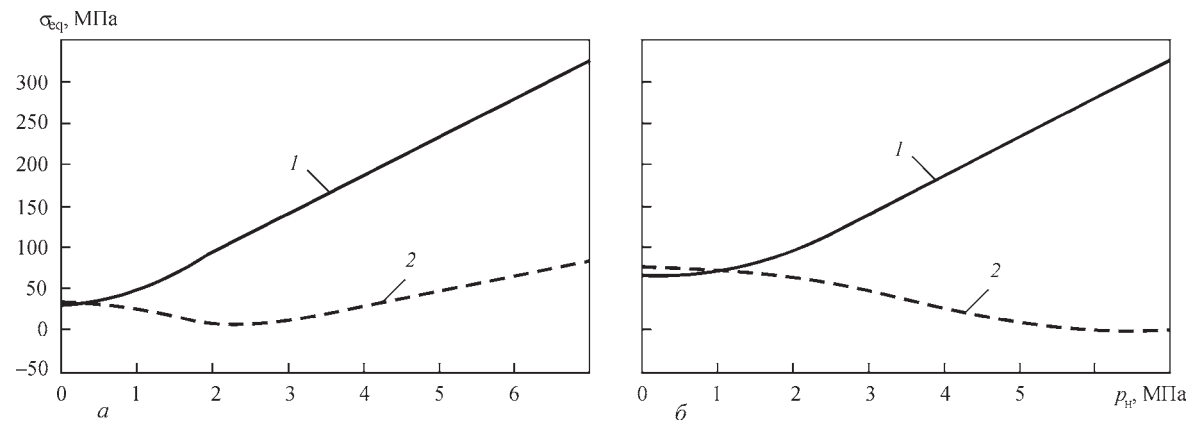


Рис. 6. Залежність еквівалентних σ_{eq} напружень на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхні труби (точка «12 год.») від тиску водню p_H у порожнині; тиск в трубі $p = 3$ (а) та 7 МПа (б)

Електрохімічні характеристики вуглецевої сталі 20 різних ділянок експлуатованого гину відвідної труби газотранспортної системи у 8,55-мілімольному водному розчині NaHCO_3

Ділянка гину труби	Потенціал корозії $E_{\text{корр}}$, В	Густина струму корозії $i_{\text{корр}}$, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Константи Тафеля, В		Поляризаційний опір R_p , Ом $\times\text{cm}^2$
			$-b_c$	b_a	
Пряма	-0,686	2,84	0,100	0,057	5558
Стиснута	-0,690	3,36	0,100	0,057	4698
Розтягнута	-0,695	3,48	0,100	0,057	4536
Над розшаруванням	-0,697	4,30	0,100	0,057	3671

Проаналізували деградацію електрохімічних та механічних властивостей сталі гину відвідної труби газотранспортної системи стосовно можливості застосування неруйнівного електрохімічного методу для оцінювання опору крихкому руйнуванню.

Отримані результати досліджень вказують на корозійну деградацію металу експлуатованого гину труби. При цьому поляризаційний опір R_p металу розтягнутої ділянки на 15...20 %, а металу над розшаруванням біля розриву поверхні – на 30...35 % нижчий, ніж металу прямої ділянки (таблиця), що зумовлено зростанням напружено-деформованого стану.

Таким чином, комплекс діагностичних ознак спричиненого воднем макророзшарування всередині стінки труби магістрального трубопроводу доповнено новою діагностичною електрохімічною ознакою, а саме поляризаційним опором.

Звідси, застосовуючи неруйнівний електрохімічний метод контролю поляризаційного опору R_p

зовнішньої поверхні труби у польових умовах, за його зниженням на величину $> 30\%$ можна прогнозувати таке посилення напружено-деформованого стану на зовнішній поверхні труби, яке створює небезпеку виходу макродефекту на поверхню.

На основі проведених досліджень розроблено технологічний регламент, який включає проведення експертизи на наявність та розміри макророзшарування, вимірювання електрохімічного показника стану металу – поляризаційного опору, а також оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням. Проведено його апробацію на підприємстві «Прикарпаттрансгаз».

Висновки

Виявлено дефекти типу розшарування у стінці труби лінійної надземної ділянки 30 років експлуатованого магістрального газопроводу в гір-

ській місцевості, а також розшарування у колінах відвідної труби і труби вузлу заміру газу газокомпресорної станції. Повторним обстеженням (через 6 місяців) виявлено підростання дефекту. Це дає підстави зробити висновок, що саме реальні умови експлуатаційного навантаження таких об'єктів спричиняють розвиток цих дефектів від мікро- до макророзмірів. Цей висновок підтверджується підростанням дефекту під час гідропресування.

Методом граничних інтегральних рівнянь розраховано еквівалентні та тангенціальні напруження на зовнішній поверхні труби в центрі над макророзшаруванням залежно від робочого тиску природного газу та тиску водню у дефекті певної геометрії. Вони суттєві, що вказує на небезпеку руйнування верхнього над макродефектом шару металу за різними механізмами: пластичного розриву перетинки, втомного та корозійно-механічного руйнування.

Запропоновано нову діагностичну електрохімічну ознаку досягнення граничного технічного стану труби з розшаруванням, а саме поляризаційний опір, за зниженням якого на величину > 30 % можна прогнозувати таке посилення напружено-деформованого стану на зовнішній поверхні труби, яке створює небезпеку виходу макродефекту на поверхню. На її основі розроблено метод оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності труб системи магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням.

Розроблено технологічний регламент використання запропонованого методу оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням та проведено його апробацію на підприємстві «Прикарпаттрансгаз».

Список літератури

1. Baldi, G., Buzzichell, G. (1978) Critical stress for delamination fracture in HSLA steels. *Metal Science*, **12**, 459–472.
2. Bourell, D.L., Sherby O.D. (1983) Texture induced cleavage delamination of warm-rolled low carbon steels. *Met. Trans. A.*, **14A**, **12**, 2563–2566.

3. Крыжанивский Е., Никифорчин Г., Полутренко М. (2013) Коррозионно-водородная деградация газотранспортных систем и способы ее предупреждения. *Сб. докл. Межд. научно-техн. конф. «Надежность и эффективность газотранспортных систем»*, Яремче, 2013, 117–128.
4. Цирульник О.Т., Слободян З.В., Звірко О.І. та ін. (2008) Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **44**(5), 29–37.
5. Андрейків О.Є., Гембара О.В. (2008) *Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах*. Київ, Наукова думка.
6. Turnbull, A. (1993) Modeling of environment assisted cracking. *Corrosion Science*, **34**(6), 921–960.
7. (2007) Specification for line pipe steel API5L, API.
8. СНиП 2.05.06-85. *Магістральні трубопроводи*.
9. Crolet J.L., Maisonneuve G. (2000) Construction of a universal scale of severity for hydrogen cracking. *CORROSION 2000* (26–31 March, Orlando, Florida). Houston TX: NACE International, 2000, Paper № 00127.
10. Андрейків О.Є., Гембара О.В., Цирульник О.Т., Ниркова Л.І. (2012) Оцінювання залишкової довговічності ділянки магістрального газопроводу «Уренгой–Помарі–Ужгород». *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **48**(2), 103–110.

References

1. Baldi, G., Buzzichell, G. (1978) Critical stress for delamination fracture in HSLA steels. *Metal Sci.*, **12**, 459–472.
2. Bourell, D.L., Sherby O.D. (1983) Texture induced cleavage delamination of warm-rolled low carbon steels. *Met. Trans. A.*, **14A**, **12**, 2563–2566.
3. Kryzhanivskiy, E., Nikiforchin, G., Polutrenko, M. (2013) Corrosion-hydrogen degradation of gas transportation systems and methods of its prevention. *In: Proc. of Int. Sci.-Techn. Conf. on Reliability and Effectiveness of Gas Transportation Systems* (Yaremche, 2013), 117–128.
4. Tsyryulnyk, O.T., Slobodyan, Z.V., Zvirko, O.I. et al. (2008) Impact of service of X52 steel on corrosion process in a model solution of gas condensate. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **44**(5), 29–37 [in Ukrainian].
5. Andreikiv, O.E., Gembara, O.V. (2008) Fracture mechanics and fatigue life of metallic materials in hydrogen-containing environments. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
6. Turnbull, A. (1993) Modeling of environment assisted cracking. *Corrosion Sci.*, **34**(6), 921–960.
7. (2007) Specification for line pipe steel API5L, API.
8. SNiP 2.05.06-85. Main pipelines.
9. Crolet, J.L., Maisonneuve, G. (2000) Construction of a universal scale of severity for hydrogen cracking. *CORROSION 2000* (26–31 March, Orlando, Florida). Houston TX: NACE International, 2000, Paper 00127.
10. Andreikiv, O.E., Gembara, O.V., Tsyryulnyk, O.T., Nyrkova, L.I. (2012) Evaluation of residual life of a section of the main pipeline «Urengoi–Pomary–Uzhgorod». *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **48**(2), 103–110 [in Ukrainian].

DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR ASSESSMENT OF SERVICEABILITY AND RESIDUAL LIFE OF THE MAIN PIPELINES WITH SERVICE MACRODELAMINATION

O.T. Tsyryulnik, N.V. Kret, O.I. Zvirko, G.M. Nikiforchin

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: otsyryulnyk@gmail.com

Expert examination of defectiveness of rectangular elbows/bends of pipes in a compressor station of gas transportation system after 40 years of operation and of a linear above-ground section of the main gas pipeline-crossing over water obstacles in a mountain area after 30 years of operation was performed by nondestructive method of ultrasonic testing of pipe wall thickness with application of thickness meter with A/B scan MVX (DakotaUltrasonics). A set of diagnostic indications of hydrogen-induced macrodelaminations inside the pipe wall of a main pipeline was complemented by a new diagnostic electrochemical feature, namely polarization resistance. Its lowering by > 30 % allows prediction of such an enhancement of the stress-strain state on the pipe outer surface, which creates a risk of the macrodefect reaching the surface. A method was developed for evaluation of serviceability and residual life of pipes in a system of the main pipelines with service macrodelaminations, which allows for hydrogen role in the processes of development of such a type of macrodefects, service degradation of metal and application of nondestructive testing methods for controlling the level of metal damage inside the pipes. 10 Ref., 1 Table, 6 Fig.

Keywords: service degradation, steels of the main pipelines, diagnostic features of macrodelamination

Надійшла до редакції 09.07.2020

ПРИСТРОЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА РАННІХ СТАДІЯХ ЇХ ЗАРОДЖЕННЯ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЗМІВ*

Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, І.Й. Мацько, О.В. Личак, Г.Р. Трохим, О.Ю. Дзерин, І.Г. Стецько

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

Вібраційний сигнал є носієм інформації про певні дефекти системи, має властивості повторюваності та стохастичності. Ці його властивості дають можливість описати і дослідити математичну модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП). Імовірнісні характеристики ПКВП відображають модуляційну взаємодію стохастичної і детермінованої складових вібрацій, яка виникає в разі появи дефектів. Взаємний ПКВП-аналіз вібросигналів, використання введених функцій когерентності дозволяють виявляти дефекти, класифікувати їх типи, а також визначити їх розташування. Поєднання багаточкового відбору вібраційних сигналів, методів взаємного статистичного ПКВП-аналізу та програмного забезпечення цифрової обробки сигналів у розробленому компактному пристрої неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» дає можливість підвищити ефективність вібродіагностики обертових вузлів технологічних об'єктів під час експлуатації без зміни їх штатних режимів функціонування. Проведений моніторинг турбоагрегатів ТЕС розробленими методами дав змогу виявити ряд типових дефектів опорних підшипників ковзання, що було підтверджено під час ремонту обертових вузлів. Бібліогр. 20, рис. 17.

Ключові слова: неруйнівний контроль, вібрація, періодично корельований випадковий процес, спеціалізовані пристрої, дефект, підшипник ковзання

Застосування діагностики і прогнозування стану досліджуваної структури на основі даних вібродіагностики дає можливість суттєво знизити видатки на обслуговування об'єктів чи процесів та надає необхідну інформацію для прийняття обґрунтованих рішень з метою підвищення їх безпеки, продуктивності, надійності та ремонтоздатності [1–3]. Перехід від контролю працездатності технічних об'єктів до раннього діагностування дефектів, що зароджуються, призводить до потреби встановлення таких діагностичних ознак, які є чутливими до незначних відхилень параметрів технічного стану від норми. Власне виявлення несправностей (дефектів), котрі ще не призвели до катастрофічних наслідків, а також визначення ступеня розвитку дефекту і його параметрів можливі лише на основі детального дослідження структури вібраційних сигналів та її зв'язку з кінематикою і динамікою механізмів [4–6].

Вібраційний сигнал є важливим інформативним діагностичним інструментом, оскільки на основі отриманої та обробленої інформації можна оптимізувати планування поточного і капітального ремонту, збільшити міжремонтний інтервал, зменшити витрати на закупівлю запчастин та матеріалів [7, 8]. Тому проведення періодичної діа-

гностики для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх зародження при визначенні технічного стану механізмів є актуальною задачею.

Пристрій неруйнівного контролю. Відбір вібраційного сигналу та застосування методів періодично нестационарних випадкових процесів та цифрової обробки сигналів для ранньої діагностики обертових механізмів поєднано у розробленому у відділі методів та засобів відбору та обробки діагностичних сигналів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України спеціалізованому пристрої неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» (рис. 1).

Спеціалізований пристрій неруйнівного контролю є портативною системою відбору та обробки вібраційних сигналів методами ПКВП в широкому діапазоні частот з метою виявлення і попере-



Рис. 1. Спеціалізований пристрій неруйнівного контролю «Компакт-Вібро». Загальний вигляд

*За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин» («Ресурс»), отриманих за 2016–2020 рр.

Юзефович Р.М. – <http://orcid.org/0000-0001-5546-453X>, Яворський І.М. – <http://orcid.org/0000-0003-0243-6652>,
Мацько І.Й. – <http://orcid.org/0000-0001-5499-5486>, Личак О.В. – <http://orcid.org/0000-0001-5559-1969>,
Трохим Г.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-2472-1676>, Дзерин О.Ю. – <http://orcid.org/0000-0002-8768-0218>

© Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, І.Й. Мацько, О.В. Личак, Г.Р. Трохим, О.Ю. Дзерин, І.Г. Стецько, 2020

дження аварійних ситуацій на механізмах з обертовим або обертово-поступальним рухом.

Пристрій неруйнівного контролю для ранньої діагностики обертових механізмів змонтований в металевому корпусі розміром 165×145×30 мм. Всі електронні компоненти встановлені на двох друкованих платах, які закріплені до основи корпусу на монтажних стійках. Для оперативності в ремонті та налагодженні з'єднання між друкованими платами проведено з використанням монтажних колодок та роз'ємів. Для мінімізації наводок від електромагнітних завад використовуються екрановані кабелі, доріжки входних кіл на друкованій платі є мінімальної довжини, по шині живлення використовуються як фільтри танталові конденсатори. Внутрішній вигляд змонтованого та налаштованого пристрою неруйнівного контролю для ранньої діагностики обертових механізмів показаний на рис. 2.

Пристрій складається з таких основних частин: п'єзокерамічного давача віброприскорення; перетворювача заряду; вихрострумowego давача; схеми узгодження вихреструмowego давача; керованого фільтра нижніх частот; інтеграторів; генератора сигналу з комутатором та декодером; аналого-цифрового перетворювача; DC-DC перетворювача.

Давачем віброприскорення є п'єзокерамічний акселерометр типу АВС-117 (рис. 3), власна резонансна частота якого знаходиться в межах 100 кГц. Давач виготовлений в металевому мініатюрному корпусі з неіржавіючої сталі. Під'єднуючий кабель виконаний з високотемпературних вібростійких матеріалів. Матеріал п'єзокераміки – ЦТС 83Г (цирконат титанат свинцю). Кріплення давача до досліджуваного об'єкту відбувається за допомогою шпильки М5 або магніту. Довжина з'єднуючого кабелю становить біля 9 м і суттєво



Рис. 2. Спеціалізований пристрій неруйнівного контролю «Компакт-Вібро». Внутрішній вигляд



Рис. 3. П'єзокерамічний акселерометр типу АВС-117 разом із з'єднуючим кабелем

не впливає на характер амплітудної та амплітудно-частотної характеристики.

Основні параметри п'єзокерамічного акселерометра:

коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по напрузі, мВс ² /м	0,30±0,045
коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по заряду, пКл/с ² /м	1,60±0,48
ємність, не більше, пФ	2200±330
власна резонансна частота, не менше, кГц	40
нерівномірність амплітудно-частотної характеристики в діапазоні частот, Гц±1дБ	від 100 до 5000
основна похибка, не більше, %	± 10

Структурна схема спеціалізованого пристрою наведена на рис. 4 [11].

Сигнал, пропорційний величині віброприскорення, поступає на вхід перетворювача заряду з коефіцієнтами передачі 1,5 (10 мВ/г) та з частотним діапазоном 0,3 Гц...12 кГц (-3 дБ), згодом на підсилювач із регульованим коефіцієнтом підсилення, що дає можливість забезпечити номінальний динамічний діапазон роботи аналого-цифрового перетворювача, а також компенсує розбіжність чутливості давачів віброприскорення. Частотний діапазон входного сигналу за допомогою керованого фільтра нижніх частот (Баттерворта 5-го порядку) розділений на 4 піддіапазони. Для уникнення паразитних складових у спектрі сигналу використано антилайзинговий фільтр. Чутливість перетворювача заряду, частотний піддіапазон, а також частота зрізу низькочастотного фільтру задається через порт вводу-виводу аналого-цифрового перетворювача. Для розділення корисного сигналу від комутаційних завад використано фільтр Баттерворта 8-го порядку.

Затухання сигналу на подвійній частоті зрізу фільтру становить не менше -48 дБ. Для розширення експлуатаційних можливостей за допомогою електронного інтегратора отримано сигнал віброшвидкості, амплітудно-частотна характеристика якого лінійна в діапазоні 1...500 Гц (0 дБ). На екран монітора виводяться сигнали кореляцій-

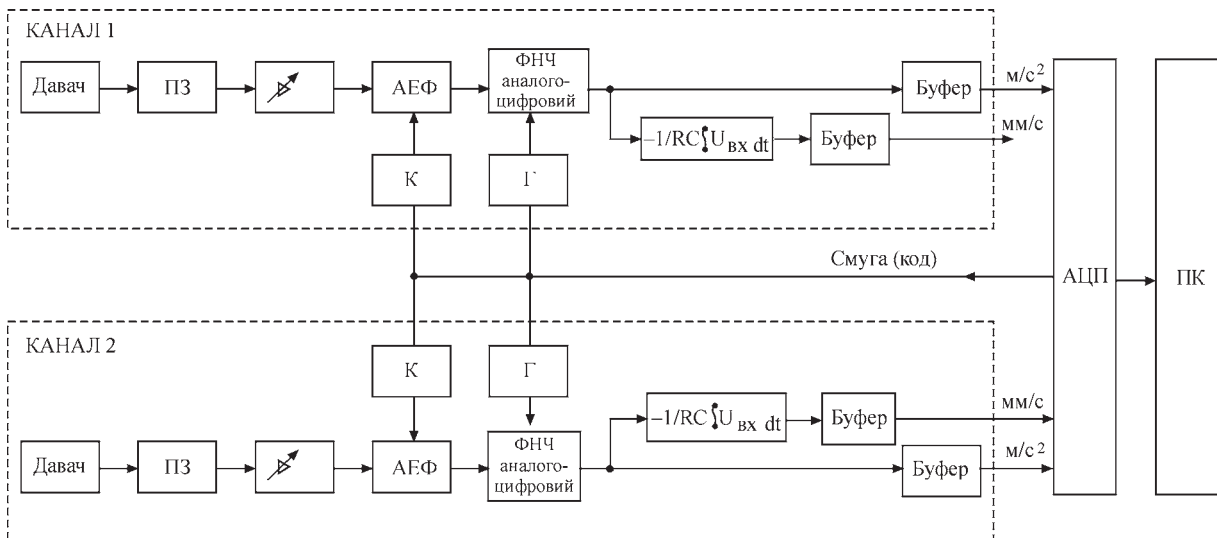


Рис. 4. Спеціалізований пристрій неруйнівного контролю «Компакт-Вібро». Структурна схема

ної функції, спектральної густини сигналу та середньоквадратичні значення отриманих величин віброприскорення чи віброшвидкості. Живлення пристрою здійснюється від шини USB персонального комп'ютера. Струм споживання в двоканальному режимі не перевищує 70 мА.

Покомпонентна функція когерентності. Однією з типових діагностичних задач є задача просторового та векторного аналізів вібрацій – дослідження форм коливань валів великих стаціонарних агрегатів на частоті обертання ротора та її гармонік. Для розв'язання такої задачі слід визначати та аналізувати амплітудний і фазовий спектри вібрацій сусідніх опор вала, оскільки різниця фаз коливань опор на частоті обертання ротора та її гармонік містить інформацію про форму коливань вала. При розв'язанні вказаних діагностичних задач доцільно використовувати взаємний спектральний аналіз сигналів, виміряних в різних точках контролю [6, 9].

У роботі [10] була введена покомпонентна функція когерентності двох сигналів:

$$\gamma_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{|f_{kl}^{(\xi)}(\omega)|}{[f_{kk}^{(\xi)}(\omega)f_{ll}^{(\xi)}(\omega)]^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

отриманих за допомогою лінійних перетворень одного і того самого періодично нестационарного випадкового сигналу, що дорівнює покомпонентній функції автокогерентності цього сигналу. А це означає, що вона не змінюється при лінійних перетвореннях [10]. Підкреслимо, що встановлена властивість величини має важливе значення при її використанні в задачах багатоканальних систем передачі інформації, шляхів поширення сигналів і т. п.

Легко бачити, що при $k = 1$ величина (1) дорівнює одиниці, тобто в цьому випадку введена функція когерентності при лінійних перетворен-

нях має таку саму властивість, що й функція когерентності стаціонарно зв'язаних сигналів [10, 11].

Для амплітудно-модульованих сигналів:

$$\begin{aligned} \xi(t) &= \mu(t)\cos\omega_0 t, \\ \eta(t) &= \nu(t)\cos\omega_0 t, \end{aligned}$$

де $\mu(t)$ та $\nu(t)$ – стаціонарно зв'язані випадкові процеси.

Стаціонарні компоненти мають вигляд:

$$\begin{aligned} \xi_1(t) &= \xi_{-1}(t) = \frac{1}{2}\mu(t), \\ \eta_1(t) &= \eta_{-1}(t) = \frac{1}{2}\nu(t). \end{aligned}$$

У цьому випадку

$$\gamma_{1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega) = \gamma_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{|f_{\mu\nu}(\omega)|}{[f_{\mu}(\omega)f_{\nu}(\omega)]^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

де $f_{\mu}(\omega)$ та $f_{\nu}(\omega)$ – спектральні густини потужності випадкових процесів $\mu(t)$ та $\nu(t)$, а $f_{\mu\nu}(\omega)$ – їх взаємна спектральна густина. Такий самий вигляд мають і функції когерентності $\gamma_{1,1}^{(\xi\eta)}(\omega)$, $\gamma_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega)$.

Взаємоспектральна густина сигналів визначається виразом

$$f_{\xi\eta}(\omega, t) = f_0^{(\xi\eta)}(\omega) + f_{-2}^{(\xi\eta)}(\omega)e^{-i2\omega_0 t} + f_2^{(\xi\eta)}(\omega)e^{i2\omega_0 t},$$

при цьому

$$f_0^{(\xi\eta)}(\omega) = f_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega) + f_{1,1}^{(\xi\eta)}(\omega),$$

$$f_2^{(\xi\eta)}(\omega) = f_{1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega - \omega_0),$$

$$f_{-2}^{(\xi\eta)}(\omega) = f_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega + \omega_0).$$

Як бачимо, середньочасове значення функції $f_{\xi\eta}(\omega, t)$ визначається спектральними густинами $f_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega, t)$ і $f_{1,1}^{(\xi\eta)}(\omega, t)$, а її періодична зміна за часом – спектральними густинами $f_{1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega, t)$ і $f_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega, t)$. Із цього випливає, що функції коге-

рентності $\gamma_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega)$ і $\gamma_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega)$ потрібно розглядати як характеристики взаємозв'язку сигналів у стаціонарному наближенні, функції когерентності $\gamma_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega)$ і $\gamma_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega)$ – як характеристики взаємозв'язку нестационарних властивостей сигналів. У даному випадку ці функції рівні, і це не дивно, оскільки стаціонарні компоненти $\xi_{\pm 1}(t)$ та $\eta_{\pm 1}(t)$ формуються на основі одних і тих самих модулюючих процесів $\mu(t)$ та $\nu(t)$. Така властивість періодично нестационарних випадкових сигналів (ПНВС) була названа спектральною надлишковістю. Це означає, що зі спектральними характеристиками модулюючих компонент зв'язана та сама інформація, що і з їх спектральними характеристиками. Однак необхідно підкреслити, що ця надлишковість може бути використана при розв'язуванні багатьох практичних задач [3, 6, 12, 13].

Для обчислення оцінок спектральних густин використаємо корелограмний метод Блекмана-Т'юкі. Тоді

$$\hat{f}_{\xi_k}(\omega) = \frac{\Delta u}{4\pi} \sum_{r=0}^L \left[\left[\hat{R}_{\xi_k}^c(r\Delta u) + \hat{R}_{\xi_k}^s(r\Delta u) \right] \cos \omega r \Delta u + \hat{R}_{\xi_k}^{cs}(r\Delta u) \sin \omega r \Delta u \right] k(r\Delta u),$$

$$\hat{f}_{\eta_k}(\omega) = \frac{\Delta u}{4\pi} \sum_{r=0}^{L-1} \left[\left[\hat{R}_{\eta_k}^c(r\Delta u) + \hat{R}_{\eta_k}^s(r\Delta u) \right] \cos \omega r \Delta u + \hat{R}_{\eta_k}^{cs}(r\Delta u) \sin \omega r \Delta u \right] k(r\Delta u),$$

$$\operatorname{Re} \hat{f}_{\xi_k \eta_k}(\omega) = \frac{\Delta u}{8\pi} \sum_{r=-L}^L \left[\left[\hat{R}_{\xi_k \eta_k}^c(r\Delta u) + \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^s(r\Delta u) \right] \cos \omega r \Delta u + \left[\hat{R}_{\xi_k \eta_k}^{cs}(r\Delta u) - \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^{sc}(r\Delta u) \right] \sin \omega r \Delta u \right] k(r\Delta u),$$

$$\operatorname{Im} \hat{f}_{\xi_k \eta_k}(\omega) = \frac{\Delta u}{8\pi} \sum_{r=-L}^L \left[\left[\hat{R}_{\xi_k \eta_k}^c(r\Delta u) + \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^s(r\Delta u) \right] \sin \omega r \Delta u + \left[\hat{R}_{\xi_k \eta_k}^{sc}(r\Delta u) - \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^{cs}(r\Delta u) \right] \cos \omega r \Delta u \right] k(r\Delta u),$$

де $k(u)$ – вікно Хеммінга.

Оцінка покомпонентної функції когерентності тоді приймає вигляд:

$$\hat{\gamma}_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left[\left[\operatorname{Re} \hat{f}_{\xi_k \eta_k}(\omega) \right]^2 + \left[\operatorname{Im} \hat{f}_{\xi_k \eta_k}(\omega) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\hat{f}_{\xi_k}(\omega) \hat{f}_{\eta_k}(\omega) \right]^{\frac{1}{2}}}.$$

Загальна схема обчислення покомпонентної функції когерентності наведена на рис. 5. Зауважимо, що параметри статистичної обробки, яка проводиться, вибираються на основі аналізу властивостей відповідних оцінок [10, 14].

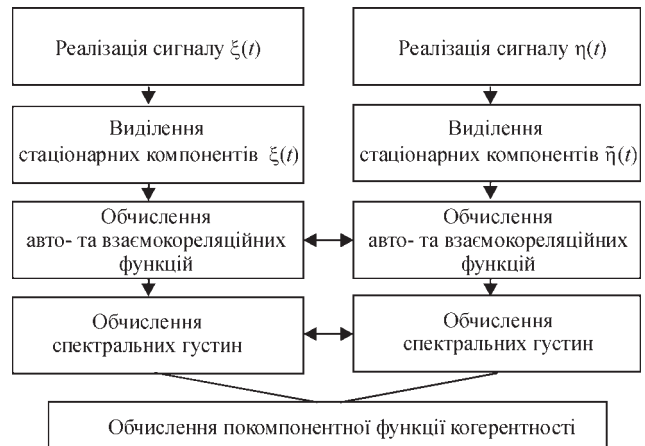


Рис. 5. Загальна схема обчислення покомпонентної функції когерентності

Така функція когерентності визначається взаємоспектральними характеристиками окремих випадкових процесів, які модулюють несучі гармоніки ПНВС. У порівнянні з інтегральною функцією когерентності вона дає змогу детальніше проаналізувати взаємозв'язаність ПНВС, уникаючи при цьому впливу переносу частот, який виникає при модуляції.

Взаємний аналіз вібраційних сигналів підшипникових вузлів турбогенераторів ТЕС. З використанням розробленого спеціалізованого пристрою проводився постійний моніторинг турбоагрегатів ТЕС впродовж шести місяців. За цей період часу досліджено деградацію підшипникового вузла від

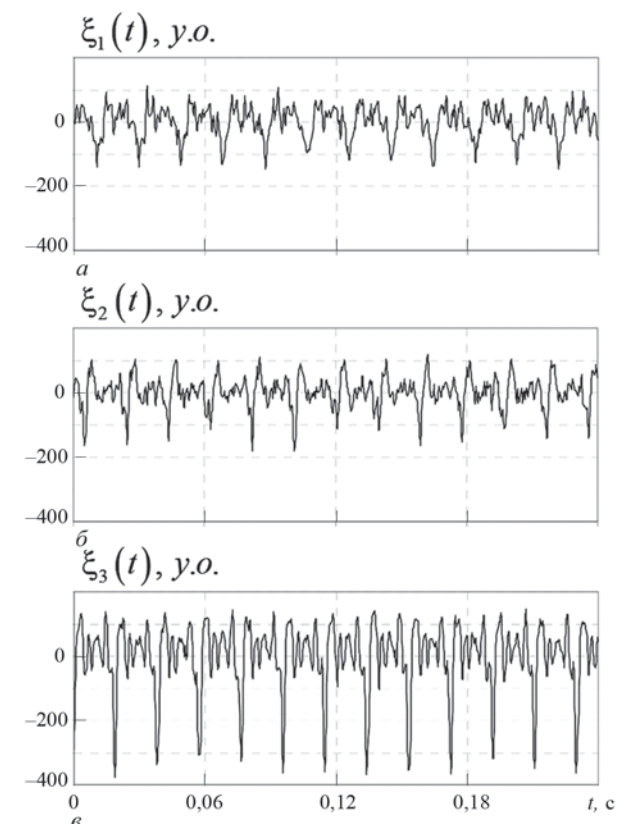


Рис. 6. Вібраційні сигнали вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

зародження в ньому локального дефекту до викришення бабітового вкладкишу.

Для наочності коротко проаналізуємо зміну імовірнісних характеристик вертикальної складової вібраційних сигналів підшипникового вузла. Частота відбору сигналів становила 2 кГц, час відбору – 20 с. З наведених графіків (рис. 6) видно, що поява дефекту спричиняє появу та наростання періодичних викидів з частотою, що відповідає частоті обертання валу, у нижній частині графіків, амплітуда яких зростає зі збільшенням розміру дефекту.

Оцінки кореляційних функцій вібраційних сигналів у стаціонарному наближенні (рис. 7) мають незникаючий «хвіст», зумовлений наявністю детермінованих складових. Основний період $T = 0,02$ с (50 Гц). Поява дефекту спричиняє появу потужних викидів на «хвості» кореляційної функції, амплітуди яких наростають з ростом дефекту. Слід зауважити, що середня потужність вібраційних сигналів з ростом дефекту також зростає.

У спектральних густинах потужності (рис. 8) вібраційних сигналів у стаціонарному наближенні присутня основна гармонічна складова, що відповідає частоті обертання валу (50 Гц) та кілька кратних до неї гармонік. В основному всі гармонічні складові зосереджені в смузі частот до 500 Гц. Поява дефекту та його ріст спричиняють появу вищих гармонічних складових та ріст їх амплітуд.

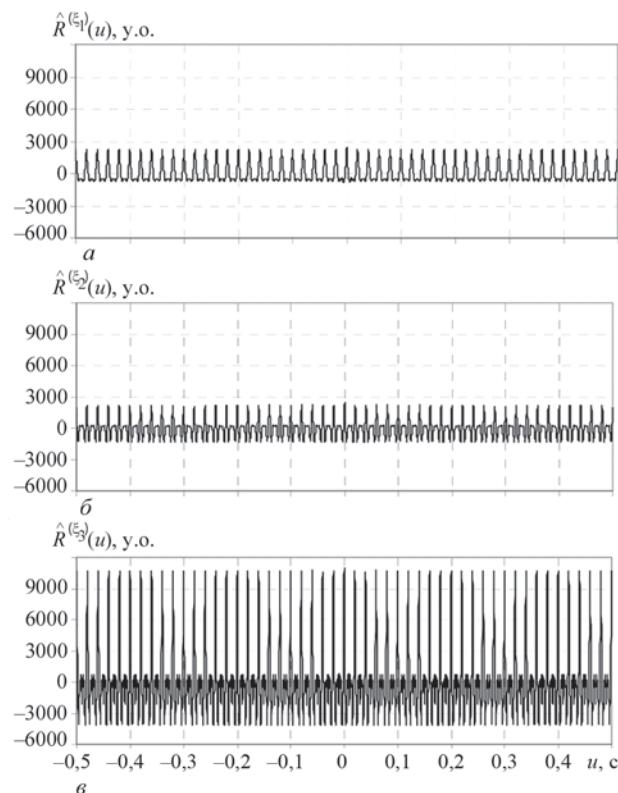


Рис. 7. Кореляційні функції вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

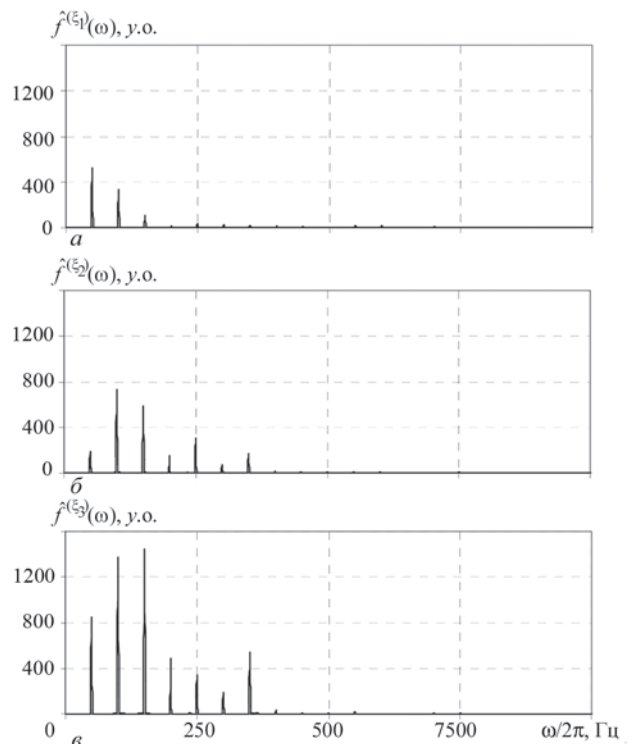


Рис. 8. Спектральні густини вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

Проведено розділення детермінованої і стохастичної складових вібраційних сигналів з використанням компонентного методу та проаналізовано кожен з них окремо при розвитку дефекту.

На рис. 9 наведено динаміку зміни математичного очікування вібраційних сигналів впродовж моніторингу. З наведених графіків видно, що при появі дефекту зростають амплітуди викидів.

Серед значущих коефіцієнтів Фур'є математичного очікування присутні вісім компонентів, амплітуди яких зростають з розвитком дефекту (рис. 10).

Потужність стохастичних складових вібраційних сигналів без дефекту складають не більше 10 % потужності сигналів (рис. 11, а). При появі дефектів у цих складових вібраційних сигналів появляються викиди, що спричинені взаємодією валу з вкладишем підшипника.

В кореляційних функціях стохастичних складових у стаціонарному наближенні на «хвостах» з'являються викиди на частоті обертання валу, амплітуди яких зростають з ростом дефекту. Потужність цих складових з ростом дефекту зростає також (рис. 12).

Спектральні густини стохастичних складових у стаціонарному наближенні без дефекту наведено на рис. 13, а. Основна енергія зосереджена в смузі частот до 500 Гц. Поява дефекту спричиняє появу спектральних піків, кратних до частоти обертання валу у смузі 150 ... 500 Гц, амплітуди яких зростають з розвитком дефекту (рис. 13, б, в).

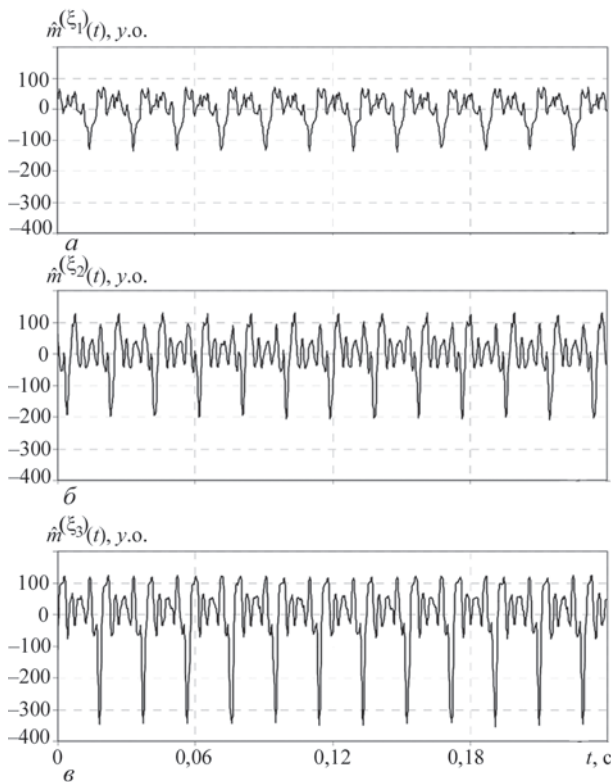


Рис. 9. Математичні сподівання вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

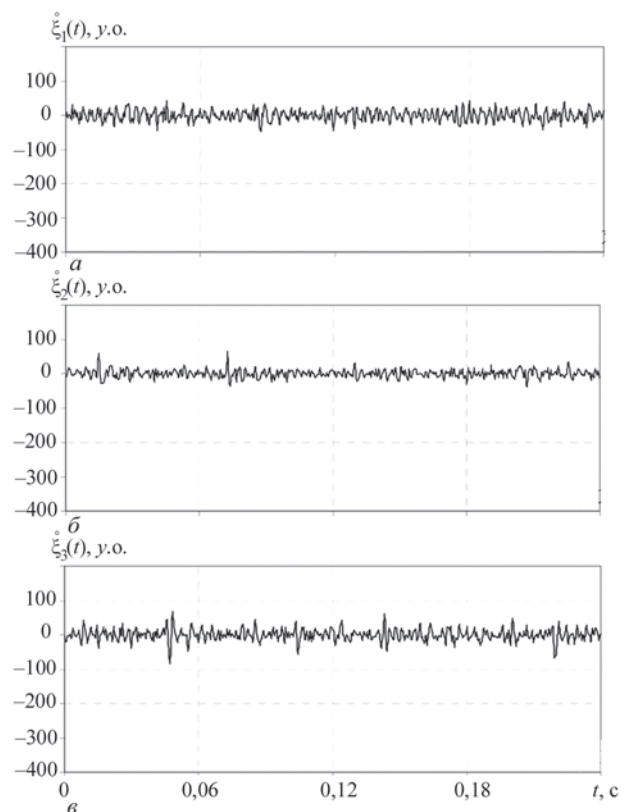


Рис. 11. Стохастичні складові вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

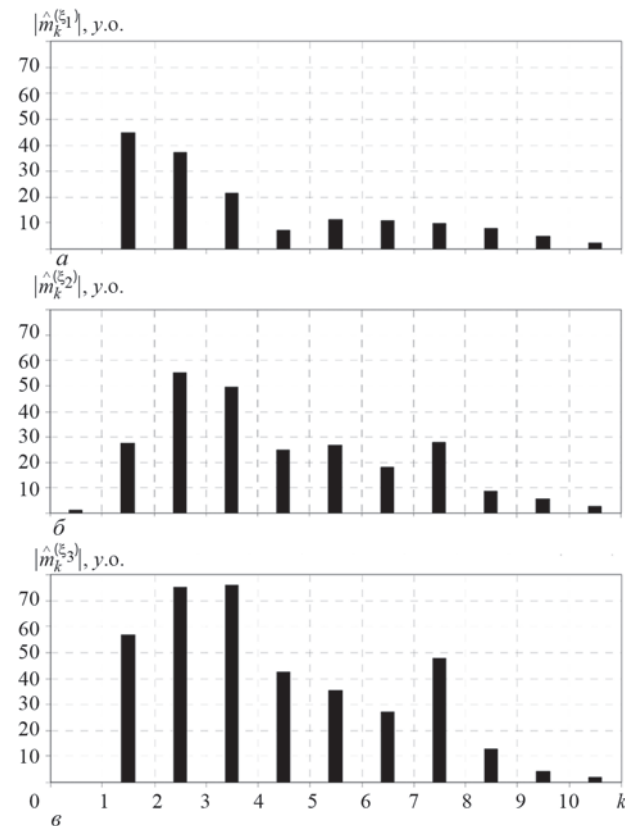


Рис. 10. Компоненти математичних сподівань вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

Застосовуючи когерентний метод [9, 15–18] пошуку прихованих періодичностей для стохастичних складових вібраційних сигналів, у сигналах,

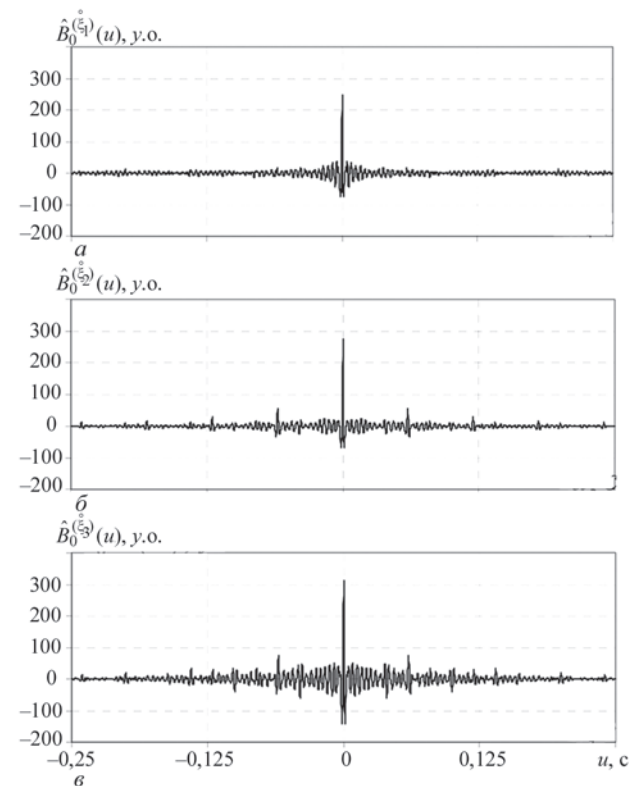


Рис. 12. Кореляційні функції стохастичних складових вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

відібраних у червні (рис. 14, б) та серпні (рис. 14, в), виявлені потужні модуляції стаціонарними випадковими процесами частоти обертання валу.

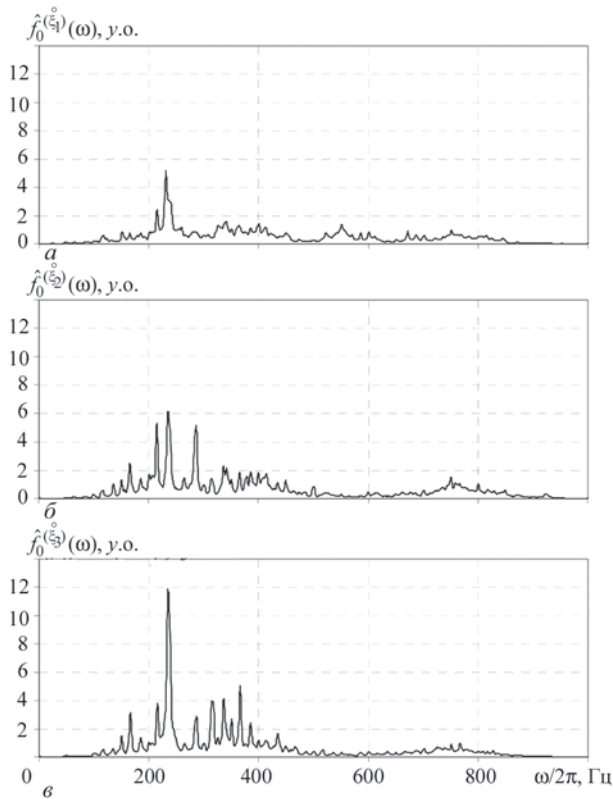


Рис. 13. Спектральні густини стохастичних складових вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

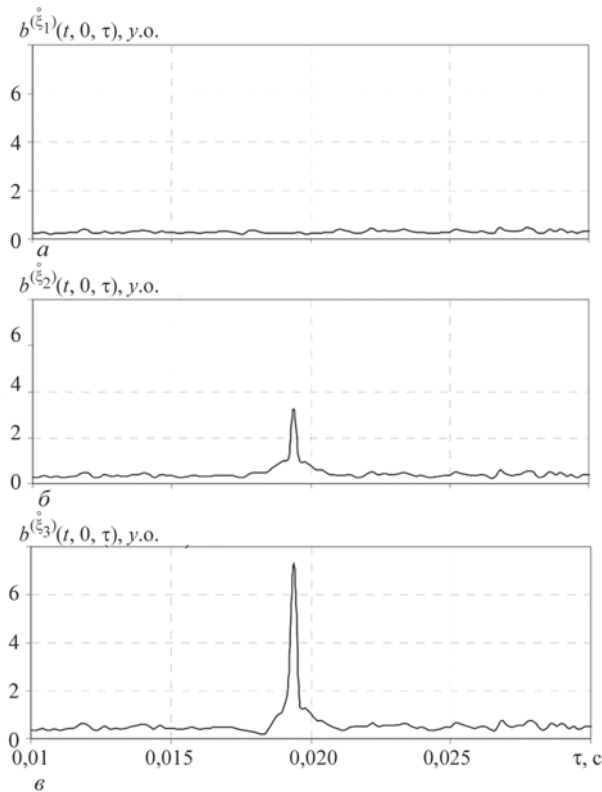


Рис. 14. Функціонал оцінки періоду стохастичної складової вібраційних сигналів вертикальної складових: березень (а), червень (б), серпень (в)

Застосовуючи метод найменших квадратів [19, 20] для аналізу стохастичних складових вібрацій-

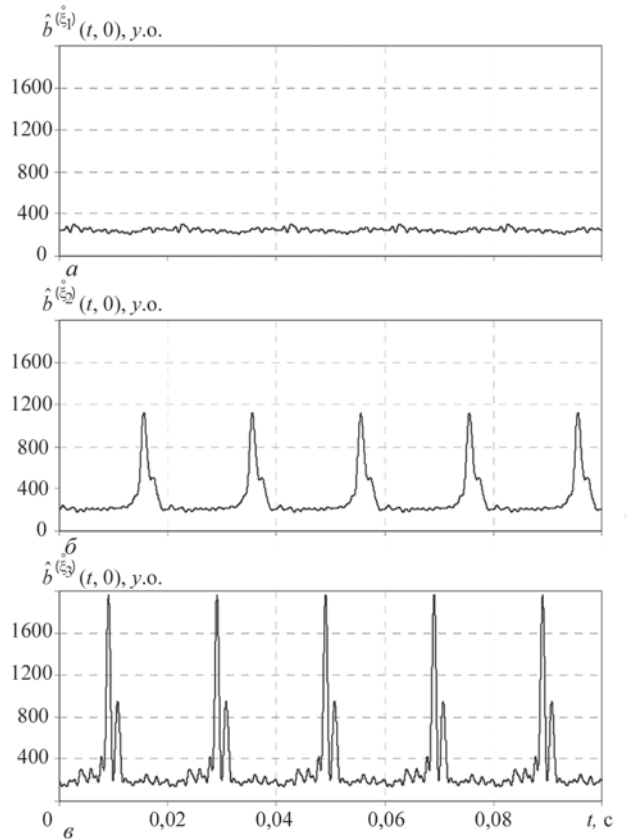


Рис. 15. Дисперсії стохастичних складових вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

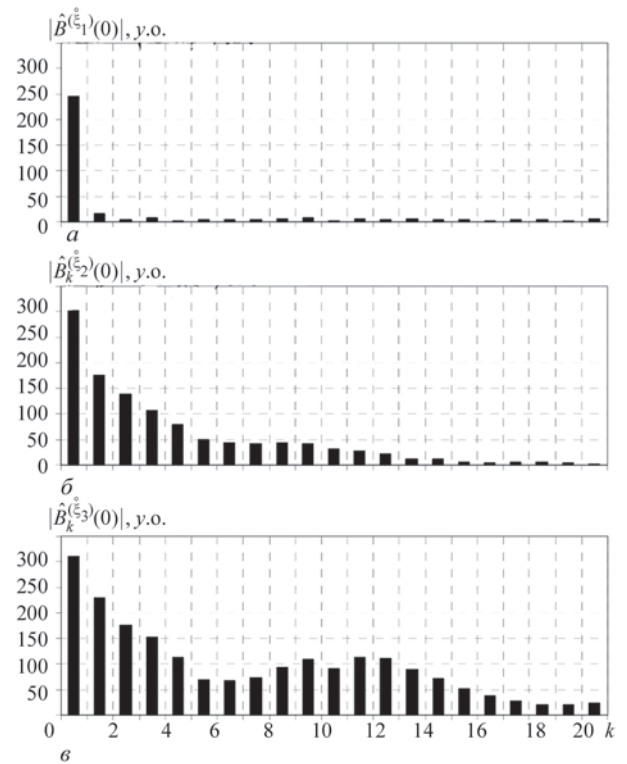


Рис. 16. Компоненти дисперсії стохастичних складових вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

них сигналів, оцінено дисперсії цих складових та їх компоненти Фур'є. З графіків дисперсії видно,

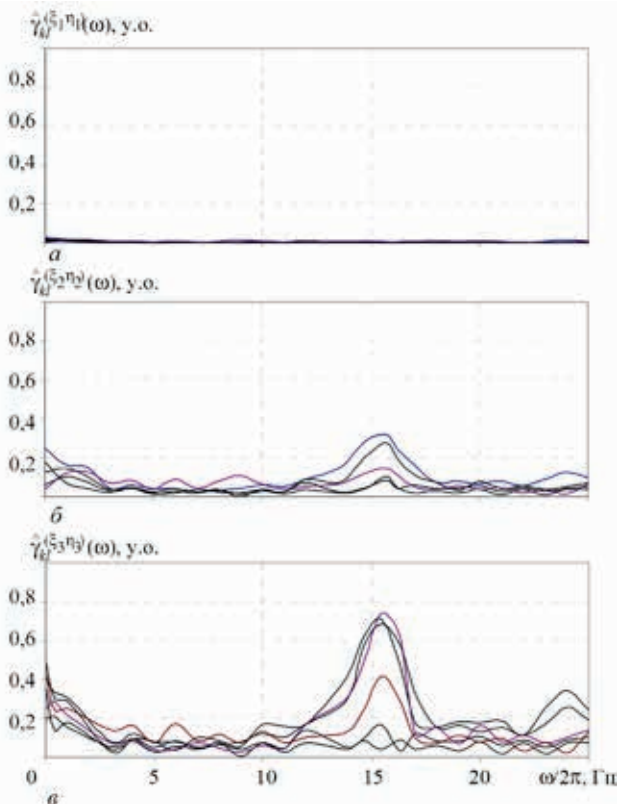


Рис. 17. Оцінки покомпонентної функції когерентності 1-го порядку $|k - 1| = 1$: березень (а), червень (б), серпень (в)

що дисперсія стохастичної складової вібраційного сигналу, відібраного у березні, має вигляд малопотужних флуктуацій відносно певного рівня, що свідчить про стаціонарність цієї складової сигналу, а отже і про відсутність дефекту у підшипниковому вузлі (рис. 15, а). Поява дефекту до набуття стохастичними складовими вібраційних сигналів характеристик періодичної нестаціонарності другого порядку, що відображається у появі потужних викидів у дисперсії за період (рис. 15, в). Співвідношення мінімального значення дисперсії до максимального у червні становить 0,352, а у серпні – 0,165.

Серед значущих компонентів Фур'є дисперсії стохастичної складової вібраційного сигналу, отриманого у березні, присутня лише нульова компонента (рис. 16, а). Поява дефекту спричиняє появу вищих гармонічних складових дисперсії та ріст їх амплітуд. Дисперсія стохастичної складової вібраційного сигналу, відібраного у червні, містить 9 значущих компонент (рис. 16, б), а у серпні – 15 (рис. 16, в).

Аналогічний аналіз проведений і для горизонтальних складових вібраційних сигналів. Для горизонтальної і вертикальної складових проведений взаємний кореляційний і спектральний аналізи [9], виділено їх стаціонарні компоненти та побудовано покомпонентні функції когерентності (рис. 17) для дефекту, що розвивався впродовж моніторингу турбоагрегатів.

Видно, що більшість стаціонарних компонентів корелюють в смузі 13...16 Гц, максимуму функцій когерентності досягають в точці, близькій до 16 Гц.

Висновки

Поєднання багаточкового відбору вібраційних сигналів, методів взаємного статистичного аналізу ПКВП та програмного забезпечення цифрової обробки сигналів у розробленому компактному пристрої неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» дає можливість підвищити ефективність вібродіагностики обертових вузлів технологічних об'єктів під час експлуатації без зміни їх штатних режимів функціонування.

На основі методів взаємкореляційного і взаємспектрального аналізів вібраційних сигналів з використанням введених функцій когерентності були виявлені та локалізовані дефекти елементів промислових об'єктів на ранній стадії їх розвитку.

Численні практичні дослідження підтвердили, що при появі дефектів сигнали вібрації набувають властивостей нестаціонарності другого порядку, характеристики яких є чутливими до аналізу розвитку дефектів. Тому їх доцільно використовувати при проведенні моніторингу. Такий моніторинг турбоагрегатів ТЕС розробленими методами дав змогу виявити ряд типових дефектів опорних підшипників ковзання (обертовий зрив, вихрова змазка, збільшення зазорів між валом та бабітовою прокладкою, відколювання бабіту), що було підтверджено під час ремонту обертових вузлів.

Список літератури

1. Vogl, G.W., Weiss, B.A., Donmez, M.A. NISTIR 8012 Standards Related to Prognostics and Health Management (PHM) for Manufacturing: National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce.
2. Коллакот Р.А. (1980) *Диагностирование механического оборудования*. Ленинград, Судостроение.
3. Мигущенко Р.П. (2014) *Елементи контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів*: монографія. Харків, Вид-во «Підручник НТУ «ХП»».
4. McCormick, A.C., Nandi, A.K. (1998) Cyclostationarity in rotating machine vibrations. *Mech. Syst. Signal Process*, **12**, 2, 225–242.
5. Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis. *Ibid*, **14**, 3, 371–385.
6. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. (1992) *Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин*. Киев, Наукова думка.
7. (2001) *Механіка руйнування та міцність матеріалів. Дов. посібник. Т. 5. Неруйнівний контроль та технічна діагностика*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
8. Явленский К.Н., Явленский А.К. (1983) *Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем*. Ленинград, Машиностроение.
9. Яворський І.М. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
10. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Zakrzewski, Z. (2017) Component-wise coherence function for jointly

- related periodically non-stationary random processes. *Radioelectronics and Communication Systems*, **60**, 1, 28–41.
11. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Дзерин О.Ю. та ін. (2020) Застосування спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю для аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів методами взаємного нестационарного аналізу. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, **1**, 17–27.
 12. Bendat, J.S., Piersol, A.G. (2010) *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. New York, John Wiley&Son.
 13. Obuchowski J., Wylomanska A., Zimroz R. (2015) Identification of cyclic components in presence of non-Gaussian noise application to crusher bearings damage detection. *Journal of Vibroengineering*, **17** (3), 1242–1252.
 14. Hinich, M.J. (2000) A statistical theory of signal coherence. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **25** (2), 254–259.
 15. Rice, J.A., Rosenblatt, M. (1988) On frequency estimation. *Biometrika*, **75** (3), 477–484.
 16. Бенткус Р., Сушинскас Ю. (1985) Выделение скрытых периодичностей. *Применение теории вероятностей и математической статистики*, **6**, 77–78.
 17. Голубев Г.К. (1988) Об оценивании периода сигнала неизвестной формы на фоне белого шума. *Проблемы передачи информации*, **29** (4), 38–52.
 18. Куликов Е.И., Трифонов А.П. *Оценка параметров сигналов на фоне помех*. Москва, Сов. радио.
 19. Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Yu., Yuzefovych, R.M. (2019) Analysis of mean function discrete LSM-estimator for biperiodically nonstationary random signal. *Mathematical Modeling and Computing*, **6** (1), 44–57.
 20. Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Yu., Yuzefovych, R.M. (2020) Discrete LS Estimates of correlation function of bi-periodically correlated random signals. *Radioelectronics and Communications Systems*, **63** (3), 136–155.
 6. Marchenko, B.G., Myslovich, M.V. (1992) *Vibration diagnostics of bearing assemblies of electric machines*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
 7. (2001) *Fracture mechanics and strength of materials: Reference book. Vol.5: Nondestructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv: PMI [in Ukrainian].
 8. Yavlensky, K.N., Yavlensky, A.K. (1983) *Vibration diagnostics and prediction of quality of mechanical systems*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
 9. Yavorskyi, I.M. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillations*. Lviv: PMI [in Ukrainian].
 10. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Zakrzweskyi, Z. (2017) Component-wise coherence function for jointly related periodically non-stationary random processes. *Radioelectronics and Communication Systems*, **60**(1), 28–41.
 11. Yuzefovych, R.M., Yavorskyi, I.M., Dzeryn, O.Yu., Trokhym, G.R., Stetsko, I.H., Matsko, I.Y. (2020) Application of specialized nondestructive testing device for analysis of vibration signals of bearing assemblies by the methods of mutual nonstationary analysis. *Tekhn. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 17–27 [in Ukrainian].
 12. Bendat, J. S., Piersol, A.G. (2010) *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*. New York: John Wiley&Sons.
 13. Obuchowski, J., Wylomanska, A., Zimroz, R. (2015) Identification of cyclic components in presence of non-Gaussian noise application to crusher bearings damage detection. *J. of Vibroengineering*, **17** (3), 1242–1252.
 14. Hinich, M.J. (2000) A statistical theory of signal coherence. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, **25** (2), 254–259.
 15. Rice, J.A., Rosenblatt, M. (1988) On frequency estimation. *Biometrika*, **75** (3), 477–484.
 16. Bentkus, R., Sushinskas, Yu. (1985) Identification of latent periodicity. *Primenenie Teorii Veroyatnostej i Matem. Statistiki*, **6**, 77–78 [in Russian].
 17. Golubev, G.K. (1988) About estimation of the period of unknown shape signal against the white noise background. *Problemy Peredachi Informatsii*, **29** (4), 38–52 [in Russian].
 18. Kulikov, E.I., Trifonov, A.P. (1978) Estimation of signal parameters against the noise background. Moscow, Sov. Radio [in Russian].
 19. Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Yu., Yuzefovych, R.M. (2019) Analysis of mean function discrete LSM-estimator for biperiodically nonstationary random signal. *Mathematical Modeling and Computing*, **6** (1), 44–57.
 20. Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Yu., Yuzefovych, R.M. (2020) Discrete LS estimates of correlation function of bi-periodically correlated random signals. *Radioelectronics and Communications Systems*, **63** (3), 136–155.

References

1. Vogl, G.W., Weiss, B.A., Donmez, M.A. (2014) NISTIR 8012 Standards Related to Prognostics and Health Management (PHM) for Manufacturing: National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce.
2. Kollakot, R.A. (1980) *Diagnostics of mechanical equipment*. Leningrad, Sudostroenie [in Russian].
3. Mygushchenko, R.P. (2014) *Elements of control and diagnostics of state of vibration objects: Monography*. Kharkiv, Pidruchnyk NTU KhPI [in Ukrainian].
4. McCormick, A.C., Nandi, A.K. (1998) Cyclostationarity in rotating machine vibrations. *Mech. Syst. Signal Process*, **12** (2), 225–242.
5. Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis. *Ibid*, **14** (3), 371–385.

DEVICES FOR DETECTION OF DEFECTS AT EARLY STAGES OF THEIR INITIATION AT DETERMINATION OF TECHNICAL CONDITION OF MECHANISMS

R.M. Yuzefovych, I.M. Yavorskyi, I.Y. Matsko, O.V. Lychak, G.R. Trokym, O.Yu. Dzeryn, I.H. Stetsko

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

Vibration signal is the carrier of information about certain system defects, it has the properties of repeatability and stochasticity. These properties allow describing and studying the mathematical model in the form of periodically correlated random process (PCRP). PCRP probabilistic characteristics reflect the modulation interaction of the stochastic and deterministic components of vibration, which arises in the case of defect appearance. Mutual PCRP-analysis of vibration signals, the use of the introduced coherence functions allows detecting defects, classifying their types, as well as determining their location. The combination of multi-point selection of vibration signals, methods of mutual statistical PCVP-analysis and digital signal processing software in the developed compact device for non-destructive testing «Compact-Vibro» allows increasing the efficiency of vibration diagnostics of rotating units of technological facilities during operation without changing their standard operating modes. The monitoring of TPP turbounits by the developed methods allowed revealing a number of typical defects of support slide bearings, which was confirmed during the repair of rotating units. 20 Ref., 17 Tables.

Keywords: nondestructive testing, vibration, periodically correlated random process, specialized devices, defect, slide bearing

Надійшла до редакції 23.10.2020

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ВІТРОУСТАНОВОК ЗА РАХУНОК РЕГУЛЮЮЧИХ ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ, ГАРМОНІЗОВАНИХ З ЄВРОПЕЙСЬКИМИ СТАНДАРТАМИ*

Ю.І. Гижко¹, В.М. Головка², М.С. Гуторова¹, В.М. Зварич¹, В.П. Коханевич², С.О. Кудря²,
М.В. Мислович¹, Л.Б. Остапчук¹

¹Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56. E-mail: ied1@ied.org.ua

²Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 02094, м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20-а. E-mail: info@ive.org.ua

Досліджено особливості використання лінійних AR та ARMA процесів в якості математичних моделей вібраційних сигналів двигунів власних потреб ТЕС і ТЕЦ та двигунів вітрогенераторів. Визначено особливості побудови прототипу безпроводної інформаційно-виміральної системи діагностування стану таких двигунів. Приведено результати експериментальних досліджень використання прототипу ІВС на прикладі досліджень вібрацій двигунів власних потреб, а саме двигуна DKRAI – 4519-4V Дарницької ТЕЦ з використанням міжнародних стандартів. Отримано нові математичні моделі статичних та динамічних процесів в аеромеханічних регулюючих засобах роторів вітроустановок з відцентровим регулятором, проведено їх експериментальну перевірку та на їх основі розроблено методику по вибору параметрів та характеристик аеромеханічних регулюючих засобів роторів вітроустановок з відцентровим регулятором та методику визначення навантажень і розрахунку на міцність лопатей вітроустановки, які будуть використані розробниками при проектуванні нових вітроустановок. Бібліогр. 8, рис. 3.

Ключові слова: вібродіагностика, вітрогенератори, двигуни власних потреб, безпроводна інформаційно-вимірвальна система

Використання систем діагностування при виробництві та експлуатації двигунів різної потужності може суттєво підвищити надійність такого обладнання та покращити економічні показники його використання [1–3]. Приймаючи до уваги підписану Україною Угоду про асоціацію Україна–ЄС та Договір про заснування Енергетичного співтовариства, експлуатація самих двигунів, а також систем їх діагностування повинна відповідати Європейським стандартам. Системи технічної діагностики енергетичного устаткування базуються на різних методах. Це тепловий контроль та діагностика, контроль технічного стану на основі аналізу електричних і магнітних полів, вібродіагностика, акустична діагностика, діагностика на основі методів акустичної емісії тощо.

Допуски на величини струму і температури досить великі і суттєво перевищують ті зміни, які виникають при появі різних потенційно небезпечних дефектів, особливо на ранніх стадіях їх появи.

Показники надійності роботи енергообладнання визначаються результатом спільного впливу як факторів, що визначають умови експлуатації, так і внутрішніх чинників, що визначають властивості

енергетичного обладнання. Поєднання таких факторів носить випадковий характер. Тому застосування статистичних методів для вирішення таких завдань доцільно в багатьох практичних випадках.

Найбільш перспективними методами контролю і діагностики є неруйнівні методи, які, зазвичай, реалізуються за допомогою спеціалізованих комп'ютерних систем. Серед таких методів найбільш перспективними є методи вібродіагностики. В роботі пропонується використання методу вібродіагностики для побудови систем діагностування двигунів власних потреб та генераторів вітроустановок (ВУ).

В роботі [4] наведено результати досліджень особливостей побудови систем вібродіагностики на прикладі діагностування підшипників кочення електричних двигунів.

Елементи підшипника при його обертанні викликають потік імпульсів, властивості якого залежать від стану доріжок, тіл кочення, стану мастила, якості установки підшипника. Залежно від конструктивних і експлуатаційних вимог до підшипника його доріжки і кульки обробляються з певною шорсткістю поверхні (8–12 класів чистоти

*За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин» («Ресурс»), отриманих за 2016–2020 рр.

Гижко Ю.І. – <http://orcid.org/0000-0002-5702-4738>, Головка В.М. – <http://orcid.org/0000-0003-0195-9654>,

Гуторова М.С. – <http://orcid.org/0000-0003-4259-7530>, Зварич В.М. – <http://orcid.org/0000-0002-1271-4954>,

Коханевич В.П. – <http://orcid.org/0000-0003-0033-1355>, Кудря С.О. – <http://orcid.org/0000-0002-4798-6853>,

Мислович М.В. – <http://orcid.org/0000-0002-6245-7917>, Остапчук Л.Б. – <http://orcid.org/0000-0002-5565-0313>,

© Ю.І. Гижко, В.М. Головка, М.С. Гуторова, В.М. Зварич, В.П. Коханевич, С.О. Кудря, М.В. Мислович, Л.Б. Остапчук, 2020

поверхні), яка характеризується висотою нерівностей. Висота нерівностей має один порядок з відстанню між максимумами поверхні. При коченні кульок по поверхні кілець через шорсткість виникають випадкові елементарні збуджуючі імпульси сил, які і примушують вібрувати деталі шарикопідшипника і щит, в якому він закріплений. Тривалість такого елементарного імпульсу менше 0,5 мкс. Смуга частот цього імпульсу більше 2,5 мГц. Отже, вібраційний шум підшипника може розглядатися як відгук багаторезонансної системи на вплив послідовності елементарних імпульсів сил, що збуджують.

При побудові математичних моделей діагностичних сигналів використано принципово новий клас випадкових процесів, а саме клас лінійних випадкових процесів авторегресії. Суть такого підходу полягає в тому, що об'єкт, що діагностується, представляється у вигляді ядра лінійного процесу авторегресії, а сам процес задається різницею рівнянням. На відміну від використовуваних на практиці процесів лінійні процеси авторегресії дозволяють описувати не тільки гаусові сигнали, але і сигнали, які мають безмежно ділені закони розподілу, такі як гамма, пуасонівський негативний біноміальний і гаусів.

Використання лінійних AR та ARMA процесів для моделювання вібрації вітрогенераторів USW 56-100. За дослідженнями Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (International Renewable Energy Agency (IRENA)) за рахунок розвитку технологій функціонування та ремонту вітрогенераторів до 2025 р. передбачається зменшення вартості електроенергії, що виробляється вітрогенераторами, на 26 %.

При виконанні проекту проведено аналіз властивостей лінійних AR та ARMA процесів та доцільності використання рішень оберненої задачі для таких процесів при побудові систем діагностування двигунів власних потреб ТЕЦ і ТЕС та двигунів вітроустановок [1–3].

Розглянуто можливість використання лінійних процесів авторегресії для розробки алгоритмів моделювання вібросигналів обертових вузлів вітрогенераторів, що надзвичайно важливо для побудови випробувальних стендів, а також тренажерів для підготовки обслуговуючого персоналу вітроагрегатів [4].

Як приклад використання запропонованого підходу розглянемо вібраційний сигнал обертового вузла підшипника кочення вітрогенератора USW 56-100 (рис. 1) з боку корпусу головного валу, встановленого на стенді для випробувань вітрогенераторів. Швидкість обертання головного валу – 72 об/хв. Для досліджень вібраційних сигналів використовувався розроблений в Інституті електродина-

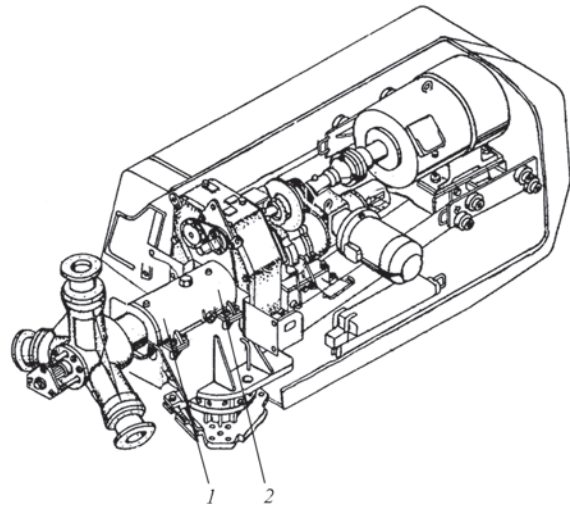


Рис. 1. Кріплення сенсорів для дослідження вібрацій вузлів генератора вітроагрегату USW 56-100

міки НАН України прототип системи діагностики вітрогенераторів, за допомогою якого були отримані оцінки ядер лінійних випадкових процесів.

У точках 1 та 2 вібраційний сигнал моделюється лінійним процесом авторегресії

$$\xi_t = -\sum_{i=1}^p a_i \xi_{t-i} + \zeta_t \quad t \in Z, \quad (1)$$

де $\{a_j, a_j \neq 0, j = \overline{1, p}\}$, $a_1, \dots, a_p \in$ дійсно-значні параметри авторегресії; Z – множина цілих чисел; p – порядок авторегресії, $\zeta_t, t \in Z$ – породжуючий процес, що має безмежно-подільний закон розподілу. Процес авторегресії другого порядку з коефіцієнтами $a_1 = 0,552$ та $a_2 = -0,0036$ може бути описаний

$$\xi_t + 0,552\xi_{t-1} - 0,0036 = \zeta_t \quad (2)$$

Процес ξ_t має гамма розподіл з параметрами $\theta > 0, b > 0$, одновимірна характеристична функція якого задана співвідношенням

$$f_\xi(u, t) = (1 - iu\theta)^{-b} \quad \forall t \in Z; \quad \theta > 0; \quad b > 0.$$

В даному випадку ядро лінійного випадкового процесу авторегресії є спадною позитивною функцією [5]. Логарифм характеристичної функції породжуючого процесу визначається наступним чином [5]

$$\begin{aligned} \ln f_\zeta(u; t) &= |t| \ln f_\zeta(u; 1) = 0,452i|t|\theta bu + 0,694\theta b|t| \times \\ &\times \int_0^\infty \left\{ \exp(iyu) - 1 - iyu \right\} \frac{\exp(-y/\theta)}{y} dy = \\ &= b\theta|t| \left\{ 0,452iu + 0,694 \left[iu(1 - \theta) - \ln(1 - iu\theta) \right] \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

При виконанні проекту розглянуто принципи побудови систем технічного діагностування рухомих вузлів ЕМ (електричних машин) з використанням автономних вимірювальних перетворювачів. При створенні таких систем важливим питанням виступає забезпечення незалежним живленням сенсорних пристроїв для надання їм

більшої автономності та збільшення міжсервісного інтервалу. Застосування акумуляторних батарей та оптимізація енергоспоживання самими пристроями дозволяє лише частково вирішити проблему. На даний час активно розвиваються технології Energy Harvesting (EH), що використовують відновлювальні джерела енергії [5]. Застосування цих технологій дозволяє значно підвищити автономність функціонування блоків сенсорів.

Запропонована методика діагностування рухомих вузлів вітрогенераторів та двигунів власних потреб ТЕЦ і ТЕС реалізується за допомогою ІВС, яка має окремі блоки, що забезпечують вимірювання, перетворення та передачу інформації (технічні засоби) та блоки, які реалізують програмне управління ІВС, статистичну обробку вимірних сигналів та побудову розв'язуючих правил з визначення технічного стану обладнання, що діагностується (програмні засоби).

При створенні лабораторного зразка ІВС вібродіагностики використовувалися принципи модульності створеної системи для забезпечення можливості модифікації ІВС з урахуванням конкретних потреб користувача.

Використання бездротових технологій в системах вібродіагностики двигунів власних потреб ТЕЦ і ТЕС та двигунів вітроустановок. Аналоговий сигнал, вимірний на вузлі ЕМ, що діагностується, на виході з сенсора має вигляд DCM сигналу (DutyCycleModulated – модуляція з коефіцієнтом заповнення). В якості первинного сенсора застосовувався акселерометр ADXL202 виробництва компанії AnalogDevices. Частота вимірюваного акселерометром ADXL202 сигналу може бути встановлена в межах від 0,01 Гц до 6 КГц, що достатньо для діагностування технічного стану лобових частин обмоток ротора, можливого теплового небалансу, що виникає при короткому замиканні окремих витків обмотки ротора, а також підшипників кочення низькооберткових (до 1000 об/хв) ЕМ середньої потужності.



Рис. 2. Реєстрація та аналіз вібраційних характеристик електродвигуна власних потреб DKRAI-4519-4V Дарницької ТЕЦ

Фізично блок сенсорів, який використано у створеному лабораторному зразку ІВС вібродіагностування, складається з наступних основних елементів: два акселерометра ADXL202; мікроконтролер PIC16LF873–041 виробництва компанії Microchip Technology; модуль Bluetooth EYMF2CAMM-XX виробництва компанії ТАЙОУУДЕН; супутні елементи, що забезпечують функціонування блока.

Зручність використання сенсорів, з виходів яких знімаються DCM-сигнали, пов'язана з тим, що такі сенсори можуть бути напряму підключені до входу лічильника мікропроцесора без використання аналогово-цифрового перетворення або зв'язуючих логічних мікросхем, що спрощує процес обробки вимірюного сигналу та збільшує час автономної роботи пристроїв [5].

Проведено експериментальні дослідження вібраційних характеристик двигунів власних потреб Дарницької ТЕЦ. За допомогою розробленого вібраційного модуля багаторівневої ІВС діагностики було здійснено вимірювання та обробку вібраційних інформаційних сигналів, що реєструвались на підшипникових вузлах та обертовому валу електродвигуна типу DKRAI-4519-4V (вир. Німеччина), з параметрами $P = 710$ кВт; $U = 3000$ В; $I = 156$ А; $n = 1490$ об/хв. (рис. 2).

Згідно міжнародного стандарту ISO 10816-3:1998 «Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurement on non-rotation parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/mand 15000 r/min when measure dinsitu (IDT)», який діє в Україні, ЕМ DKRAI-4519-4V відноситься до групи 1 відповідної класифікації за потужністю. Сенсор на ЕМ розміщується згідно стандарту ISO 10816-3:1998.

Обробка вібраційного сигналу проводилась за допомогою вікна Бартлетта. На рис. 3 наведено графік спектру потужності вимірюного сигналу. На момент проведення експериментальних досліджень ІВС визначила частоту обертів роботи двигуна – 24,9 Гц.

Виконані вимірювання та аналіз підтверджують можливість використання розробленого зразка ІВС для проведення діагностування обертових вузлів двигуна власних потреб з віддаленим розташуванням блока сенсорів.

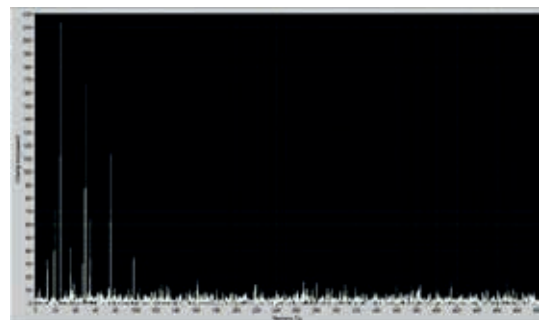


Рис. 3. Спектр потужності вібраційного сигналу

Визначення режимів роботи регулюючих засобів вітроустановок. За результатами статистичної обробки вібраційних інформаційних сигналів були встановлені спектрально-кореляційні характеристики. Отримані характеристики дозволили встановити основні діагностичні ознаки, що надають можливість визначати технічний стан вузлів ЕО (енергетичного обладнання), що діагностуються.

Успішний розвиток малої вітроенергетики неможливий без забезпечення надійної роботи та заданого ресурсу ВУ, що обумовлюється рядом нормативних Європейських документів [6, 7]. Основним напрямком вирішення даних задач є забезпечення певних параметрів функціонування ВУ в процесі її експлуатації.

Аналіз відмов елементів ВУ вітчизняних виробників та матеріалів Національного центру по дослідженню альтернативних технологій (НСАТ) [8], показує, що найбільш частими є руйнування в місцях кріплення лопатей, особливо в швидкохідних установках. Причиною даних руйнувань є навантаження в лопатях, які обумовлені режимами функціонування ВУ, що забезпечуються певними регулюючими засобами.

Метою наукових досліджень даного проекту було визначення режимів роботи регулюючих засобів ВУ для підвищення їх надійності та ресурсу. Для реалізації даного проекту були проведені наступні етапи робіт:

- розроблено математичні моделі статичних та динамічних процесів в аеромеханічних регулюючих засобах роторів вітроустановок з відцентровим регулятором;
- розроблено експериментальний зразок аеромеханічного регулюючого засобу роторів вітроустановок з відцентровим регулятором та проведено дослідження його на аеродинамічному стенді;
- розроблено методику вибору оптимальних параметрів аеромеханічних регулюючих засобів роторів вітроустановок з відцентровим регулятором та методику визначення навантажень в лопаті з урахуванням вітрового кадастру для забезпечення ресурсу згідно Європейських стандартів;
- проведено вибір параметрів та розрахунок складових частин дослідного зразка вітроелектричної установки з відцентровим регулятором ротора потужністю до 4 кВт;
- розроблено технічний проект дослідного зразка вітроелектричної установки з відцентровим регулятором ротора потужністю до 4 кВт.

На основі нових математичних моделей відцентрового регулятора ротора ВУ для флюгерного та антифлюгерного регулювання були визначені статичні характеристики відцентрового регулятора в залежності від наступних його параметрів:

кута встановлення відцентрових тягарців; кута встановлення кривошипа; жорсткості пружини регулювання. При різних співвідношеннях моментів інерції лопаті та відцентрових тягарців та на основі отриманих статичних характеристик проведено аналіз впливу кожного з параметрів відцентрового регулятора на діапазон відхилень обертів ротора від номінальних значень.

Для визначення динамічного стану ВУ було розроблено математичну модель динамічних процесів в аеромеханічних регулюючих засобах роторів ВУ з відцентровим регулятором, що описується системою нелінійних диференціальних рівнянь у визначених узагальнених координатах та приведено їх до системи лінійних диференціальних рівнянь з коефіцієнтами, що враховують параметри та характеристики як ротора, так і відцентрового регулятора. Розв'язання даної системи рівнянь дозволило отримати в операторній формі рівняння руху системи регулювання в узагальнених координатах та рівняння руху з урахуванням зовнішніх збурень – раптове збільшення (зменшення) швидкості вітру при постійному навантаженні, або раптове збільшення (зменшення) навантаження при постійній швидкості вітру та визначити умови стійкості системи регулювання з урахуванням аеромеханічних характеристик ротора і параметрів відцентрового регулятора, відповідно, для флюгерного та антифлюгерного регулювання.

При динамічних дослідженнях було визначено відхилення обертів ротора ВУ з відцентровим регулятором при зовнішніх збуреннях при флюгерному та антифлюгерному регулюванні, а саме: при збільшенні та зменшенні швидкості вітру; при зменшенні та збільшенні навантаження. Для параметрів та характеристик ротора експериментальної установки та параметрів відцентрового регулятора, при яких проводились динамічні випробування, були розраховані коефіцієнти у відповідності з діаграмою Вишнеградського, які відповідають аперіодичному перехідному процесу та підтверджують, що динамічні відхилення обертів не виходять за межі відхилень при статичних навантаженнях.

Було отримано експериментальні статичні характеристики регулюючих засобів роторів ВУ з відцентровим регулятором при флюгерному та антифлюгерному регулюванні в залежності від наступних параметрів: моменту навантаження на роторі; моменту інерції відцентрових тягарців; кута встановлення відцентрових тягарців; величини початкового натягу пружини регулювання.

З урахуванням аеродинамічних характеристик профілю і геометричних параметрів лопаті розроблені методика вибору оптимальних параметрів відцентрових регуляторів роторів ВУ та методика визначення навантажень в лопаті та розрахунку її

на міцність, що дозволить використовувати їх розробникам ВУ малої потужності при проектуванні нових моделей.

При проведенні аналізу аеродинамічних характеристик профілю лопаті вони були класифіковані за величиною підйомної сили, величиною оберненої якості та формою її кривої, в залежності від кута установки профілю. Визначені пріоритетні аеродинамічні профілі для роторів ВУ малої потужності з урахуванням енергетичних втрат в роторі (кінцеві, профільні та кручення слутного струменя за ротором), а саме профілі серії GAW та FX, що дозволяють отримати коефіцієнт використання енергії вітру $C_p = 0,53 \dots 0,57$ в діапазоні швидкохідностей $Z = 6 \dots 11$.

При розробленні методики визначення навантажень в лопаті з урахуванням вітрового кадастру для забезпечення ресурсу згідно Європейських стандартів попередньо було проведено:

- аналіз режимів роботи вітроустановки та навантажень;
- аналіз моделей розрахунку лопаті на міцність.

Для розробки технічного проекту дослідного зразка вітроелектричної установки з відцентровим регулятором ротора потужністю до 4 кВт попередньо був проведений вибір параметрів та розрахунок складових частин вітроелектричної установки (ВЕУ). При цьому були запропоновані і обґрунтовані критерії по визначенню конкретних величин даних параметрів з використання для окремих з них методу парних порівнянь і на їх основі визначено основні параметри ВЕУ.

Методика вибору параметрів та характеристик аеромеханічних регулюючих засобів роторів вітроустановок з відцентровим регулятором та методики визначення навантажень і розрахунку на міцність лопатей вітроустановки планується використати на підприємствах, що розробляють та виготовляють вітроустановки малої потужності: ТОВ «ГРЕСА-ГРУПП» (м. Київ), ПП «Світ вітру» (м. Харків), ТОВ «КАРБОН» (м. Київ) та в навчальному процесі в НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Технічний проект дослідного зразка ВЕУ потужністю до 4 кВт планується до реалізації на вищезгаданих підприємствах та на виробничих потужностях інших зацікавлених інвесторів.

Висновки

1. Реалізація проекту дозволила отримати нові математичні моделі статичних та динамічних процесів в аеромеханічних регулюючих засобах роторів вітроустановок з відцентровим регулятором, провести їх експериментальну перевірку та на їх

основі розробити методику по вибору параметрів та характеристик аеромеханічних регулюючих засобів роторів вітроустановок з відцентровим регулятором та методику визначення навантажень і розрахунку на міцність лопатей вітроустановки, які будуть використані розробниками при проектуванні нових вітроустановок.

2. Розроблений технічний проект дослідного зразка вітроелектричної установки потужністю до 4 кВт дозволить в короткий термін провести його виготовлення та випробовування з наступним налагодження серійного випуску зацікавленими інвесторами.

Список літератури

1. Bayar, T. (2015) Putting Wind to the Test. *Power Engineering International*, **12**, 16–18.
2. Hoelf, D. (2016) When Virtual meets Reality. *Ibid*, **9**, 26–27.
3. Manning, L. (2014) Bearing up to turbine testing. *Ibid*, **2**, 32–34.
4. Зварич В.Н. (2019) Використання рішень оберненої задачі лінійних процесів авторегресії для побудови систем вібродіагностики вузлів генераторів вітроустановок. *Відновлювана енергетика*, **3**, 48–57. DOI: 10.36296/1819-8058.2019.3(58)
5. Герцик С.М., Гижко Ю.І., Зварич В.М. та ін. (2018) Особливості використання автономних вимірювальних перетворювачів для діагностування електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Технічна електродинаміка*, **5**, 73–79. DOI: 10.15407/techned2018.05.116
6. Системи турбогенераторні вітряні. Ч. 2. Безпечність малих вітряних турбін (IEC 61400-2:1996, IDT): ДСТУ ІЕС 61400-2-2001. [Чинний від 2001-12-28]. Київ, Держспоживстандарт України (Національний стандарт України).
7. GERMANISCHER LLOYD: Vorschriften und Richtlinien, Teil 1 Windenergie, Richtlinien für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. K. 1-10. – 1993 mit Ergänzung 1994 (German).
8. Todd, R.W. (1979) Small Scale Wind Energi Systems. *Wind Engineering*, **3**(4), 36–39.

References

1. Bayar, T. (2015) Putting wind to the test. *Power Engineering Int.*, **12**, 16–18.
2. Hoelf, D. (2016) When virtual meets reality. *Ibid*, **9**, 26–27.
3. Manning, L. (2014) Bearing up to turbine testing. *Ibid*, **2**, 32–34.
4. Zvarych, V.N. (2019) Application of inverse problem solutions of autoregression linear processes for construction of vibrodiagnostic systems of assemblies of wind-power station generators. *Vidnovlyuvana Energetyka*, **3**, 48–57 [in Ukrainian]. DOI: 10.36296/1819-8058.2019.3(58).48–57
5. Hertsyk, S.M., Hyzhko, Yu.I., Zvarych, V.M., Myslovych, M.V., Ostapchuk, L.B., Sysak, R.M. (2018) Peculiarities of application of independent transducers for diagnostics of electrotechnical equipment taking into account the modes of its operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **5**, 73–79 [in Ukrainian]. DOI: 10.15407/techned2018.05.116.
6. (IEC 61400-2:1996, IDT): DSTU IES 61400-2–2001: Wind turbine generator systems. Pt 2: Safety of small wind turbines. Valid from 2001-12-28. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2002 [in Ukrainian].
7. GERMANISCHER LLOYD: Vorschriften und Richtlinien, Teil 1: Windenergie, Richtlinien fuer die Zertifizierung von Windenergieanlagen, K. 1-10. – 1993 mit Ergänzung 1994 (in German).
8. Todd, R.W. (1979) Small scale wind energy systems. *Wind Engineering*, **4**, 36–39.

INCREASE OF RELIABILITY AND EXTENSION OF SERVICE LIFE OF WINDPOWER UNITS DUE TO APPLICATION OF REGULATION MEANS AND DIAGNOSTIC SYSTEMS HARMONIZED WITH THE EUROPEAN STANDARDS

Yu.I. Hyzhko¹, V.M. Holovko², M.S. Hutorova¹, V.M. Zvarych¹, V.P. Kohanievych², S.O. Kudrya², M.V. Myslovych¹, L.B. Ostapchuk¹

¹Institute of Electrodynamics of NASU. 56 Prosp. Peremohy, 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: ied1@ied.org.ua

²Institute of Renewable Energy of NASU. 20-a Hnat Khotkevich str., 02094, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@ive.org.ua

Peculiarities of application of linear AR and ARMA processes as mathematical models of vibration signals from own needs engines of TPP and CHPP and engines of wind-power units were studied. Features of construction of the prototype of a wireless information-measuring system (IMS) for diagnosing the condition of such engines were determined. The paper gives the results of experimental studies of application of IMS prototype in the case of investigation of own needs engine vibrations, namely of DKRAI – 4519-4V engine at Darnitsa CHPP, using international standards. New mathematical models were derived of static and dynamic processes in aeromechanical regulation means of rotors of wind-power units (WU) with centrifugal regulator, their experimental verification was conducted and they were used as a basis for development of a procedure for selection of the parameters and characteristics of aeromechanical regulation means of rotors of wind-power units with centrifugal regulator, and of a procedure of determination of loads and strength analysis of wind-power unit blades, which will be used by developers when designing new wind-power units. 8 Ref., 3 Fig.

Keywords: vibration diagnostics, wind generators, own needs engines, wireless information-measuring system

Надійшла до редакції 07.09.2020



Огляд світового ринку ультразвукових дефектоскопів Компанія «QY Research»

Нещодавно опубліковано звіт компанії «QY Research» «Огляд світового ринку ультразвукових дефектоскопів». Він розроблений таким чином, щоб допомогти читачам отримати нову уяву про загальний стан ринку та його найбільш прибуткові сектори. Також у звіті представлені точні статистичні дані. У ньому розглядаються історичні досягнення та можливості, які існують в даний час на світовому ринку ультразвукових дефектоскопів. У звіті компанії «QY Research» основна увага приділяється споживанню, географії, типам, використанню та конкурентному середовищу.

Звіт ретельно вивчений та складений галузевими експертами та буде цікавий користувачам цифрових дефектоскопів.

У звіті представлено продукцію наступних виробників:

Olympus, Advanced NDT, Krautkramer, OKO Association Group, Hitachi Power Solutions, Roop Telsonic, Sonatest, GE, MODSONIC, Magnetic Analysis Corporation, Danatronics, Acoustic Control Systems, HUATEC Group, Oceanscan та інших.

Головні розділи звіту:

1 Охоплення досліджень

- 1.1 Вступ в ультразвукові дефектоскопи
- 1.2 Сегменти ринку
- 1.3 Основні виробники ультразвукових дефектоскопів: рейтинг за продажами
- 1.4 Ринок за типами
 - 1.4.1 Глобальні темпи зростання об'єму ринку ультразвукових дефектоскопів за типами
 - 1.4.2 Портативні ультразвукові дефектоскопи
 - 1.4.3 Стационарні ультразвукові дефектоскопи
- 1.5 Ринок за заявками
 - 1.5.1 Глобальні темпи зростання об'єму ринку ультразвукових дефектоскопів в залежності від області застосування
 - 1.5.2 Нафта та газ
 - 1.5.3 Гірська справа
 - 1.5.4 Автомобільна промисловість
 - 1.5.5 Машинобудування
 - 1.5.6 Енергетичні компанії
 - 1.5.7 Аерокосмічна промисловість
 - 1.5.8 Інше
- 1.6 Цілі досліджень
- 1.7 Час, охоплений в дослідженні

2 Короткий зміст

- 2.1 Об'єм світового ринку ультразвукових дефектоскопів, оцінки та прогнози
 - 2.1.1 Світова виручка від продажу ультразвукових дефектоскопів, 2015–2026 рр.
 - 2.1.2 Світові продажі ультразвукових дефектоскопів в 2015–2026 рр.
- 2.2 Світові ультразвукові дефектоскопи, розмір ринку по регіонах-виробниках: 2015, 2020, 2026 рр.
- 2.3 Історичний розмір ринку ультразвукових дефектоскопів по регіонах (2015–2020 рр.)
 - 2.3.1 Глобальний ретроспективний ринковий сценарій продажу ультразвукових дефектоскопів по регіонах
 - 2.3.2 Глобальний ретроспективний ринковий сценарій доходів від продажу ультразвукових дефектоскопів по регіонах
- 2.4 Оцінка та прогнози ринку ультразвукових дефектоскопів по регіонах (2021–2026 рр.)
 - 2.4.1 Глобальний прогноз продаж ультразвукових дефектоскопів по регіонах
 - 2.4.2 Глобальний прогноз доходів від продажу ультразвукових дефектоскопів по регіонах

Більш докладну інформацію або зразок звіту можна отримати по E-mail: fendi@qyresearch.com.

Компанія «QY Research», заснована в 2007 році, спеціалізується на індивідуальних дослідженнях, управлінському консалтингу, консультаціях по IPO, дослідженнях галузевих ланцюгів, а також на послугах створення баз даних та організації семінарів. «QY Research» має більше 4000 всесвітньо відомих клієнтів, що охоплюють більше 30 галузей, що включають енергетику, автомобілебудування, фармацевтику, хімічну промисловість, сільське господарство та т. п. «QY Research» побудувала дослідницькі або маркетингові центри в Китаї, США, Канаді, Німеччині, Великобританії, Франції та ін.

В даний час «QY Research» є кращим, гідним та надійним консалтинговим брендом в сфері глобальних бізнес-консалтингових послуг. На даний момент «QY Research» обслуговує більшість компаній зі списку Fortune 500.

ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЮ СИСТЕМОЮ УКРАЇНИ*

В.Ф. Чекурін¹, Ю. В. Пономарьов², М.Г. Притула², О.М. Химко³

¹Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3-б.
E-mail: adm@iapmm.lviv.ua

²Науково-дослідний інститут транспорту газу АТ «Укртрансгаз». 61004, м. Харків, вул. Конєва, 16.
E-mail: titarev-aa@utg.ua

³Національний університет «Львівська політехніка». 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12.
E-mail: coffice@lpnu.ua

У статті розглядається варіант поетапної автоматизації управління газотранспортною системою України з використанням методології, визначеної стандартом ANSI/ISA-95, та сучасних методів управління цілісністю трубопроводів. Підхід передбачає збереження та розвиток наявних засобів автоматизації технологічних процесів, а також вже впроваджених систем моделювання, планування, оптимізації та керування магістральними газопроводами і підземними сховищами газу та формування на їхній основі системи автоматизації оперативного управління, яка задовольняє вимогам цього стандарту. Автоматизація управління газотранспортною системою за запропонованим підходом є сукупністю двох процесів, кожен із яких складається із трьох етапів, які виконуються ітераційно. Перший процес: створення системи оперативного управління, запровадження автоматичного моніторингу параметрів технологічних і фізичних процесів та формування інформаційної системи у частині забезпечення оперативного управління та керування технологічними процесами. Другий процес: формування інформаційної системи у частині забезпечення бізнес-процесів, впровадження автоматизованої системи корпоративного управління та впровадження автоматичного моніторингу бізнес процесів. Бібліогр. 25, рис. 6.

Ключові слова: газотранспортна система, автоматизація управління, управління цілісністю магістральних газопроводів, MES

Газотранспортна система (ГТС) – це комплекс взаємозв’язаних магістральних газопроводів (МГ) і підземних сховищ газу (ПСГ), оснащених компресорними станціями, запірно-регулювальною арматурою, іншими технологічними елементами, які в сукупності утворюють цілісний інженерний об’єкт. Як логістична система, ГТС створює додаткову вартість, реалізуючи замовлення на транспортування і зберігання природного газу. Газотранспортна система України є другою за потужністю в Європі. Вона забезпечує доставку природного газу внутрішнім користувачам, його зберігання в підземних сховищах, транзит у суміжні країни [1]. Україна активно реформує свою газотранспортну систему відповідно до європейських і світових стандартів: з 1 січня 2020 р. в результаті анбандлінгу функція управління ГТС передана від АТ «Укртрансгаз» незалежній компанії «Оператор ГТС України» [2].

Висока ефективність МГ досягається застосуванням труб великого діаметру та підтриманням високого тиску газу в магістралях за допомогою компресорних станцій. За таких умов неконтрольована розгерметизація МГ може мати негативні наслідки, загрозливі як для людей, так і довкілля [3]. Тому технологічні об’єкти МГ, зокрема такі,

як газорозподільні станції, резервні нитки, переходи через природні та штучні перешкоди, класифікуються як об’єкти підвищеної небезпеки [4–6].

За тривалої експлуатації надійність технологічних об’єктів неминуче знижується. Значна частина магістральних газопроводів України вже вичерпали свої проектні терміни експлуатації [3]. Технічне обслуговування та планові відновлювальні ремонти підтримують надійність об’єктів МГ у певних межах. Проте все ж існують загрози порушення цілісності технологічних об’єктів МГ і пов’язані із ними ризики виникнення ситуацій, небезпечних для довкілля і людей, а також зростають рівні можливих матеріальних та фінансових втрат. Тому реформування стратегічного управління ГТС необхідно супроводжувати відповідними змінами на оперативному і технологічному рівнях [2]. Зокрема, для підвищення керованості цієї системи та ефективності її експлуатації необхідно автоматизувати інформаційні та бізнес процеси на стратегічному та оперативному рівнях із застосуванням математичного моделювання та комп’ютеризації. Слід запроваджувати систему управління цілісністю МГ. Безперервний контроль цілісності МГ, які експлуатують тривалий час, дозволяє знизити ймовірність неконтрольованої розгерметизації МГ.

*За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин» («Ресурс»), отриманих за 2016–2020 рр.

Чекурін В.Ф. – <http://orcid.org/0000-0003-4973-3670>, Пономарьов Ю. В. – <http://orcid.org/0000-0002-5677-3657>

Притула М.Г. – <http://orcid.org/0000-0001-9259-4114>, Химко О.М. – <http://orcid.org/0000-0003-2641-8133>

© В.Ф. Чекурін, Ю. В. Пономарьов, М.Г. Притула, О.М. Химко, 2020

Це узгоджується з нормативними документами [5, 6] і сучасними підходами до управління цілісністю трубопровідних транспортних систем [7–12].

У статті розглядається варіант поетапної автоматизації управління газотранспортною системою України з використанням методології, визначеної стандартом ANSI/ISA-95 [13], та сучасних методів управління цілісністю трубопроводів PIMS (Pipeline Integrity Management). Підхід передбачає збереження та удосконалення наявних засобів автоматизації технологічних процесів і систем моделювання, планування, оптимізації та керування магістральними газопроводами і підземними сховищами газу та формування на їхній основі системи автоматизації оперативного управління, яка задовольняє вимогам цього стандарту.

Аналіз актуального стану автоматизації управління ГТС України. Згідно з даними Департаменту автоматизації та зв'язку АТ «Укртрансгаз», яке до 2020 р. було оператором ГТС України, на корпоративному рівні управління функціонує комп'ютерна мережа, яка налічує 100 вузлів по всій території України. За допомогою платформ Nureg-V та Oracle-VM реалізоване віртуальне обчислювальне середовище. В мережі встановлені служба каталогів та сервіс DNS, які забезпечують єдину автентифікацію та авторизацію користувачів та розділення прав їх доступу до каталогів та ресурсів, єдине сховище даних, а також сервіси Microsoft System Configuration Manager та System Center Operation Manager, які забезпечують моніторинг стану всієї ІТ-інфраструктури, автоматичне оновлення програмного забезпечення, віддалене керування всіма робочими станціями та антивірусний захист. В АТ «Укртрансгаз» запроваджені корпоративні комунікаційні сервіси – система уніфікованих комунікацій MS Lync 2013 та єдина система корпоративної електронної пошти MS EXCHANGE 2013, а також система ІР-телефонії. До систем автоматизації інформаційних процесів слід віднести також централізовану службу підтримки користувачів ІТ, яка підтримує єдине вікно реєстрації інцидентів ІТ, розподілення запитів відповідно до сфер відповідальності ІТ-спеціалістів, облік виконання запитів на технічне обслуговування, цілодобову підтримку та консультації користувачів. Служба функціонує відповідно до міжнародних практик організації ІТ процесів MOF/ITIL¹. На корпоративному рівні керування підприємством діє також комплексна автоматизована система керування, створена на основі програмного забезпечення SAPERP. Вона забезпечує єдиний механізм обліку та керування матеріальними активами.

На рівні оперативного диспетчерського управління створена обліково-аналітична система опе-

ратора газосховищ України, яка використовує СКБД ORACLE та вирішує наступні задачі: ведення режимного журналу, добовий баланс газу, крановий журнал, журнал роботи газоперекачувальних агрегатів (ГПА), облік енергоресурсів на технологічні потреби, облік фізико-хімічних параметрів газу. Тут використовують також програмні комплекси, створені ТЗОВ «Математичний центр» і відділом розробки систем оптимального планування та прогнозування режимів роботи ГТС Науково-дослідного інституту транспорту газу АТ «Укртрансгаз». Це, зокрема, система моделювання, планування, оптимізації та формування параметрів керування газовими потоками (МПОК МГ «МЦ») та система моделювання, планування, оптимізації та керування роботою ПСГ (МПОК ПСГ «МЦ»), які експлуатують диспетчерські служби та підрозділи філії «Оператор ПСГ» АТ «Укртрансгаз». Група розробників програмних комплексів автоматизації оперативного управління здійснює їх супровід і постійно розширює їхній функціонал відповідно до потреб користувачів цих систем. Для підтримки прийняття рішень з диспетчерського керування в диспетчерських відділах та виробничих управліннях об'єднаної газотранспортної системи України (ОГСУ) було впроваджено програмний комплекс імітаційного моделювання технологічних процесів ПСГ.

На рівні керування технологічними процесами впроваджено автоматизовану систему диспетчерського керування (АСДК) на базі SCADA пакету ClearSCADA, що складається з територіально рознесених SCADA-серверів. При такому підході структура розподіленої системи подібна структурі самого об'єкта автоматизації. Функції збирання, обробки даних, керування та обчислення розподілені серед SCADA-серверів різних рівнів організаційної структури філії «Оператор ПСГ» АТ «Укртрансгаз». Кожен сервер є автономним, працює зі своєю групою об'єктів локального рівня автоматизації. На цьому рівні встановлені системи автоматизованого та автоматичного керування технологічними об'єктами ПСГ. Автоматика компресорних станцій включає систему автоматичного контролю (САК) ГПА та компресорних цехів, а також системи протипожежного захисту, контролю вібрації, енергозабезпечення, контролю загазованості, виявлення та гасіння пожеж. ПСГ оснащені системами запалювання газомотокомпресорів (ГМК), управління компресором, очищення газу, сушіння газу, регенерації діетиленгликолю (ДЕГ) ПСГ. Для контролю параметрів газових потоків у МГ, шлейфово-колекторних системах і в свердловинах ПСГ використовують прилади вимірювання тиску, температури. Останнім часом встановлюють накладні ультразву-

¹ MOF – Microsoft Operations Framework, ITIL – Information Technology Infrastructure Library.

кові системи для вимірювання швидкості потоку в трубопроводах.

На основі проведеного аналізу актуального стану автоматизації управління ГТС України слід зазначити, що сучасний стан автоматизації ГТС України є наслідком розрізної модернізації окремих об'єктів газотранспортної інфраструктури, окремих технологічних процесів та напрямків управління, яку проводили в останні десятиліття. В АТ «Укртрансгаз» створена інформаційна інфраструктура, яку використовують переважно для надання доступу до обчислювальних ресурсів та комунікаційних послуг, але доступ до повного переліку оперативних технологічних даних та дистанційне керування стримується низьким розвитком мережі передавання даних технологічного та польового рівня. Локальний рівень автоматизації ПСГ та ГТС укомплектований сучасними системами телемеханіки та автоматики та засобами вимірювання параметрів технологічних процесів вкрай недостатньо. Також слід зазначити, що автоматизацію технологічних процесів і комп'ютеризацію управління ГТС на оперативному та стратегічному рівнях проводили без належної координації дій і прагнення забезпечити інформаційну сумісність засобів автоматизації різних рівнів управління. Тому попри високий рівень комп'ютеризації та розвинуто ко-

мунікаційну інфраструктуру, наявність потужних програмних комплексів оперативного управління та засобів автоматизації технологічних процесів, ефективність системи управління ГТС істотно стримується відсутністю достатньої автоматизації польового та локального рівня автоматизації, мережі передавання технологічних даних, автоматизованого обміну даними на вертикалі «керування технологічними процесами – стратегічне управління».

Структура управління ГТС України. В структурі управління ГТС відокремимо п'ять напрямків: управління інформаційними процесами (УІП), стратегічне управління бізнес-процесами (СУБП), управління транспортуванням газу (УТГ), управління підземним зберіганням газу (УПЗГ) та управління експлуатацією (УЕ) (рис. 1).

Управління інформаційними процесами відповідає за підтримання інформаційних потоків між підсистемами ГТС та процесами, які у ній циркулюють, обмін інформацією із зовнішніми джерелами, формування та підтримку баз даних і баз знань на основі інформації, отриманої із внутрішніх і зовнішніх джерел, надання інформаційних сервісів за запитами користувачів тощо. Інформаційні процеси забезпечують відбір та нагромадження даних про: параметри фізичних процесів, які протікають у газі ГТС, спорудах ГТС та до-

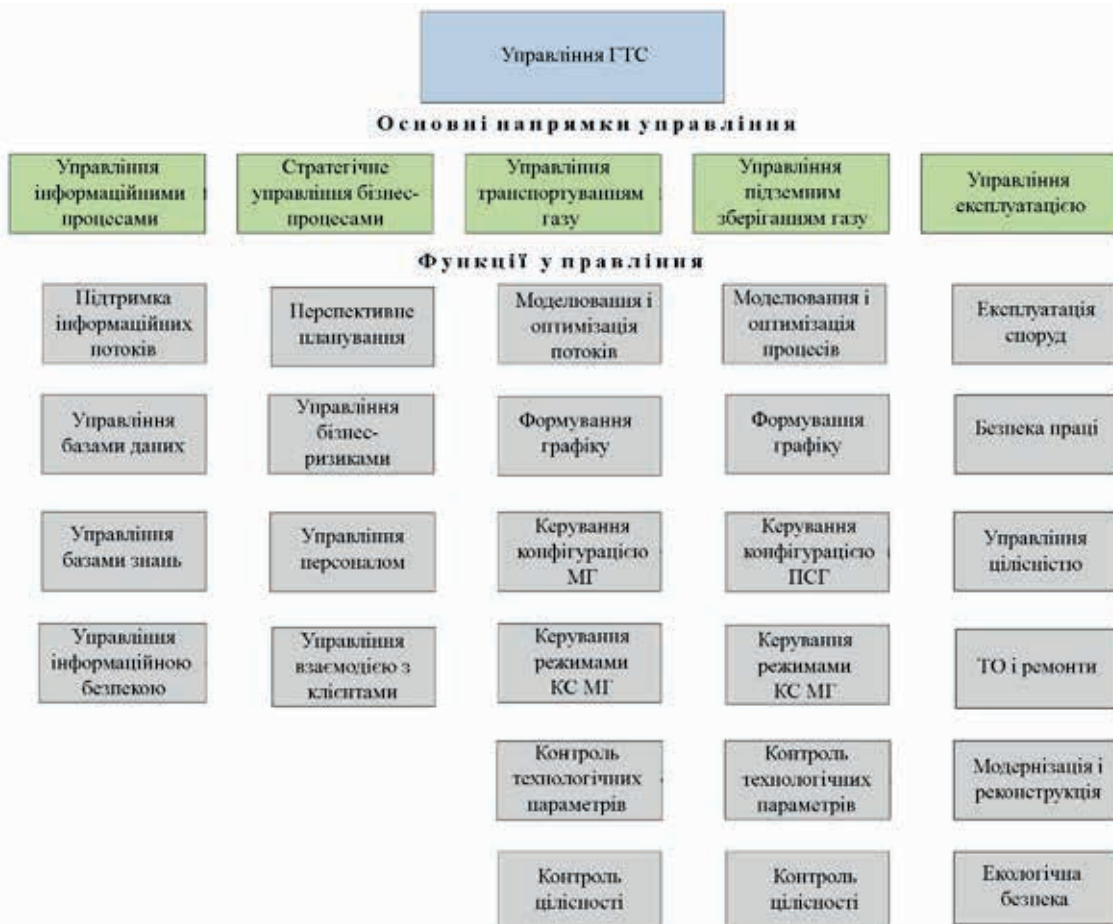


Рис. 1. Структура управління ГТС

вкіллі, стан технологічного устаткування, стан та тенденції розвитку виробничого та інтелектуального потенціалів, матеріальні та фінансові потоки, економічну ефективність роботи ГТС.

Управління бізнес-процесами має на меті: досягнення максимальної економічної ефективності роботи ГТС; точне виконання зобов'язань, взятих перед постачальниками і споживачами природного газу; розвиток інфраструктури ГТС відповідно до короткострокових і довгострокових прогнозів розвитку ринку газотранспортних послуг; мінімізацію екологічного та бізнес-ризиків

Результатом дії бізнес-процесів є формування завдань, планів та графіків, які використовують для управління транспортуванням і підземним зберіганням газу. Ці процеси цілком визначають роботу інформаційно-технічного комплексу (ІТК) ГТС: розподіл газових потоків в мережі; керування усім технологічним устаткуванням лінійної частини, компресорних станцій, ПСГ; проведення технічного обслуговування, аварійно-відновлювальних робіт, реконструкції тощо; керування технологічними і екологічними ризиками.

Модель системи автоматизації управління ГТС. Система автоматизації управління (САУ) ГТС – програмно-апаратний комплекс, складові якого діють на усіх рівнях управління – технологічному, оперативному та стратегічному (корпоративному) та пов'язані між собою горизонтальними і вертикальними інформаційними потоками (рис. 2).

САУ ГТС України доцільно створювати із застосуванням методології MES (Manufacturing Execution Systems), визначеної стандартом ANSI/ISA-952 [10-13], який базується на моделі функціональної ієрархії корпорації PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture) [14]. Це дозволить використати під час реконструкції існуючу інфраструктуру автоматизації технологічних процесів і наявні засоби автоматизації управління на оперативному і стратегічному рівнях.

На рівні стратегічного управління можна використовувати готові програмні рішення, які здатні забезпечити усі чотири функції управління цього напрямку (рис. 1). Це, зокрема, системи, створені для управління крупними корпораціями і призначені для планування ресурсів підприємства ERP (Enterprise Resource Planning), автоматизовані системи взаємодії з клієнтами CRM (Customer Relationship Management) і управління персоналом HRM (Human Resources Management System) тощо (рис. 2).

На рівні оперативного управління MOM (Manufacturing Operations Management) діють три САУ (рис. 2), які забезпечують автоматизацію управління транспортуванням газу (САУ ТГ), його підземним зберіганням (САУ ПЗГ) та експлуата-

цією споруд ГТС (САУЕ). Кожна САУ оснащена інструментарієм, необхідним для автоматизації функцій управління відповідного напрямку (рис. 1).

Наприклад, САУ ТГ має у своєму складі математичне забезпечення для моделювання та оптимального керування режимами течії газу, оптимізації структури мережі, а також контролю параметрів потоків, цілісності МГ, балансування газу. Програмно-технічні засоби САУ ТГ забезпечують автоматизацію усіх шести функцій напрямку «Управління транспортуванням газу».

На другому рівні використовують інтелектуальні системи, призначені для оброблення даних, які надходять зі сенсорного шару першого рівня, та вироблення сигналів управління виконавчими пристроями цього рівня. Це програмовані логічні контролери PLC, розподілені системи автоматичного керування DCS (Distributed Control Systems), системи відбору даних та керування технологічними процесами SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) тощо.

Системи кожного рівня пов'язані комунікаційними мережами. На першому рівні діє мережа передавання сигналів і даних, а на другому – мережа автоматизації технологічних процесів. Ці два рівні пов'язані між собою каналами передавання даних, якими вони обмінюються: з першого на другий надходять дані про параметри процесів, отримані вимірювальними пристроями, а у зворотному напрямку передаються сигнали управління для виконавчих пристроїв першого рівня.

Дані, сформовані на другому рівні системами SCADA, DCS та іншими, передаються на рівень оперативного управління. Тут здійснюється консолідація даних нижніх рівнів і розміщення їх в інформаційній системі (ІС), яка містить бази даних об'єктів ГТС (БДО), режимів і конфігурацій (БДКіР), технологічної інформації (БДТІ), стратегічного управління (БДСУ) та репозиторії документів різних рівнів управління. До цих баз даних мають також доступ комп'ютеризовані системи,

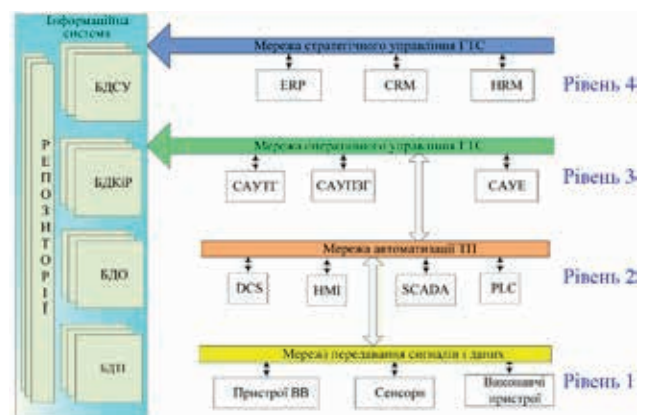


Рис. 2. Структура САУ ГТС

² Відповідний міжнародний стандарт, відомий як IEC 61512.

що діють на четвертому (корпоративному) рівні. В такий спосіб забезпечується інформаційна взаємодія засобів автоматизації управління третього і четвертого рівнів. Обмін інформацією в межах рівнів МОМ та стратегічного, як і з базами даних ІС відбувається за посередництвом мереж оперативного і стратегічного управління.

Запропонована структура САУ ГТС дозволить автоматизувати функції управління газотранспортною системою України на усіх напрямках та забезпечить безперервність інформаційних потоків на вертикалі «керування технологічними процесами – оперативне управління ГТС – управління бізнес-процесами» зі збереженням існуючих систем автоматизації технологічних процесів і засобів комп'ютеризації управління на корпоративному рівні.

Модель системи моніторингу цілісності МГ.

Сучасні підходи до організації безпечної експлуатації газотранспортних систем перебачають відхід від періодичної сертифікації технологічних об'єктів ГТС на користь безперервного управління їхнім технічним станом і цілісністю. З цією метою створюють системи управління цілісністю трубопроводів PIMS. Ключовими функціями PIMS є діагностика технічного стану об'єктів, виявлення загроз порушення їхньої цілісності, оцінювання ризиків, планування, розробка та реалізація заходів для запобігання подій, пов'язаних з порушенням цілісності технологічних об'єктів.

У статті [15] розглянуто модель структури програмно-технічного комплексу для управління ГТС і проведено аналіз функцій складових цього комплексу.

Відповідно до цього підходу в структурі управління ГТС (рис. 1) у напрямках УТГ та УПЗГ передбачені функції контролю цілісності МГ та ПСГ, а в напрямку УЕ – функція управління цілісністю ГТС. Відповідні підсистеми автоматизації цих функцій входять до складу САУТГ, САУПЗГ та САУЕ (рис. 2). У сукупності ці підсистеми формують систему автоматизації управління цілісністю ГТС (САУ ЦГТС).

Контроль цілісності як МГ, так і ПСГ можна звести до контролю технологічних об'єктів, що входять до їхнього складу. У моделі [16] МГ розглядається як лінійна структура секцій його лінійної частини (ЛЧ), довжина яких 120...150 км, послідовно з'єднаних через компресорні станції (КС). Відповідно до цього у запропонованому підході [16, 17] окремо розглядається контроль цілісності ЛЧ і компресорних станцій МГ.

Секція ЛЧ МГ являє собою нитку, зварену з окремих труб і покладену підземним чи надземним способом. До ЛЧ входять також кранові вузли, лупінги і відводи від основної магістралі, переходи через природні та штучні перешкоди тощо. Кранові вузли встановлюють на ЛЧ МГ на відстанях,

не менших 30 км. Крім того, їх розміщують з обох сторін переходів через природні і штучні перешкоди, на всіх відводах, на ділянках, прилеглих до КС, на відстані 500...700 м до кордонів їх території.

Виходячи із цього, у статті [16] модель секції ЛЧ МГ розглядається як лінійна структура, що складається із лінійних елементів (ЛЕ), пов'язаних вузловими елементами (ВЕ). ЛЕ – це відрізки труб, довжина яких набагато більша за їхній внутрішній діаметр. Рух газу в них описує система диференціальних рівнянь з частинними похідними, залежними від осової координати і часової змінної. Натомість ВЕ відповідають технологічним об'єктам ЛЧ МГ відносно невеликої довжини. Рух газу в таких елементах можна з достатньою точністю описати системою звичайних диференціальних рівнянь, залежних від часової змінної.

У працях [18, 19] розвинені математичні моделі динаміки газу в ЛЕ МГ, сформульовані крайові задачі для дослідження стаціонарних і перехідних режимів течії газу в таких елементах, розроблені чисельні методи розв'язування та поведені кількісні дослідження параметрів течії газу в МГ, які можна використати як інформативні для задач оптимізації і контролю цілісності ЛЧ МГ. На цій основі в праці [16] запропонована математична модель для контролю цілісності лінійних елементів ЛЧ МГ, а у статті [17] розвинено метод контролю цілісності ЛЕ ЛЧ МГ, що базується на цій моделі і даних моніторингу газодинамічних параметрів течії газу на входах і виходах ЛЕ секції. Подібний підхід відомий у літературі як RTTM (Real Time Transient Modeling) [20]. Однак деталі його реалізації у публікаціях не описані. Тому ми розробили власний математичний апарат і алгоритми реалізації методу контролю цілісності ЛЕ.

Для контролю цілісності ВЕ пропонується застосувати підхід, який базується на використанні явища акустичної емісії, що виникає за розгерметизації ВЕ. Запропонований метод контролю цілісності ВЕ шляхом аналізу сигналів декількох перетворювачів акустичної емісії (ПАЕ), встановлених на поверхні ВЕ. Аналізуючи сигнали ПАЕ, за цим методом можна визначити момент та місце розгерметизації. Реалізація цього методу описано, зокрема, в літературі [21–23]. Ми пропонуємо застосувати метод акустичної емісії також і для контролю цілісності підземних ділянок трубопроводу, на яких шляхом внутрішньо-трубної діагностики (чи іншим неруйнівним методом) виявлені дефекти тіла труби. Згідно з нормативними документами, якщо розміри виявлених дефектів не перевищують заданих допустимих значень, то дозволяється подальша експлуатація ділянки за умови здійснення посиленого контролю її цілісності.

Запропонований підхід для контролю цілісно-

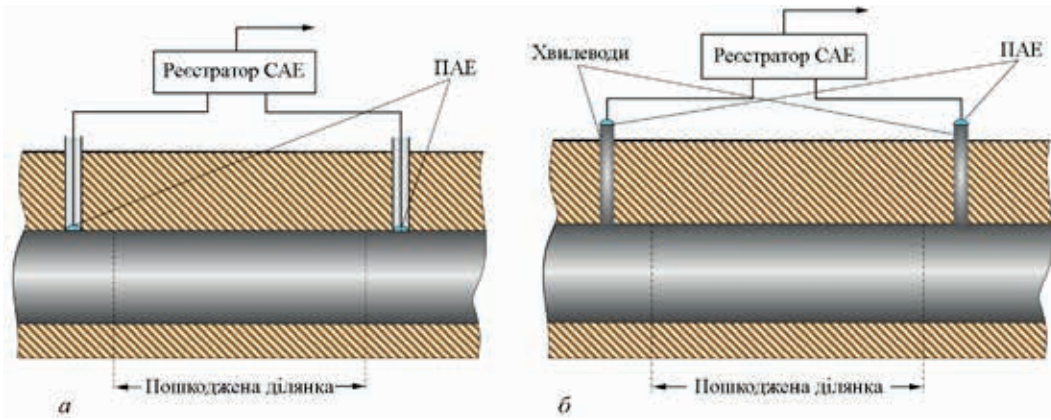


Рис. 3. Схеми відбору даних про параметри хвиль акустичної емісії на ділянках МГ з пошкодженнями тіла труби, виявленими методами внутрішньотрубно́ї діагностики

сті такої ділянки за параметрами пружних хвиль, які виникають у стінці трубопроводу внаслідок витoku газу після утворення наскрізного дефекту. Для відбору інформативних параметрів за цим методом використовуються ПАЕ, сигнали яких містять інформацію про параметри хвильових процесів у тілі труби, спричинених акустичною емісією. На рис. 3. показані дві схеми відбору даних із використанням ПАЕ.

Система моніторингу цілісності секції ЛЧ включає в себе відповідні системи усіх її технологічних об'єктів, які представлені як лінійними, так і вузловими елементами.

На рис. 4 показана структура системи моніторингу цілісності технологічного об'єкта (ТО) ЛЧ (OIM – Object Integrity Monitorng). Така схема дозволяє зафіксувати момент виникнення витoku і визначити місце розгерметизації. Система OIM має у своєму складі комп'ютер керування CC (Control Computer), систему моніторингу інформативних параметрів IPM (Informative Parameters Monitoring), алгоритми контролю цілісності об'єкта (OICP – Object Integrity Checking Processes), базу даних об'єкта контролю ODB (Object Database), підсистему обміну даними (CS – Communication Subsystem), підсистему інформаційної безпеки (IS – Informational Security). Система IPM має у своєму складі первинні перетворювачі SD (Sensor Devise), засоби реєстрації даних DL (Data Logging) і оперативні бази даних об'єктів OODB (Object Operative Database). База даних ODB містить інформацію про параметри математичної моделі об'єкта (MMP), а також сховище да-

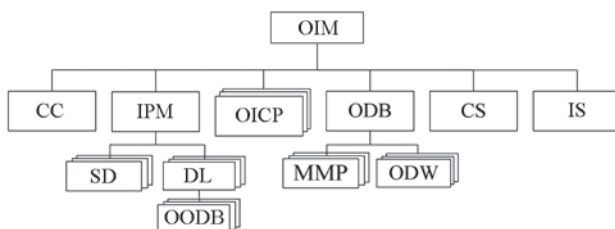


Рис. 4. Структура системи моніторингу цілісності технологічного об'єкта ЛЧ МГ

них моніторингу інформативних параметрів ODW (Object Data Warehouse).

Система контролю цілісності секції ЛЧ МГ являє собою сукупність систем контролю цілісності технологічних об'єктів цієї секції (усіх її лінійних і вузлових елементів, включно з ділянками, які містять пошкодження тіла труби).

Система моніторингу цілісності МГ містить у своєму складі системи цілісності усіх компресорних станцій і усіх секцій ЛЧ (рис. 5). Тут MPIM – це система моніторингу цілісності МГ, CC – головний комп'ютер, CSIM – система моніторингу цілісності КС, LPSIM – система моніторингу цілісності секцій ЛЧ, PIDB – база даних цілісності МГ, CS – підсистема комунікації, IS – підсистема інформаційної безпеки.

Апаратні комплекси OIM вузлових елементів розміщені на майданчиках відповідних об'єктів. Тут також розташовані апаратура OIM лінійних елементів, суміжних із відповідними BE. Обмін даними між різними OIM, а також між OIM і MPIM здійснюється з використанням каналів зв'язку штатної системи SCADA або спеціально створених каналів (наприклад, супутникового зв'язку).

Концепція поетапної автоматизації управління ГТС України. Стандарт ANSI/ISA 95 утворює концептуальну основу, в рамках якої, застосовуючи сучасні комп'ютерні та інформаційно-комунікаційні-технології, можна вирішувати проблему автоматизації управління ГТС комплексно. За цим підходом, відомим як TIA (Totally Integrated Automation) [24], системи автоматизації різних рівнів управління, від технологічного до корпоративного, слід було б створювати з «нуля».

Проте застосування комплексного підходу до автоматизації ГТС України, що було б радикальним вирішенням проблеми, вимагає не тільки

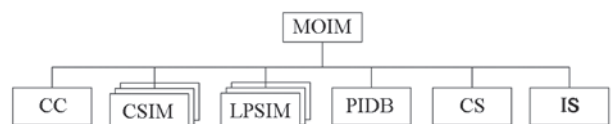


Рис. 5. Структура системи моніторингу цілісності МГ

докорінної модернізації усієї газотранспортної інфраструктури, але й запровадження цілком інших технологій менеджменту. Реалізація такого завдання для ГТС України на сучасному етапі вимагає занадто великих інвестицій як в розвиток інфраструктури, так і в інтелектуальний потенціал. Тому модернізацію управління ГТС доцільно здійснювати поетапно, зі збереженням вже існуючих засобів, шляхом автоматизації оперативного управління із використанням MES [10 –13]. З цієї метою був запропонований підхід [25], який передбачає поступове нарощування функціоналу автоматизованої системи управління ГТС (рис. 6).

Цей підхід передбачає у першу чергу створення та впровадження системи автоматизації управління на MOM рівні як MES системи згідно зі стандартом ANSI/ISA-95.

Системи оперативного управління найбільш специфічні з-поміж усіх систем автоматизації управління ГТС. Їхній функціонал жорстко пов'язаний із технологічними процесами і базується на математичних моделях виробничого обладнання, визначальних фізичних процесів, середовища функціонування виробництва тощо. Тож практично неможливо взяти одну із існуючих MES систем і налаштувати її для використання в ГТС України. Як виявилось, не вдається також і адаптувати MES системи, які були створені для інших газотранспортних систем і успішно експлуатуються, оскільки ГТС України має специфічні характеристики, які не враховані під час побудови цих систем.

Другий етап – запровадження автоматичного моніторингу технологічних параметрів і передавання їх на рівень оперативного управління. На



Рис. 6. Підхід до поетапної автоматизації управління ГТС України

цьому етапі запроваджується також автоматичне передавання команд і сигналів управління, які формуються на третьому рівні, на другий рівень, а сигналів і повідомлень підтвердження – з другого на третій рівень.

Наступний етап – створення та впровадження ІС, структура та функціонування якої узгоджується із методологією MES, моделлю PERA та процесною моделлю управління. Тут буде запроваджений автоматичний обмін даними між системою оперативного управління та спеціалізованими базами ІС. Система оперативного рівня розміщатиме в тематичних БД після попереднього оброблення дані моніторингу параметрів фізичних і технологічних процесів, дані про команди і сигнали керування, передані нею на технологічний рівень, а також про повідомлення і сигнали, отримані нею із цього рівня у відповідь.

Далі йде впровадження систем автоматизації корпоративного рівня, таких, як ERP, CRM, HRM тощо. Бізнес-логіка цих систем забезпечує формування інформації на основі даних ІС, зокрема тих, що надходять із технологічного й оперативного рівнів, і відображення її у відповідних форматах згідно запитів їхніх користувачів.

Функціонал систем автоматизації управління на корпоративному рівні не так тісно пов'язаний із технологічними процесами, як на оперативному і технологічному рівнях. Тому тут можна використовувати існуючі програмні системи корпоративного рівня, які дозволяють налаштовувати їхній функціонал під потреби конкретних виробників чи надавачів послуг.

На п'ятому етапі запроваджується автоматичний моніторинг параметрів усіх бізнес-процесів. Бізнес-логіка комп'ютеризованих систем автоматизації управління, які діють на другому, третьому та четвертому рівнях, забезпечує автоматичне збереження у відповідних БД ІС даних щодо здійснених ними транзакцій, ведуть журнали аудиту і т.п. На цьому етапі запроваджується інформаційний обмін між четвертим та третім рівнем згідно методології MES (рис. 2) через відповідні тематичні бази даних ІС.

Автоматизація управління ГТС за запропонованим підходом є сукупністю двох процесів – створення автоматизованої системи оперативного управління та створення автоматизованої системи корпоративного управління. Кожен із цих процесів складається із трьох завдань, які виконуються ітераційно. Перший процес (на рис. 6 обведений штриховою лінією) передбачає етапи з першого по третій, а другий (обведений на рис. 6 штрих-пунктирною лінією) – з третього по п'ятий. На початкових стадіях реалізації ці два процеси практично не взаємодіють. Тому за потреби/необхідності їх

можна реалізувати паралельно.

Висновки

Розроблена концепція поетапної автоматизації управління ГТС України, яка базується на створенні згідно зі стандартом INSI/ISA-95 системи оперативного управління, що функціонує на принципах MES. Реалізація цієї концепції дозволить забезпечити автоматичний обмін даними на вертикалі «стратегічне управління – оперативне управління – керування технологічними процесами», а також у горизонтальних напрямках у межах кожного рівня управління. Це дозволить створити САУ ГТС України, що діятиме на усіх трьох рівнях і в усіх п'яти функціональних напрямках управління (інформаційні процеси, бізнес-процеси, транспортування газу, підземне зберігання газу, експлуатація об'єктів і споруд ГТС).

Невід'ємною складовою САУ ГТС є система управління цілісністю магістральних газопроводів, важливим елементом якої є система моніторингу цілісності. Вона включає в себе системи моніторингу цілісності КС і секцій ЛЧ, які, у свою чергу, складаються із систем моніторингу цілісності технологічних об'єктів, що входять до КС і секцій ЛЧ МГ. Розроблені методи контролю цілісності технологічних об'єктів ЛЧ МГ, які базуються на даних моніторингу параметрів потоків газу в контрольних точках, а також даних вимірювання параметрів хвиль акустичної емісії, спричинених розгерметизацією об'єкта чи стрибкоподібним підростанням дефекту в його тілі. Розроблено математичне забезпечення для реалізації розроблених методів на основі даних вимірювань.

Впровадження САУ дозволить підвищити ефективність роботи ГТС України за рахунок оптимального керування конфігурацією мережі та режимами транспортування і зберігання газу, автоматизації процесів взаємодії з клієнтами (споживачами послуг транспортування і зберігання газу), а також підвищити надійність системи за рахунок впровадження автоматизованої системи управління цілісністю.

Запропоновані підходи, математичні моделі, методи та алгоритми передані у відділ розробки систем оптимального планування та прогнозування режимів роботи ГТС Науково-дослідного інституту транспорту газу ПАТ «Укртрансгаз» для використання.

Список літератури

- (2020) Оператор ГТС України. <https://tsoua.com>, last accessed 31.10.2020.
- (2020) План розвитку газотранспортної системи. Київ, ТзОВ «Оператор ГТС України». https://tsoua.com/wp-content/uploads/gas-quality/files/TYN-DP_2020-2029_18-03-2020.pdf. Last accessed 31.10.2020.
- Бунько Т.В., Сафонов В.В., Стрежекуров Е.С., Мадчук З.М. (2018) Безпека дальнього транспорту газу. *Геотехнічна механіка*, **139**, 106–115.
- Правила безпечної експлуатації магістральних газопроводів. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0292-10#o37>, last accessed 2020/03/08.
- Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14>, last accessed 2020/03/08.
- Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/956-2002-п>, last accessed 2020/03/08.
- Gabbar, H.A., Kishawy, H.A. (2011) Framework of pipeline integrity management. *Int. J. Process Systems Engineering*, **1**, 3/4, 215–236.
- Goodfellow, R., Jonsson, K. (2015) *Pipeline Integrity Management Systems (PIMS)*. In book *Oil and Gas Pipelines. Integrity and Safety Handbook*. Edited by R. Winstone Revie. Wiley, 3–12.
- Choi, B.K., Ki, B.H. (2002) MES(manufacturing execution system)architecture for FMS compatible to ERP (enterprise planning system). *Int. J. Computer integrated manufacturing*, **15**, 3, 274–284.
- Mora, R.G., Hopkins, P., Cote, E. I., Shie, T. (2016) *Pipeline Integrity Management Systems: A Practical Approach*. ASME Press, US.
- Meyer, H., Fuchs, F., Thiel, K. (2009) *Manufacturing Execution Systems Optimal Design, Planning, and Deployment*. Mc Graw Hill.
- (2018) API RP 1173/PSMS Pipeline Safety Management Systems.USA.
- Govindaraju, R., Lukman, K., Chandra, D. R. (2014) Manufacturing execution system design using ISA-95. *Advanced Materials Research*, **980**, 248–252 doi: 10.4028. <https://www.scientific.net/AMR.980.248>.
- Williams, T.J. (1994) The Purdue enterprise reference architecture. *Computers in industry*, **24** (2), 141–158.
- Чекурін В.Ф., Химко О.М. (2018) Моделювання функцій програмного комплексу для автоматизації управління газотранспортними системами. *Вчені записки Таврійського національного університету. Технічні науки*, **29** (68), 2, 192–197.
- Чекурін В.Ф., Химко О.Я. (2019) Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу. *Там само*, **30** (69), 1, 158–164.
- Чекурін В.Ф., Пономарьов Ю.В., Химко О.М. (2019) Метод контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу за даними моніторингу параметрів потоку. *Там само*, **30** (69), 2, 234–240.
- Chekurin, V., Khymko, O. (2019) Numerical modeling transient processes in a long gas pipeline. *Mathematical Modeling and Computing*, **6**, 2, 220–238.
- Чекурін В.Ф., Химко О. М. (2019) Перехідні процеси течії газу в трубопроводі, спричинені локальним витоком. *Мат. методи та фіз.-мех. поля*, **62**, 3, 143–158.
- Geiger, G. (2020) *State-of-the-Art in Leak Detection and Localization*, https://www.researchgate.net/publication/290631637_State-of-the-art_in_leak_detection_and_localization, last accessed 03.08.2020.
- ASTM E1211/E1211M–17 *Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors*, <https://www.astm.org/Standards/E1211.htm>.
- Kourousis, D., Bolas, K., Anastasopoulos, A. (2020) *Acoustic emission leak detection of buried oil pipelines, river and road crossings*. https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_01.pdf, last accessed 03.08.2020
- Brunner, A., Barbezat, M. (2007) Acoustic emission leak testing of pipes for pressurized gas using active fiber composite elements as sensors. *Journal of Acoustic Emission*, **25**, 42–50.
- Totally Integrated Automation Portal. One integrated engineering framework for all automation tasks*. https://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/en/brochure_tia_portal_en.pdf

25. Chekurin, V., Ponomaryov, Yu., Prytula, M., Khymko, O. (2018) Development of an approach to automation of gas transmission system management. *Technology Audit and Production Reserves*, **5/1**(43), 52–60.

References

1. Operator of gas transmission system of Ukraine [in Ukrainian]. <https://tsoua.com>, last accessed 31.10.2020.
2. (2020) Plan for development of gas transmission system of Ukraine. Kyiv, LLC Operator of gas transmission system of Ukraine [in Ukrainian]. https://tsoua.com/wp-content/uploads/gas-quality/files/TYNDP_2020-2029_18-03-2020.pdf.
3. Bunko, T.V., Safonov, V.V., Strezhekurov, E.S., Matsuk, Z.M. (2018) Safety of long-distance gas transmission. *Geotekhnichna Mekhanika*, **139**, 106–115 [in Ukrainian].
4. Regulations of safe service of main gas pipelines. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0292-10#o37>.
5. *Law of Ukraine «On High-Risk Facilities»* [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14>.
6. (2002) *On identification and declaration of safety of high-risk facilities* [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/956-2002-p>.
7. Gabbar, H.A., Kishawy, H.A. (2011) Framework of pipeline integrity management. *Int. J. Process Systems Engineering*, **1**(3/4), 215 – 236.
8. Goodfellow, R., Jonsson, K. (2015) *Pipeline Integrity Management Systems (PIMS)*. In book: *Oil and Gas Pipelines. Integrity and Safety Handbook*. Ed. by R. Winstone Review. Wiley, 3–12.
9. Choi, B.K. and Ki, B.H. (2002) MES (manufacturing execution system) architecture for FMS compatible to ERP (Enterprise Planning System). *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, **15**(3), 274–284.
10. Mora, R.G., Hopkins, P., Cote, E. I., Shie, T. (2016) *Pipeline Integrity Management Systems: A Practical Approach*. ASME Press, US.
11. Meyer, H., Fuchs, F., Thiel, K. (2009) *Manufacturing Execution Systems Optimal Design, Planning, and Deployment*. Mc Graw Hill.
12. (2018) *API RP 1173/PSMS: Pipeline Safety Management Systems, USA*.
13. Govindaraju, R., Lukman, K., Chandra, D. R. (2014) Manufacturing execution system design using ISA-95. *Adv. Ma-*

- terials Research*, Vol. **980**, 248-252. doi: 10.4028. <https://www.scientific.net/AMR.980.248>.
14. Williams, T.J. (1994) The Purdue enterprise reference architecture. *Computers in Industry*, **24** (2), 141–158.
15. Chekurin, V.F., Khymko, O.M. (2018) Modeling of functions of program complex for automation of gas-transport system control. In: *Scholarly notes of Tavria National University. Seriya: Tekhnichni Nauki*, **29**(68), 2, 192-197 [in Ukrainian].
16. Chekurin, V.F., Khymko, O.M. (2019) Mathematical model for control of linear part integrity of main gas pipeline. *Ibid.*, **30**(69), 1 (Pt1), 158-164 [in Ukrainian].
17. Chekurin, V.F., Ponomaryov, Yu.V., Khymko, O.M. (2019) Method of control of linear part integrity of main gas pipeline by data of monitoring of the flow parameters. *Ibid.* **30**(69), 2(Pt.1), 234-240 [in Ukrainian].
18. Chekurin V., Khymko O. (2019) Numerical modeling transient processes in a long gas pipeline. *Mathematical Modeling and Computing*, **6**(2), 220–238.
19. Chekurin, V.F., Khymko, O.M. (2019) Transient processes of gas flow in a pipeline caused by local leakage. *Mat. Metody ta Fiz.-Mekh. Polya*, **62**(3), 143-158 [in Ukrainian].
20. Geiger, G. State-of-the-art in leak detection and localization. https://www.researchgate.net/publication/290631637_State-of-the-art_in_leak_detection_and_localization.
21. ASTM E1211 / E1211M – 17 Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors, <https://www.astm.org/Standards/E1211.htm>.
22. Kourousis, D., Bollas, K., Anastasopoulos, A. Acoustic emission leak detection of buried oil pipelines, river and road crossings, https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_01.pdf.
23. Brunner, A., Barbezat, M. (2007) Acoustic emission leak testing of pipes for pressurized gas using active fiber composite elements as sensors. *J. of Acoustic Emission*, **25**, 42–50.
24. Totally Integrated Automation Portal. One integrated engineering framework for all automation tasks. https://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/en/brochure_tia_portal_en.pdf
25. Chekurin, V., Ponomaryov, Yu., Prytula, M., Khymko, O. (2018) Development of an approach to automation of gas transmission system management. *Technology Audit and Production Reserves*, **5/1**(43), 52-60.

AN APPROACH TO AUTOMATION OF MANAGEMENT OF GAS TRANSMISSION SYSTEM OF UKRAINE

V.F. Chekurin¹, Yu. V. Ponomaryov², M.H. Prytula², O.M. Khymko³

¹Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NASU, 3-b, Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: adm@iapmm.lviv.ua

²Research Institute for Gas Transportation of JSC «UKRTRANSGAS», 16 Koneva str., 61004, Kharkiv, Ukraine. E-mail: titarev-aa@utg.ua

³ Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandera str., 79013, Lviv, Ukraine. E-mail: cofice@lpnu.ua

An approach to step-by-step automation of management of gas transmission system of Ukraine using the methodology defined by ANSI/ISA-95 standard and modern methodology for pipeline integrity management is considered in the paper. The approach assumes preservation and development of existing means for automation of technological processes, as well as already implemented software systems for modeling, planning, optimization and management of the main gas pipelines and underground gas storage facilities and formation on their basis of an automated operational management system that meets the requirements of this standard. According to the proposed approach, the implementation of the automated system is considered as a combination of two processes, each of which consists of three stages, performed iteratively. The first process includes creation of an operational management system, introduction of automatic monitoring of parameters of the technological and physical processes and formation of an information system as regards ensuring operational management and control of the technological processes. The second process includes formation of the information system for supporting the business processes, as well as introduction of an automated corporate governance system and of automatic monitoring of business processes.

Key words: Gas Transmission System, Automation of Management, Integrity Management of Main Gas Pipelines, MES

Надійшла до редакції 21.07.2020

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ, МЕТОДИКИ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН ТА МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО ЕФЕКТУ*

**В.П. Бабак¹, Ю.В. Куц¹, І.В. Богачев¹, В.В. Хайдуров¹, В.М. Зварич², М.В. Мислович², Л.М. Щербак²,
Ю.І. Гижко², М.С.Гуторова², Л.Б. Остапчук²**

¹Інститут технічної теплофізики НАН України. 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2-а. E-mail: admin@itf.kiev.ua

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56. E-mail: ied1@ied.org.ua

Розроблено та апробовано метод і математичні моделі прямих та обернених задач ультразвукового контролю та діагностики складних металевих конструкцій на наявність дефектів. Виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок системи магнітострикційного контролю елементів досліджуваних об'єктів. Проведено математичне моделювання процесів ультразвукового контролю з використанням програмного середовища MATLAB та COMSOL Multiphysics. Адекватність математичних моделей підтверджена результатами їх порівняння з реальними фізичними експериментами. Бібліогр. 7, табл. 4, рис. 17.

Ключові слова: будівельні металеві конструкції, ультразвуковий контроль, малоапертурні перетворювачі, прямі та обернені задачі ультразвукового контролю

Технічний стан більшості будівельних та металевих конструкцій досяг критичної межі, що підвищує ймовірність виникнення аварій і надзвичайних ситуацій. Темпи відновлення таких конструкцій є надзвичайно низькими внаслідок економічної ситуації в країні. Тому першочерговим завданням є забезпечення надійної експлуатації існуючого фонду споруд і конструкцій.

Особливої актуальності набувають питання управління експлуатаційною надійністю та довговічністю відповідних об'єктів шляхом визначення їх технічного стану і залишкового ресурсу. Для отримання достовірної інформації про фактичний стан різних вузлів будівельних машин і конструкцій застосовуються різні методи неруйнівного контролю і діагностики. Найбільшого поширення набули методи ультразвукової дефектоскопії.

Методам, що базуються на застосуванні ультразвукових хвиль у комплексі з п'єзоелектричними перетворювачами, притаманні певні обмеження та незручності при їх практичному застосуванні. Це пов'язано з необхідністю попередньої підготовки поверхонь досліджуваних вузлів перед розташуванням на них п'єзоелектричних перетворювачів. Також на точність діагностичних

вимірювань суттєво впливає геометрична форма досліджуваних об'єктів.

Переважну більшість вказаних недоліків вдається усунути завдяки застосуванню методів, що базуються на магнітострикційному ефекті. Використання малоапертурних магнітострикційних перетворювачів (МСП) надає можливість проводити діагностичні обстеження об'єктів складної форми, які можуть нагріватись до високих температур. Розробка методів з використанням малоапертурних МСП дозволяє проводити діагностику цих об'єктів в умовах будівельних майданчиків та підвищити точність та вірогідність виявлення можливих дефектів.

Метою роботи була розробка системи контролю стану металевих будівельних конструкцій, що базується на використанні малоапертурних МСП. Розробка інформаційно-вимірювальної системи починається з побудови та дослідження математичних моделей об'єктів та процесів [1–6]. На основі результатів дослідження побудованих математичних моделей сформульовані основні вимоги до геометричних розмірів малоапертурних МСП. Було розроблено декілька різних моделей та проведено обчислювальні експерименти.

*За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин» («Ресурс»), отриманих за 2016–2020 рр.

В.П. Бабак – <http://orcid.org/0000-0002-9066-4307>, Ю.В. Куц – <http://orcid.org/0000-0002-8493-9474>,

І.В. Богачев – <http://orcid.org/0000-0001-7781-5767>, В.В. Хайдуров – <http://orcid.org/0000-0002-4805-8880>,

В.М. Зварич – <http://orcid.org/0000-0002-1271-4954>, М.В. Мислович – <http://orcid.org/0000-0002-6245-7917>,

Л.М. Щербак – <http://orcid.org/0000-0002-1536-4806>, Ю.І. Гижко – <http://orcid.org/0000-0002-5702-4738>,

М.С.Гуторова – <http://orcid.org/0000-0003-4259-7530>, Л.Б. Остапчук – <http://orcid.org/0000-0002-5565-0313>

© В.П. Бабак, Ю.В. Куц, І.В. Богачев, В.В. Хайдуров, В.М. Зварич, М.В. Мислович, Л.М. Щербак, Ю.І. Гижко, М.С.Гуторова, Л.Б. Остапчук, 2020

Для вирішення проблеми визначення впливу дефектів на формування вихідного сигналу розроблена математична модель прямої задачі виявлення дефектів у тілах складної геометричної форми на основі класичного хвильового рівняння в області $G \subset \mathbb{R}^n$ [7]:

$$\frac{\partial^2 U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial t^2} = v^2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_i^2} + \gamma \sum_{i=1}^n \frac{\partial U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_i} + f(\bar{\mathbf{x}}, t), \quad (1)$$

причому

$$t \in [0, T_{fin}]; x_i \in [a_i, b_i]; a_i \in \mathbb{R}; b_i \in \mathbb{R};$$

$$G = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_n, b_n]; i = \overline{1, n}.$$

де x_i – просторова координата під номером i ; $\bar{\mathbf{x}}$ – вектор просторових координат; t – час; U – шуканий розв’язок моделі; v – швидкість поширення звуку в середовищі; T_{fin} – кінцевий час досліджень; γ – коефіцієнт затухання хвилі у конкретному середовищі.

Початкові умови мають вигляд: $U(\bar{\mathbf{x}}, 0) = g_1(\bar{\mathbf{x}})$, $U_t(\bar{\mathbf{x}}, 0) = g_2(\bar{\mathbf{x}})$. Граничні умови задаються в за-

лежності від постановки задачі (що відповідає конкретному фізичному процесу).

В обчислювальних експериментах було змодельоване проходження сигналу через дефект, що дало змогу відповісти на одне з основних запитань дослідження – вплив ступеню дефекту на проходження сигналу через нього. У такому випадку визначаються амплітуда та частота отриманого сигналу.

Контурні графіки (лінії рівня), які зображені на рис. 1, показують, що при проходженні ультразвукового сигналу через завади, такі, як тріщини, утворюються розриви. Основні фрагменти розриву у прийнятому сигналі показані на рис. 2.

Слід зазначити, що прояви дефектів найпомітніші у випадку їх положення, яке перпендикулярне до лінії, що з’єднує джерело (збудник коливань) та приймач. Згідно з результатами математичного моделювання видно, що відбувається суттєва зміна амплітуди прийнятого сигналу (рис. 3).

Для визначення впливу розмірів тріщини на природу прийнятого сигналу при проходженні через неї проведено низку обчислювальних експериментів. Визначено вплив довжини дефекту (типу тріщини) на амплітуду й частоту прийнятого сигналу, що пройшов через цей дефект (рис. 4).

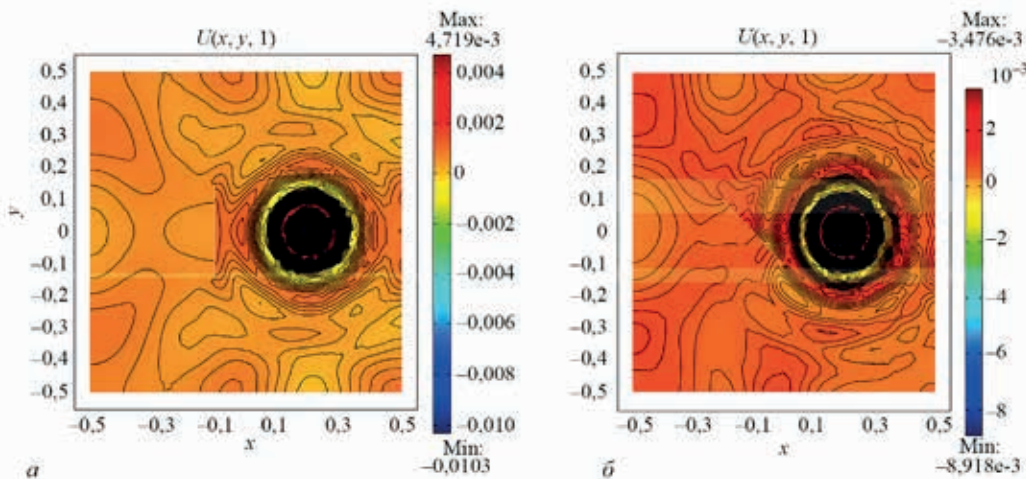


Рис. 1. Визначення хвильового поля на поверхні тіл з дефектами у вигляді тріщин: *a* – дефект має вертикальне положення; *b* – дефект знаходиться під кутом 45° до горизонталі

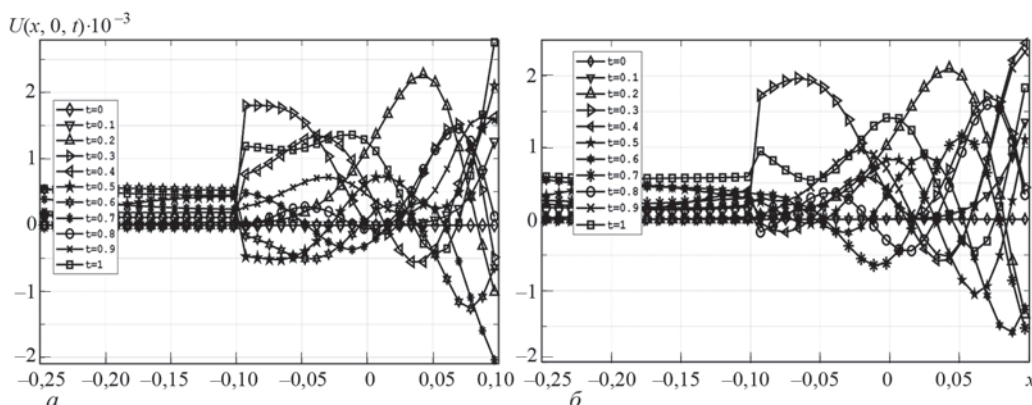


Рис. 2. Порівняння сигналу, який проходить через тріщину: *a* – яка має вертикальне положення; *b* – знаходиться під кутом 45° до горизонталі

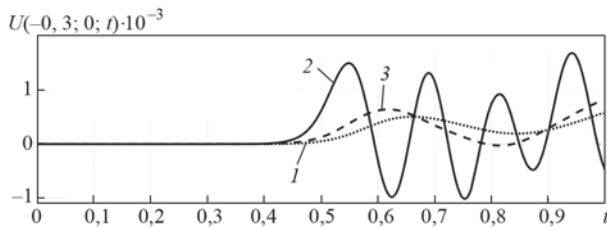


Рис. 3. Графічне представлення сигналу в точці (-0,3; 0) протягом проміжку часу [0; 1] при проходження через дефекти типу тріщини (1), без дефекту (2) та при проходженні через тріщину під кутом (3)

При проходженні звукових хвиль через тріщини зменшуються амплітуда і частота отриманого сигналу (порівняно з початковим). Отриманий сигнал має нелінійну складову. Результати досліджень було використано у дослідженні композитних елементів деталей, що містять помітну неоднорідність.

Також розроблена модель визначення положення джерела ультразвукових коливань [7]. Поширення ультразвукових хвиль може бути математично описано хвильовим рівнянням (лінійним та нелінійним) другого порядку.

Математична модель задачі має оптимізаційну постановку, в якій потрібно знайти мінімум функції:

$$F(x^{source}, y^{source}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\int_{\tau_i^{beg}}^{\tau_i^{end}} (s_i(x^{source}, y^{source}, t) - s_i^{experimental}(t))^2 dt \right] \rightarrow \min. \quad (2)$$

Обмеження на (2) накладається у вигляді:

$$\begin{cases} s_i(x^{source}, y^{source}, t) = U(x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t), \\ 0 \leq \tau_i^{beg} \leq \tau_i^{end} \leq T, i = \overline{1, n}, \\ \partial^2 U / \partial t^2 = \Delta U \text{ on } \Omega, t \in [0; T], \\ U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0, \\ \partial U / \partial \mathbf{n} = 0, t \in [0; T], \\ U(x^{source}, y^{source}, 0) = A \sin(2\pi ft). \end{cases} \quad (3)$$

де n – загальна кількість сенсорів; τ_i^{beg} – час початку спостереження на i -му сенсорі; τ_i^{end} – час закінчення спостереження на i -му сенсорі;

$s_i^{experimental}(t)$ – зняті дані i -м сенсором протягом певного проміжку часу $[\tau_i^{beg}; \tau_i^{end}]$; T – загальний час проведення експерименту; Ω – розрахункова область задачі (досліджуваній об’єкт); A, f – амплітуда й частота; $(x_i^{sensor}, y_i^{sensor})$ – положення i -го сенсора; (x^{source}, y^{source}) – положення збудника коливань.

Математична модель виду (2) відноситься до моделей класу нелінійної глобальної оптимізації. Функція виду (2) є нелінійною, отже для її мінімізації можна використовувати стохастичні або популяційні методи, оскільки можуть бути отримані локальні для неї мінімуми.

Нижче наведені результати виконаних обчислювальних експериментів з використанням прикладного програмного середовища MATLAB 2019b. Математична модель задачі (2) розв’язана з використанням методу скінченних різниць. Розрахункова сітка – 60×60 вузлів, $w = 32$ – кількість біт для кодування генетичним алгоритмом.

На рис. 5 показано чисельний розв’язок хвильового рівняння для моменту часу $t = 1,45$.

Рис. 6 містить графічні дані, зчитані з сенсорів, геометричне розташування яких наведено у табл. 1. Всі сенсори отримують дані протягом одного й того ж проміжку часу.

Для визначення фізичних характеристик джерела ультразвукових коливань в об’єктах була розроблена математична модель [7]. Процедура діагностики передбачає створення математичних моделей для визначення залишкових робочих ресурсів таких систем, а також проведення різних обчислювальних експериментів з метою здійснення апробації та адаптації параметрів розроблених математичних моделей до процесів, які поширюються у цих об’єктах та системах.

Досліджувалось поширення звуку в пластині, фізичні та геометричні характеристики якої відомі. Пропонується оптимізаційна математична модель

Таблиця 1. Геометричне розташування сенсорів

x_i	0,5333	0,7167	0,4500	0,1500	0,3167	0,1000	0,8667	0,4167
y_i	0,0667	0,9167	0,1167	0,3500	0,8500	0,2833	0,5167	0,9000

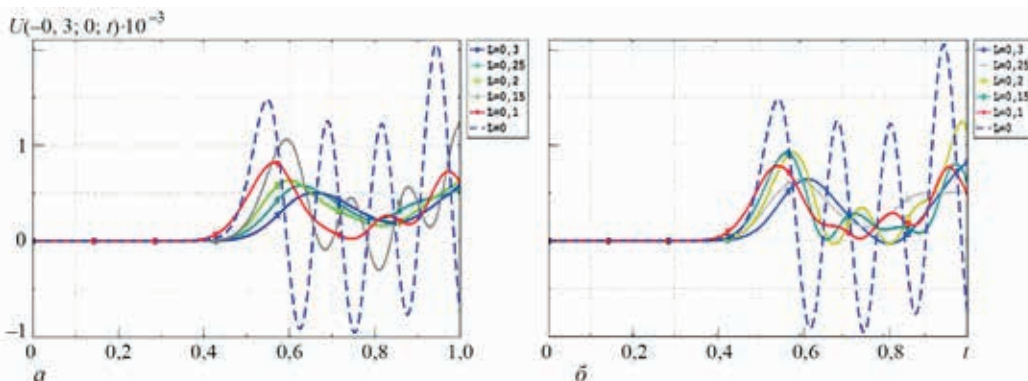


Рис. 4. Вплив розмірів дефекту типу тріщини на пройдений через нього сигнал

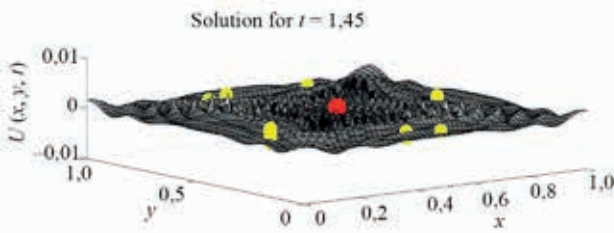


Рис. 5. Схематичне розташування сенсорів та джерела у розрахунковій області протягом певного періоду часу

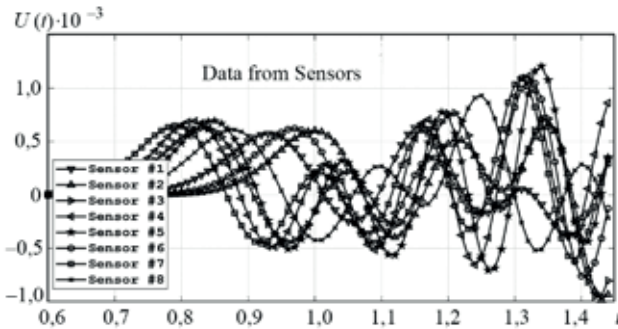


Рис. 6. Зчитані дані вісьмома сенсорами протягом одного й того ж проміжку часу

визначення амплітуди й частоти точкового джерела звукового сигналу на основі експериментальних даних, що отримуються сенсорами. Модель має вигляд:

$$F(A, f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\int_{\tau_i^{beg}}^{\tau_i^{end}} (s_i(A, f, t) - s_i^{experimental}(t))^2 dt \right] \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$\begin{cases} s_i(A, f, t) = U(A, f, x_i^{sensor}, y_i^{sensor}, t); \\ 0 \leq \tau_i^{beg} < \tau_i^{end} \leq T, i = \overline{1, n}; t \in [0; T]; \\ \partial^2 U / \partial t^2 = c^2 (\partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2), \\ \Omega = (x, y) \in [a; b] \times [c; d], a, b, c, d \in \mathbb{R}; \\ \left(\partial U / \partial \bar{n} \right) \Big|_{\Gamma} = 0, t \in [0; T]; \\ U(A, f, x^{source}, y^{source}, t) = A \sin(2\pi ft), \end{cases} \quad (5)$$

де n – загальна кількість сенсорів; τ_i^{beg} – час початку спостереження на i -му сенсорі; τ_i^{end} – час закінчення спостереження на i -му сенсорі; $s_i^{experimental}(t)$ – зняті дані i -м сенсором протягом певного проміжку часу $[\tau_i^{beg}; \tau_i^{end}]$; T – загальний час проведення експерименту; Ω – розрахункова область задачі (досліджуваній об’єкт); A, f – амплітуда та частота відповідно; $(x_i^{sensor}, y_i^{sensor})$ – положення i -го сенсора; (x^{source}, y^{source}) – положення джерела (збудник коливаль).

На рис. 7 показані результати моделювання для (4)–(5) методом скінченних різниць. Для оптимізації (4) було використано класичний генетичний алгоритм. Розрахункова сітка 60×60 вузлів, $w = 32$ – кількість біт для кодування у генетичному алгоритмі. Кількість ітерацій класичного генетичного алгоритму 100. Кількість обчислювальних експериментів 5.

За результатами обчислювальних експериментів встановлено, що класичний алгоритм знаходить чисельний розв’язок поставленої задачі досить точно. Знайдені значення $A = 0,33334$; $f = 9,0000154$. Реальні значення параметрів A та f – це $1/30$ та 9 відповідно.

Математична модель (3) може бути використана при дослідженні елементів та конструкцій з метою визначення дефектів, наприклад, мікротріщин та вибоїн.

Для визначення швидкості поширення звукових хвиль у твердих тілах розроблена математична модель на основі хвильових рівнянь математичної фізики другого порядку.

Прикладом моделі поширення хвильових процесів, які здійснюються точковим джерелом, є пряма модель, яка описується рівнянням:

$$\partial^2 U / \partial t^2 = \partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2; \quad (x, y) \in [0; 1]^2; t \in [0; 2]. \quad (6)$$

Початкові умови мають вигляд:

$$U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0. \quad (7)$$

Граничні умови мають вигляд:

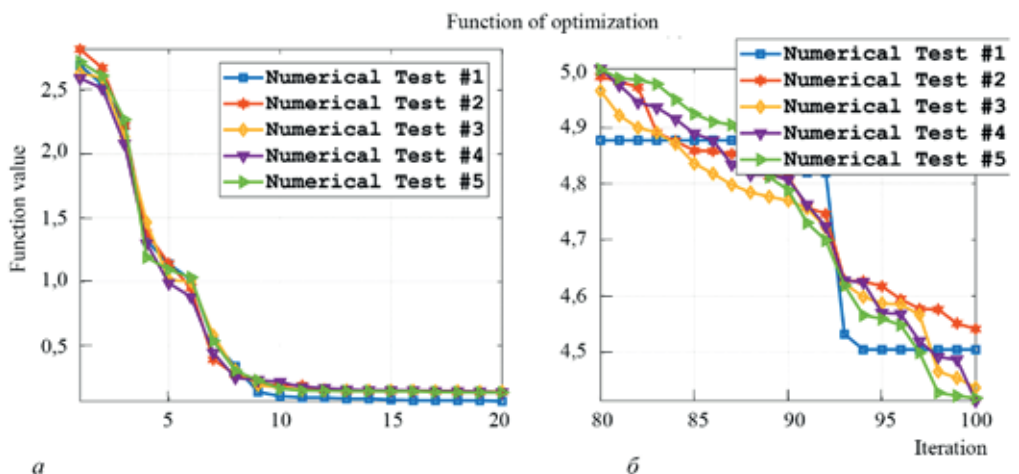


Рис. 7. Збіжність класичного генетичного алгоритму: a – перші 20 ітерацій; b – останні 20 ітерацій

$$\partial U / \partial \bar{n}|_{\Gamma} = 0, t > 0. \quad (8)$$

Внутрішня умова має вигляд:

$$U(0,5; 0,5; t) = 30^{-1} \sin 18\pi t, 0 < t < 0,2. \quad (9)$$

Внутрішня умова (9) задає гармонічні коливання, які здійснюються точковим джерелом безпосередньо всередині досліджуваного об'єкта.

На рис. 8 зображені розв'язки математичної моделі (6)–(9).

В процесі виконання роботи розроблено систе-

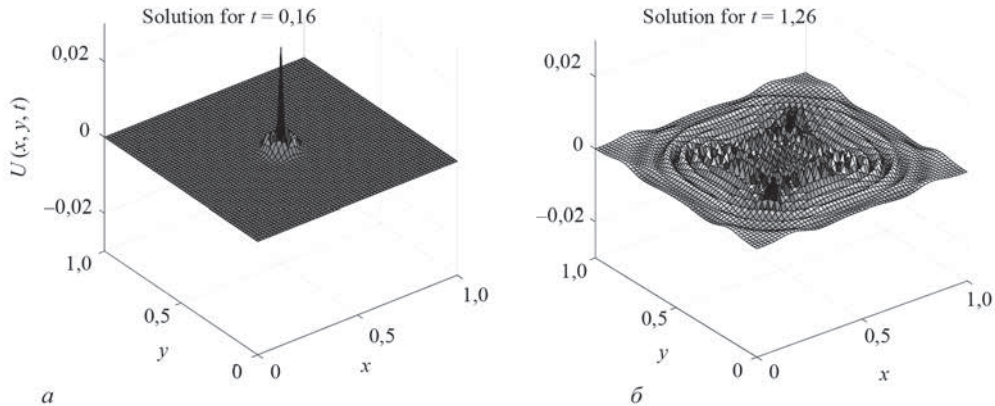


Рис. 8. Чисельний розв'язок математичної моделі у різні моменти часу



Рис. 9. Основний блок системи ультразвукового контролю об'єктів складної геометричної форми

му для ультразвукового контролю об'єктів складної геометричної форми (рис. 9) [7], основні технічні характеристики наведені в табл. 2.

Були проведені експериментальні дослідження розробленої системи ультразвукового контролю Зразки, які виготовлені зі сплаву на основі алюмінію (рис. 10), були надані Українським НДІ авіаційних технологій.

Для визначення швидкості поширення хвилі нанесено розмітку на деталь (рис. 10, точки а–в).

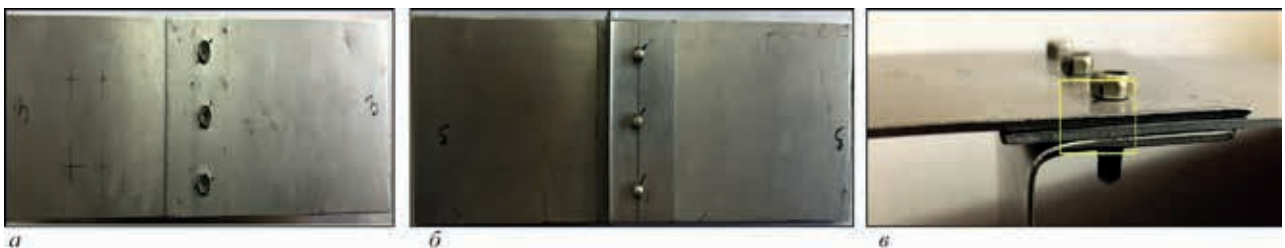


Рис. 10. Фото досліджуваного зразка: а – зверху; б – знизу; в – збоку (рамкою виділена область, де знаходиться тріщина)

В заданих точках було розміщено перетворювачі і знято осцилограму (рис. 11). За допомогою розмітки на екрані осцилографа визначено параметри сигналів.

Для дослідженні різних зразків методом ультразвукового контролю використані засоби вимірювальної техніки та допоміжне обладнання. Розміри зразка 255×75×1 мм. Розміри штучно вировошеної тріщини в клепаному з'єднанні: довжина 17 мм; глибина 1 мм (на всю товщину зразка),

Таблиця 2. Основні технічні характеристики системи ультразвукового контролю

Частота заповнення радіоімпульсу, МГц	Менше 0,1...10,0
Тривалість імпульсу	1...8 періодів заповнюючого коливання
Амплітудне значення напруги на випромінювачі, В	0...10 на навантаженні 0,5 Ом
Вхідний опір, кОм	більше 3,0
Максимальна вихідна напруга, В	10
Коефіцієнт підсилення	2300

розкрив тріщини 0,05...0,1 мм.

Час, за який сигнал надходить від випромінювача до приймача, становить 14 мкс, $t = 14 \cdot 10^{-6}$ с. Далі проводиться з'єднання перетворювачів разом (рис. 12) і зняття осцилограм (рис. 13) для визначення часу сумарної затримки сигналу у хвилеводах випромінювача та приймача.

Таблиця 3. Параметри прийнятих сигналів

	Без тріщини	З тріщиною
$t, \text{с}$	$13,6 \cdot 10^{-6}$	$14,4 \cdot 10^{-6}$
$2U_m, \text{В}$	5	0,5

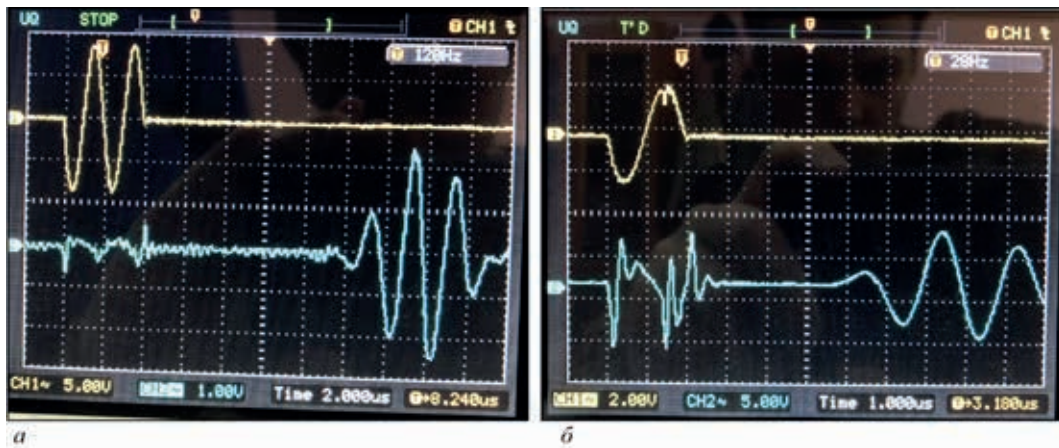


Рис. 11. Осцилограми сигналів: *a* – під час дослідження швидкості хвилі; *б* – при з’єднаних перетворювачах

Час, за який сигнал від випромінювача надходить до приймача, становить 6 мкс. Отже час затримки $t_3 = 6 \cdot 10^{-6}$ с. Тому швидкість хвилі в зразку $v = L/(t - t_3)$ становить: $v = (0,02)/(13,2 \cdot 10^{-6} \dots 7 \cdot 10^{-6}) = 3225$ м/с.

На рис. 13 зображені осцилограми сигналу при проходженні бездефектної ділянки і ділянки з тріщиною. Виміряні значення амплітуди і затримки сигналів наведено в табл. 3. У табл. 3 позначено: t – час затримки, $2U_m$ – подвійна амплітуда.



Рис. 12. Фото перетворювачів, з’єднаних між собою

Алгоритм досліджень та порівнянь отриманих результатів зображений на рис. 14.

Отримані експериментальні дані усереднювались, що дало можливість мінімізувати вплив завад типу білого шуму.

Генеровані сигнали передаються з використанням АЦП через USB-підключення до ПК та мають вигляд, який наведено у табл. 4.

Чисельні дані, які представлені у табл. 4, містять дані про генеровані сигнали розробленим прибором ультразвукового контролю.

Графічне представлення генерованих сигналів та їх усереднення наведено на рис. 15.

Аналогічно на рис. 16 показано сигнали-відгуки, що отримані при проходженні через тріщину в об’єкті, який зображено на рис. 10.

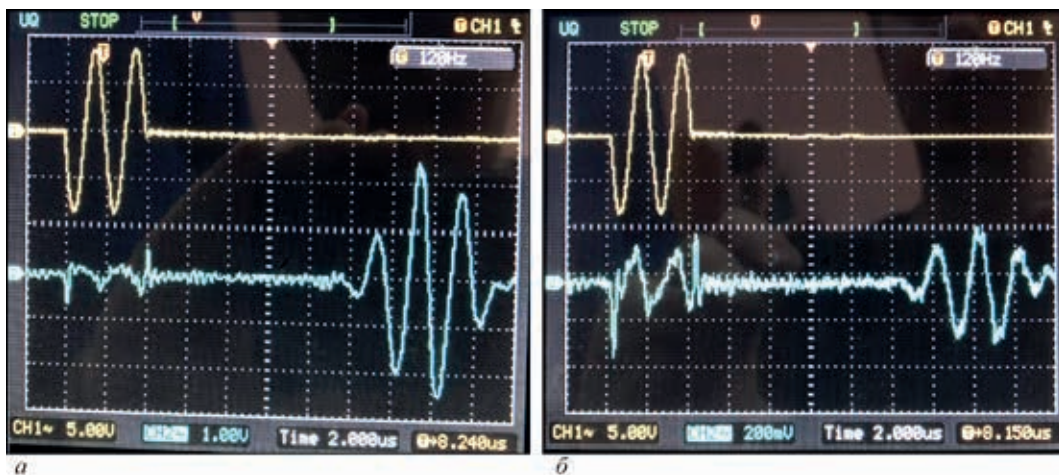


Рис. 13. Осцилограми сигналів при проходженні: *a* – бездефектної ділянки; *б* – ділянки зразка з тріщиною

Таблиця 4. Формат генерованих даних фізичних експериментів

Point	1	2	3	...	998	999	1000
Experiment no 1	0,0475	0,0475	0,0475	...	-0,0170	0,0475	0,0152
Experiment no 2	-0,2106	-0,2428	-0,2428	...	-0,2751	-0,3074	-0,2751
Experiment no 3	-0,2106	-0,2428	-0,2106	...	-0,2428	-0,2428	-0,2428
Experiment no 4	0,0152	0,0475	0,0475	...	0,0475	0,0152	0,0152
Experiment no 5	0,0798	0,0475	0,0798	...	0,0475	0,0798	0,0475
Experiment no 6	-0,0493	-0,0170	-0,0170	...	-0,0493	-0,0815	-0,0493
Experiment no 7	0,0152	0,0152	0,0152	...	0,0152	-0,0170	0,0152
Experiment no 8	-0,0493	-0,0815	-0,1138	...	-0,0815	-0,0815	-0,0815

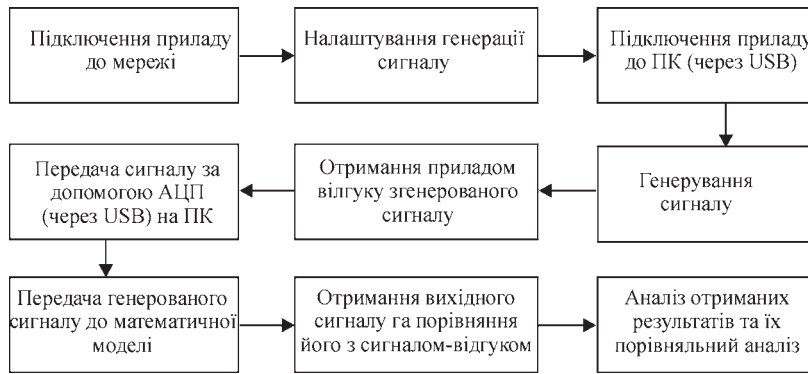


Рис. 14. Загальна стратегія формування даних та їхнього опрацювання на ПК з метою верифікації математичної моделі визначення сигналу-відгуку

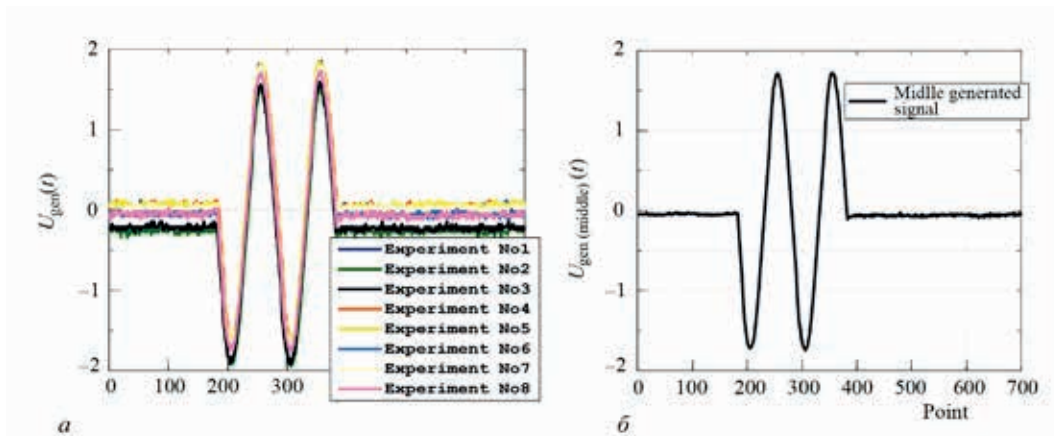


Рис. 15. Графічне представлення генерованих сигналів (перші 700 точок): *a* – кожен тестовий приклад окремо; *б* – результат усереднення

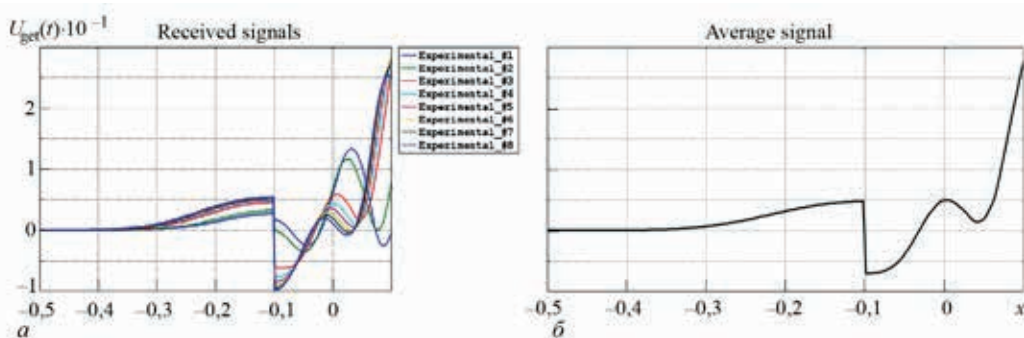


Рис. 16. Графічне представлення згладжених сигналів-відгуків в околі дефектів (тріщини) для фізичних експериментальних тестів зі генерованими сигналами: *a* – кожен тестовий приклад окремо; *б* – результат усереднення

Показником якості отриманих математичних моделей ультразвукової діагностики суцільних твердих тіл є результати перевірки реального сигналу, який був отриманий у результаті виконання фізичного експерименту з сигналом, що був отриманий самою математичною моделлю із завданням усередненого генерованого сигналу, що зображено на рис. 15, *б*. Результати порівняння наведені на рис. 17.

Результати експериментальних досліджень показують, що відхилення сигналу-відгуку, який отримано в результаті проведення фізичного експерименту, мало помітно відрізняється від сигналу-відгуку, який отримано в результаті математичного моделювання методом ультразвукового контролю з використанням прикладних програмних пакетів MATLAB та COMSOL Multiphysics.

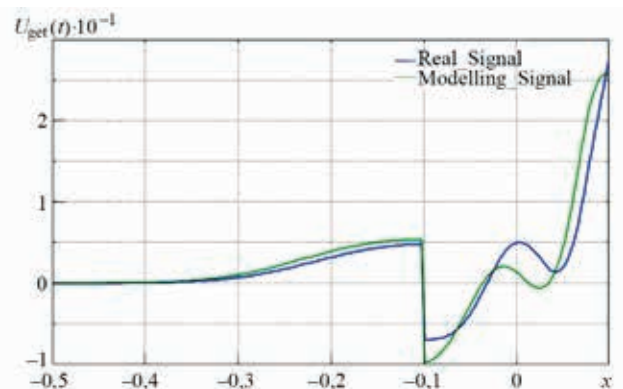


Рис. 17. Графічне представлення сигналу-відгуку, який отримано в результаті пропускання генерованого усередненого сигналу через модель ультразвукового контролю

Експериментально встановлено, що амплітуда сигналу, що проходить через тріщину розміром 0,05...0,1 мм, зменшується майже в 10 разів, що дозволяє використовувати МСП для знаходження таких дефектів. Зміна часу затримки обумовлена зміною швидкості розповсюдження сигналу всередині тріщини, і в наведеному експерименті затримка склала 0,8 мкс, що в подальшому можна використати для знаходження розміру тріщини.

Список літератури

1. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. (1991) *Акустические методы контроля*. Москва, Высшая школа.
2. Кретов Е.Ф. (2014) *Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении*. СПб, СВЕН.
3. Хамидуллин В.К. (1989) *Ультразвуковые контрольно-измерительные устройства и системы*. Ленинград, Издательство Ленинградского университета.
4. Щербинский В.Г. (2005) *Технология ультразвукового контроля сварных соединений*. Москва, Тиссо.
5. Hyzhko, Y., Hutorova, M., Myslovych, M., Ostapchuk, L. (2019) On Peculiarities of Development of Information Support for Technical Diagnostics Multilevel Systems of Electrical Equipment. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 1.9, 2, 34–41.
6. Бабак В.П., Єременко В.С., Куц Ю.В. та ін. (2019) *Модели та міри у вимірюваннях. Монографія*. Бабак В.П. (ред.). Київ, Наукова думка. <http://itff.kiev.ua/wp-content/uploads/2020/05/monogr-2019.pdf>

7. Бабак В.П., Богачев І.В., Хайдуров В.В. (2020) Визначення розмірів дефектів та їх положення при ультразвуковому контролі методами математичного та комп'ютерного моделювання. *Теплофізика та теплоенергетика*, 3, 43–48.

References

1. Ermolov, I.N., Alyoshin, N.P., Potapov, A.I. (1991) Acoustic methods of testing. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
2. Kretov, E.F. (2014) Ultrasonic flaw detection in power engineering. St.-Petersburg, SVEN [in Russian].
3. Khamidullin, V.K. (1989) Ultrasonic testing and measurement devices and systems. Leningrad, Izd-vo Leningrad. Universiteta [in Russian].
4. Shcherbinsky, V.G. (2005) Technology of ultrasonic testing of welded joints. Moscow, Tisso [in Russian].
5. Hyzhko, Yu., Hutorova, M., Myslovych, M., Ostapchuk, L. (2019) On peculiarities of development of information support for technical diagnostics multilevel systems of electrical equipment. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 9(2), 34–41.
6. Babak, V.P., Yeremenko, V.S., Kuts, Yu.V., Myslovych, M.V., Shcherbak, L.M. (2019) Models and measures in measurements: Monograph. Ed. by V.P. Babak. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian]. <http://itff.kiev.ua/wp-content/uploads/2020/05/monogr-2019.pdf>
7. Babak, V.P., Bogachev, I.V., Haidurov, V.V. (2020) Determination of sizes of defects and their localization in ultrasonic testing by the methods of mathematical and computer modeling. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 3, 43–48 [in Ukrainian].

DEVELOPMENT OF THE METHOD, PROCEDURE AND MEANS OF CONTROL OF ELEMENTS OF CONSTRUCTION MACHINERY AND METAL STRUCTURES USING MAGNETOSTRICTION EFFECT

V.P. Babak¹, Yu.V. Kuts¹, I.V. Bogachev¹, V.V. Khaidurov¹, V.M. Zvorych², M.V. Myslovych², L.M. Shcherbak², Yu.I. Hyzhko², M.S. Hutorova², L.B. Ostapchuk²

¹Institute of Engineering Thermophysics of NASU. 2-a Marii Kapnist str., 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: admin@itff.kiev.ua
²Institute of Electrodynamics of NASU. 56 Prosp. Peremohy, 03057, Kyiv, Ukraine. E-mail: ied1@ied.org.ua

A method and mathematical models of direct and inverse problems of ultrasonic testing and diagnostics of complex metal structures for defect detection have been developed and tested. A test sample of the system for magnetostrictive control of elements of the objects of study was made and experimentally verified. Mathematical modeling of the processes of ultrasonic testing was performed, using MATLAB and COMSOL Multiphysics software. The adequacy of mathematical models was confirmed by the results of comparing them with the real physical experiments. 7 Ref., 4 Tables, 17 Fig.

Keywords: building metal structures; ultrasonic testing, low-ampere transducers, direct and inverse problems of ultrasonic testing

Надійшла до редакції 28.09.2020

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1989 р.
 Виходить 4 рази на рік
 ISSN 0235-3474
doi.org/10.15407/tdnk
 Передплатний індекс 74475



Видається з 1948 р.
 Виходить 12 разів на рік
 ISSN 0005-111
doi.org/10.15407/as
 Передплатний індекс 70031



Видається з 1985 р.
 Виходить 4 рази на рік
 ISSN 2415-8445
doi.org/10.15407/sem
 Передплатний індекс 70693

(380-44) 200-8277

journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України

МОНІТОРИНГ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МОСТОВОЇ ПРОЛІТНОЇ СПОРУДИ ПІД ЧАС МОНТАЖУ МЕТОДОМ НАСУВАННЯ

С.М. Мінаков¹, В.М. Учанін²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: mail@kpi.ua

²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: vuchanin@gmail.com

Запропоновано методика моніторингу механічних напружень у стінках пролітної споруди мостів із феромагнітних сталей під час їх монтажу методом насування з застосуванням магнітоанізотропного методу. Для вибору точок вимірювання напружень прогінна будова розглянута у вигляді консольної двохопорної балки, для якої побудовано, зокрема, епюри поперечної сили та згинаючих моментів. Методика реалізована під час будівництва моста через р. Дніпро (м. Київ), результати якої підтвердили її ефективність. Розроблена методика може бути модифікована для моніторингу пролітних споруд мостів із феромагнітних сталей під час їх експлуатації. Бібліогр. 16, рис. 8.

Ключові слова: магнітоанізотропний метод, феромагнітна сталь, моніторинг, механічні напруження, міст, пролітна споруда

Актуальність проблеми і мета роботи. Мости є важливою і критично вразливою складовою транспортної інфраструктури, забезпечення надійності яких є проблемою державного значення через можливі людські, матеріальні і логістичні втрати у випадку аварійних ситуацій. Підтвердженням цієї тези може бути недавня трагічна аварія моста Моранді біля Генуї, причиною якої визначена сукупність чинників, пов'язаних з недостатністю заходів з підтримки технічного стану і додатковим вітровим навантаженням [1]. Останніми десятиріччями досягнуто вражаючий прогрес в розвитку технологій будівництва і експлуатації мостів, що призвело до суттєвого збільшення їх довжини, вантажності, пропускної здатності і надійності. Одночасно формується розуміння важливості моніторингу напружено-деформованого стану мостових конструкцій під час їх виробництва і експлуатації. Для оцінювання технічного стану мостів широко використовують візуальне обстеження. Але дослідження Центру Неруйнівного Контролю Адміністрації Федеральних доріг США показали, що близько 56 % висновків за результатами візуальних обстежень були з ймовірністю 95 % помилковими [2, 3]. Тому сучасним трендом є встановлення багатоканальних систем комплексного моніторингу мостів у реальному часі на основі датчиків різного типу (температури, деформації, нахилу тощо).

Під час будівництва мостів широко використовують економічно ефективні методи повздовжнього насування пролітних споруд (ПС) [4, 5]. На рис. 1 спрощено показано схему насування ПС 1 з використанням аванбеку 4 спеціальної форми, який прикріплюється до передньої частини ПС.

Аванбек 4 за рахунок порівняно невеликої погонної ваги полегшує встановлення ПС на приймальну опору 5. Після монтажу ПС встановлюють на механізми ковзання 2 опори 3 і орієнтують у напрямку приймальної опори 5. Після цього за допомогою тягових механізмів (не показано) ПС 1 насувають на приймальну опору 5 (на рис. 1 напрямком насування показано стрілкою).

Під час насування в елементах ПС виникають напруження і деформації. За існуючих допусків на геометричні параметри ПС це може призводити до аварійних порушень стійкості, перекосів і перевантажень окремих елементів ПС тощо. Для моніторингу процесу насування ПС використовують пристрої різного призначення, які дозволяють за тиском у гідравлічній системі визначати реакцію на опорах або проводити лазерний моніторинг відхилень елементів ПС у процесі насування [6, 7]. Крім того, для визначення напружень в стінках ПС використовують датчик положення, який реєструє відстань між елементами за рахунок деформації ПС. Фактично фіксується зміна відстані між двома елементами з використанням

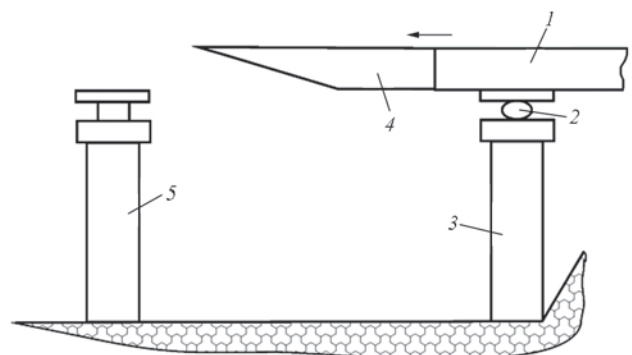


Рис. 1. Схема насування ПС моста: 1 – ПС; 2 – механізм ковзання; 3 – опора; 4 – аванбек; 5 – приймальна опора



Рис. 2. Будівництво залізнично-автомобільного переходу через р. Дніпро на залізничній ділянці Київ-Московський–Дарниця

металевого стрижня, один кінець якого закріплений на конструкції, а інший залишається вільним. Датчики переміщення монтується у наперед визначених місцях конструкції, тобто мають обмежену мобільність. Це не дозволяє вимірювати напруження в критичних зонах, які в процесі насування змінюються.

Для вимірювання напружень в ПС із феромагнітних сталей може бути використаний магнітоанізотропний (МА) метод. МА метод вимірювання напружень базується на дії ефекту Віларі (зворотний магніострикційний ефект), який проявляється впливом робочих і залишкових напружень на магнітну проникність феромагнітних сталей [8–13]. Йдеться про складову магнітної анізотропії, яка обумовлена напруженнями, на відміну від її кристалографічної і текстурної складових [14]. Метод має багато переваг через низькі вимоги до стану контрольованої поверхні, можливість проведення вимірювань через лакофарбові покриття, високу продуктивність і мобільність. Запропонований метод визначення напружень апробовано у 2009 р. під час будівництва залізнично-автомобільного переходу через р. Дніпро у м. Києві на залізничній ділянці Київ-Московський–Дарниця (рис. 2). Проведений нами аналіз показав принципову новизну запропонованого підходу [15]. Роботи проводились в оперативному режимі, коли більшість технічних рішень за відсутності досвіду і відпрацьованої методики приймали інтуїтивно без належного наукового обґрунтування. Тому визначена необхідність подальшого узагальнення отриманого досвіду, результатом якого є ця стаття. Автори вважають, що запропонований підхід є перспективним для моніторингу напружень мостових конструкцій не тільки під час монтажу, а і в умовах їх подальшої експлуатації.

Розробка методики вимірювання напружень під час насування мостових ПС. Для забезпечення жорсткості досліджувана ПС складалася з двох коробчастих конструкцій (КК) висотою 3,2 м та шириною 2,2 м, які зварені у верхньому поясі для формування шляхового полотна (рис. 2). Кожна КК має дві вертикальні стінки. Матеріал ПС – сталь 15ХСНД, товщина вертикальних стінок – 12 мм.

Для моніторингу стабільності ПС під час насування важливо мати можливість порівнювати зміни напружень у вертикальних стінках КК. Адже за

різних розмірів вертикальних стінок виникає ситуація, коли вони сприймають різне навантаження, яке складно (або неможливо) компенсувати під час насування. Під час насування ПС шляхове полотно виставляється горизонтально (по геодаліту) і насувається на приймальну опору. При цьому збільшується довжина консольного вильоту конструкції зі збільшенням її ваги. Задача полягала не тільки у вимірюванні абсолютних значень механічних напружень. Важливо було визначити різницю напружень у вертикальних стінках різних КК в однаковому перерізі.

Для визначення найнавантаженішого перерізу для визначення напружень під час насування розглянемо ПС у вигляді консольної двохопорної балки (рис. 3). Головним навантаженням в нашому випадку є вага конструкції, що показано рівномірно розподіленим навантаженням q . Це навантаження викликає появу реакцій опор R_A та R_B . Згідно до теорії пружності [16] епюри поперечної сили Q_y та згинаючих моментів M_x будуть мати вигляд, представлений на рис. 3.

З епор на рис. 3 видно, що найнебезпечнішою ділянкою ПС є зона опори А, що відповідає переходу ПС на консольну ділянку, в якій Q_y та M_x мають максимальні значення. Під час насування за рахунок збільшення ваги та довжини консольного вильоту напруження в зоні опори А будуть тільки зростати. Тому зона опори А вибрана оптималь-

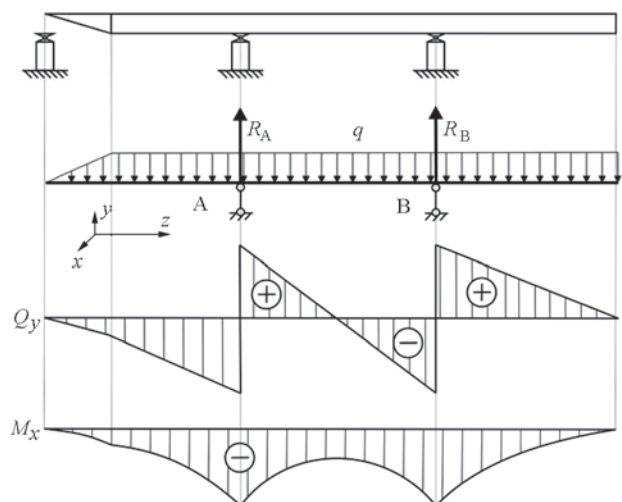


Рис. 3. ПС у вигляді двохопорної консольної балки, навантаження ПС під час насування і епюри поперечних сил Q_y та згинаючих моментів M_x

ною для моніторингу напружень в бічних стінках ПС під час насування.

Для визначення точок визначення напружень на вертикальних стінках КК розглянемо її переріз і відповідні епюри напружень (рис. 4) [16]. З епюр на рис. 4 видно, що в перерізах КК діють нормальні та дотичні напруження. Характер зміни цих напружень по висоті показує, що найбільші нормальні напруження розтягу σ_{\max} мають місце в зоні верхньої кромки бічної стінки КК. В зоні нижньої кромки бічної стінки виникають нормальні напруження стиску. Існує також нейтральна площина, в якій нормальні напруження дорівнюють нулю. Дотичні напруження в нейтральній площині, навпаки, мають максимальне значення τ_{\max} . Зазначимо, що терміни «нормальні» і «дотичні» напруження відносяться традиційно до перерізу КК. Зі сторони бічної стінки нормальні напруження направлені вздовж ПС по координаті z , а дотичні відповідно по координаті y (рис. 3).

Аналіз розподілу напружень на рис. 4 показує, що зони верхньої і нижньої кромки бічної стінки КК слід вважати оптимальними для проведення вимірювань нормальних напружень. В цих місцях дотичні напруження мають найменші значення. Слід врахувати, що проводити вимірювання в зоні верхньої кромки стінки КК в реальних умовах складно. На нижніх кромках бічної стінки можливо вимірювати напруження стиску. Але тут слід зважати на існування залишкових зварювальних напружень, які можуть спотворити результати вимірювань напружень, пов'язаних з процесом насування. Для зменшення впливу залишкових напружень в зоні зварного шва, що з'єднує вертикальну стінку із нижньою полкою, МА перетворювачі встановлювали на відстані 200 мм вгору від нижньої стінки КС, де вимірювані нормальні напруження несуттєво відрізняються від максимальних значень (рис. 5). Крім того, місця встановлення МА перетворювачів вибирали між привареними всередині КК ребрами. Рівень проведення досліджень напруженого стану МА методом у бічних стінках КК показано на рис. 4 віссю P .

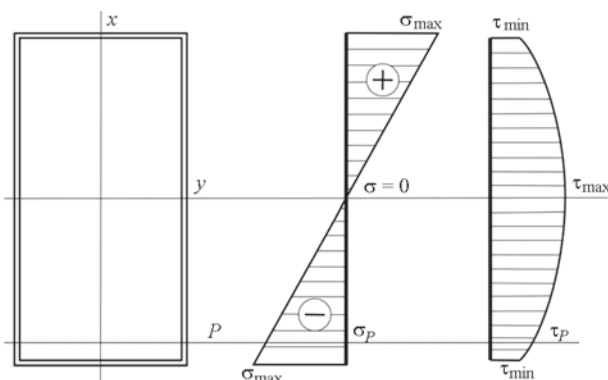


Рис. 4. Переріз КК (схематично) і епюри нормальних σ та дотичних τ напружень

Кожен МА перетворювач за допомогою блока комутації (рис. 6) по чергово підключали до загального приладу типу MESTR-411 [9] через окремий пристрій нормування з функцією запам'ятовування градуовальної кореляційної функції, характерної для кожного окремого МА перетворювача. Це забезпечувало повторюваність вимірювань без переналаштування приладу після кожної комутації.

Згадану градуовальну криву для кожного МА перетворювача отримували з використанням зразків зі сталі 15ХСНД розмірами $500 \times 60 \times 12$ мм з використанням установки чотириточкової (чистого) згину за методикою, наведеною в роботах [11–13]. Для цього МА перетворювач встановлювали у середню частину зразка, де діють тільки напруження стиску. Напруження створювали механічним згином зразка. При цьому рівень напружень розраховували за значеннями прогину зразка. Отримані данні записували у відповідні пристрої нормування (рис. 6), що забезпечувало єдність і повторюваність вимірювань напружень різними МА перетворювачами.

Реалізація методики вимірювання напружень в процесі насування пролітної споруди під час будівництва моста через р. Дніпро. Запропонована методика вимірювання напружень реалізована протягом червня, серпня та вересня 2009 р. в процесі планових насувань ПС під час будівництва залізнично-автомобільного переходу через р. Дніпро у м. Києві на залізничній ділянці Київ-Московський-Дарниця. На середині русла р. Дніпро був намитий острів і збудований стапель для монтажу ПС (рис. 2). По мірі монтажу секцій ПС проводили їх насування на заздалегідь збудовані опори за допомогою потужних гідроциліндрів. За найбільшої довжини

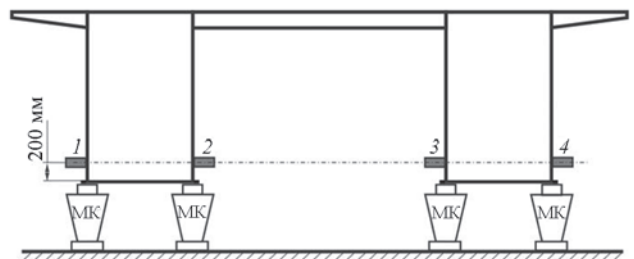


Рис. 5. Схема встановлення МА перетворювачів на стінках КК у поперечному перерізі: 1–4 – МА перетворювачі; МК – механізми ковзання

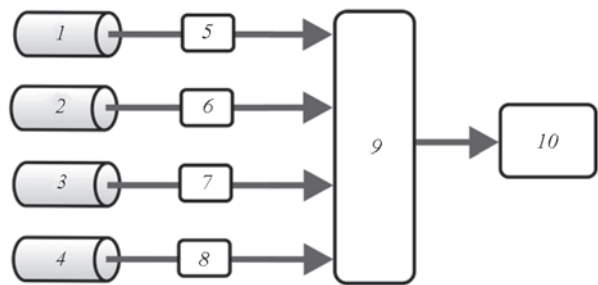


Рис. 6. Схема підключення МА перетворювачів до приладу типу MESTR-411: 1–4 – МА перетворювачі; 5–8 – пристрої нормування; 9 – блок комутації; 10 – прилад MESTR-411



Рис. 7. Кріплення МА перетворювача до стінки КС з приладом MESTR-411 (а) та процес вимірювання напружень (б)

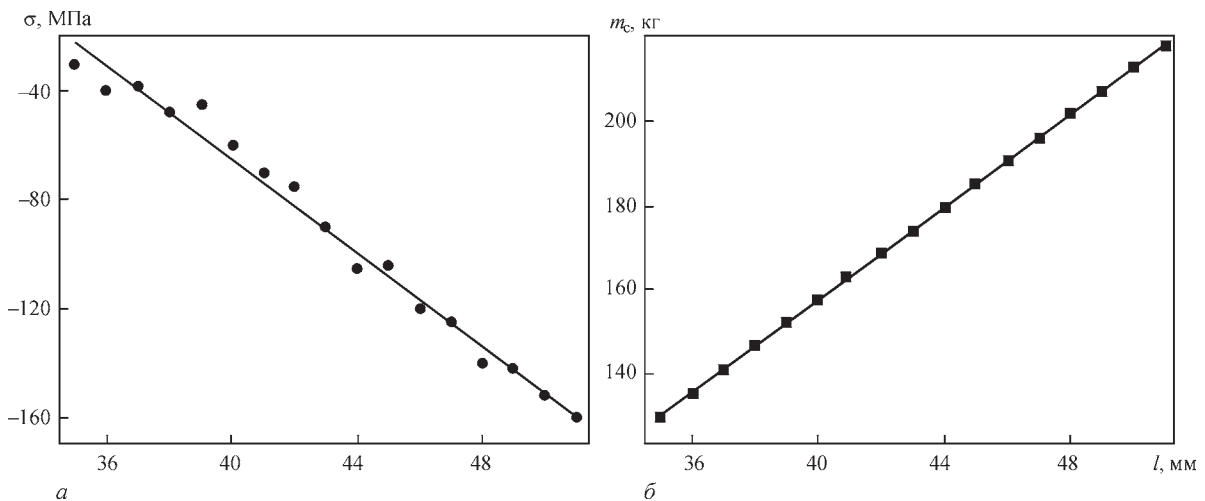


Рис. 8. Порівняння зміни виміряних напружень і розрахункової ваги консольної частини ПС в процесі насування

консолі ПС (приблизно 106 м) її розрахована вага досягала 1000 т. Верхня частина ПС (шляхове полотно) виставляли горизонтально за допомогою телодоліту. При цьому виявилось, що розміри бічних стінок КС мають розбіжності по висоті, через що частина вертикальних стінок не спиралась на механізми ковзання та не сприймала навантаження, а інша частина стінок була навантажена понад розрахункові значення. Для рівномірного розподілу навантажень проводили відповідне налаштування товщини ковзних пластин відповідних механізмів ковзання. Вимірювання напружень бічних стінок ПС проводили під час технологічних зупинок, які обумовлені зворотним ходом гідроциліндрів. Під час таких пауз чотири МА перетворювачі встановлювалися на вертикальні стінки в одному поперечному перерізі ПС за допомогою спеціальних магнітних кріплень (рис. 7), що забезпечувало їх мобільність та ідентичність навантаження ПС під час вимірювання.

На рис. 8 подано залежності виміряних напружень в одній із бічних стінок (а) і розрахованої ваги m_c консольної частини ПС від довжини консолі l (б).

Аналіз поданих на рис. 8 результатів визначення напружень МА методом показав їх чітку кореляцію з розрахованими значеннями ваги консольної частини ПС.

Висновки

1. Подано елементи методики МА моніторингу напружень у стінках ПС мостів із феромагнітних сталей під час їх монтажу методом насування.

2. Методика МА моніторингу пройшла дослідно-промислову перевірку під час будівництва моста через р. Дніпро (м. Київ), результати якої показали її ефективність щодо вибору зони розташування МА перетворювачів, їх комутації та нормування сигналів.

3. МА метод вимірювання напружень та відповідна методика вимірювання можуть бути рекомендовані для моніторингу напружень мостових ПС із феромагнітних сталей під час їх монтажу.

4. Розроблена методика може бути модифікована для моніторингу пролітних споруд мостів із феромагнітних сталей під час їх експлуатації.

Список літератури

1. Burlando M., Romanic D., Boni G. et al. (2019) Investigation of the weather conditions during the collapse of the Morandi Bridge in Genoa on 14 August 2018 (Preprint). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 45. <http://doi.org/10.5194/nhess-2019-371>.
2. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. (2014) Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения монито-

- ринга. *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*, 1, 1 (вільний доступ: <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf>).
3. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Нигаматова О.И., Михалдыкин Е.С. (2014) Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений. *Там же*, 1, 2 (вільний доступ: <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf>).
 4. Пестряков А.Н. (2010) *Продольная и поперечная надвижка: метод, указания*. Екатеринбург, УрГУПС.
 5. Каньшин Е. (2010) Строительство мостов по технологии циклической продольной надвижки. Опыт Германии. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 33, 106–110.
 6. Наянов В.И., Наянов Ю.В. (2007) Современные технологии контроля в строительстве внеклассных мостов. *Транспортное строительство*, 1, 86–87.
 7. Наянов В.И., Наянов Ю.В. (2009) *Компьютерная система слежения на строительстве крупных мостовых переходов. Учебно-методическое пособие к курсу «Автоматизированные системы мониторинга»*. ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет. им. Н.Г. Чернышевского».
 8. Yamada H., Uchiyama S., Takeuchi et al. (1987) Noncontact Measurement of Bending Stress Using a Magnetic Anisotropy Sensor. *IEEE Transactions on Magnetics*, Mag-23, 5, 2422–2424.
 9. Фомичев С.К., Минаков С.Н., Данильчик А.В. и др. (1998) Измеритель механических напряжений серии MESTR-41x. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 58–60.
 10. Фомичев С.К., Минаков С.Н., Михалко С.В. и др. (2009) Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эпюр распределения продольных напряжений. *Там же*, 2, 11–14.
 11. Учанін В.М., Мінаков С.М. (2018) Вплив механічних напружень на сигнал вихрострумowego перетворювача магнітної анізотропії. *Там само*, 1, 21–25.
 12. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G. et al. (2017) Eddy current method for evaluation of stresses in steel components. *Proceeding of 14th Intern. conf. «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering»*, September 4–6, 2017, Bernardin, Slovenia, pp. 207–212.
 13. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G. et al. (2018) Determination of Stresses in Steel Components by Eddy Current Method. *Journal of Mechanical Engineering*, 64, 11, 690–697. doi:10.5545/sv-jme.2018.5208.
 14. Tumanski S. (2011) *Handbook of Magnetic Measurements*. Boca Raton Florida, CRC Press.
 15. Учанін В.М., Мінаков С.М., Фомичев С.К., Мінаков А.С., Бобін Б.О. (2017) *Спосіб подовжнього насування пролітної конструкції під час будівництва мостів*. Україна Пат. № 116454. МПК E01D21/06. Заявл. 11.11.16. Опубл. 25.05.2017. Бюл. № 10.
 16. Реут Л. (2016) *Плоский поперечный изгиб: пособие по учебной дисциплине «Механика материалов»*. Минск, БНТУ.
- ing the collapse of the Morandi Bridge in Genoa on 14 August 2018. *Natural Hazards and Earth System Sci.* <http://doi.org/10.5194/nhess-2019-371>.
2. Ovchinnikov, I.G., Ovchinnikov, I.I., Nigmatova, O.I., Mikhaldykin, E.S. (2014) Strength monitoring of bridge-works and peculiarities of its application. Pt 1: International and national experience of application of monitoring. *Internet-J.: Transportnye Sooruzheniya*, 1(1) [in Russian]. <http://t-s.today/PDF/01TS114.pdf>.
 3. Ovchinnikov, I.G., Ovchinnikov, I.I., Nigmatova, O.I., Mikhaldykin, E.S. (2014) Strength monitoring of bridge-works and peculiarities of its application. Pt 2: Continuous monitoring of state of bridgeworks. *Internet-J.: Transportnye Sooruzheniya*, 1(2) [in Russian]. <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf>.
 4. Pestrjakov, A.N. (2010) Longitudinal and transverse sliding: method, recommendations. Ekaterinburg, UrGUPS [in Russian].
 5. Kanshin, E. (2010) Bridge construction by the technology of cyclic longitudinal sliding. Experience of Germany. *Visnyk DNUZT*, Issue 33, 106–110 [in Russian].
 6. Nayanov, V.I., Nayanov, Yu.V. (2007) Modern control technologies in construction of out-of-class bridges. *Transportnoe Stroitelstvo*, 1, 86–87 [in Russian].
 7. Nayanov, V.I., Nayanov, Yu.V. (2009) Computer tracking system in construction of large bridges. In: Training guide for the course on «Automated monitoring systems». GOU VPO Saratov State Un-ty [in Russian].
 8. Yamada, H., Uchiyama, S., Takeuchi et al. (1987) Noncontact measurement of bending stress using a magnetic anisotropy sensor. *IEEE Transact. on Magnetics*, 23(5), 2422–2424.
 9. Fomichev, S.K., Minakov, S.N., Danilchik, A.V., Tarnikov, V.G., Yaremenko, M.A. (1998) Mechanical stress meter of MESTR-41x series. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 58–60 [in Russian].
 10. Fomichev, S.K., Minakov, S.N., Mikhalko, S.V., Yaremenko, M.A., Minakov, A.S. (2009) Determination of force impacts on a pipeline by analysis of longitudinal stress distribution eures. *Ibid.*, 2, 11–14 [in Russian].
 11. Uchanin, V.M., Minakov, S.M. (2018) Influence of mechanical stresses on the signal of eddy current transducer of magnetic anisotropy. *Ibid.*, 1, 21–25 [in Ukrainian].
 12. Uchanin, V., Minakov, S., Nardoni, G., Ostash, O., Bentoglio, M. (2017) Eddy current method for evaluation of stresses in steel components. In: Proc. of 14th Intern. Conf. on Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering (September 4–6, 2017, Bernardin, Slovenia), 207–212.
 13. Uchanin V., Minakov, S., Nardoni, G., Ostash, O., Fomichov, S. (2018) Nondestructive determination of stresses in steel components by eddy current method. *J. of Mechanical Engineering*, 64(11), 69–697. doi:10.5545/sv-jme.2018.5208.
 14. Tumanski, S. (2011) Handbook of magnetic measurements. Boca Raton Florida, CRC Press.
 15. Uchanin V.M., Minakov, S.M., Fomichov, S.K., Minakov, A.S., Bobin, B.O. Method of longitudinal sliding of bridge span structure during construction of bridges. Pat. Ukraine 116454, Int. Cl. E01D21/06; fil. 11.11.16, publ. 25.05.2017 [in Ukrainian].
 16. Reut, L. (2016) *Plane transverse bending. In: Manual on Mechanics of Materials*. Minsk, BNTU [in Russian].

References

MONITORING THE STRESSED STATE OF BRIDGE SPAN STRUCTURE DURING MOUNTING BY SLIDING METHOD

S.M. Minakov¹, V.M. Uchanin²

¹NTU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Prosp. Peremohy, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: mail@kpi.ua

²G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

A procedure is proposed for monitoring mechanical stresses in the walls of the span structure of bridges from ferromagnetic steels during their mounting by the sliding method with application of magnetoanisotropic method. In order to select the measurement points, the span structure was considered as a cantilever double support beam, for which the curves of the transverse force and bending moments were plotted, in particular. The procedure was realized during construction of a bridge across the Dnipro (Kyiv), the results of which confirmed its effectiveness. The developed procedure can be modified for monitoring the span structures of bridges from ferromagnetic steels during their operation.

Keywords: magnetoanisotropic method, ferromagnetic steel, monitoring, mechanical stresses, bridge, span structure

Надійшла до редакції 02.09.2020

ПОРТАТИВНІ ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИРОБІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ РІЗНОЇ ПРИРОДИ*

Є.П. Почапський, Б.П. Клим, Н.П. Мельник, Я.Д. Толопко, П.М. Долішній, П.П. Великий

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: pochapskyy@ipm.lviv.ua

Наведено результати створення портативних засобів діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами пружних хвиль різної природи. Розроблено структури багатоканальної акустико-емісійної та магнетоакустичної систем діагностування. Обґрунтовано виконання систем у вигляді набірних блочних конструкцій. Запропонована конструкція мобільного пристрою для переміщення накладного електромагнета магнетоакустичної системи. Розроблено системне та інформаційне програмне забезпечення для магнетоакустичної та багатоканальної акустико-емісійної портативних систем. Запропоновано методику оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій за параметрами сигналу магнетопружної акустичної емісії. Розроблено методики контролю метрологічних характеристик розроблених систем. Проведено акустико-емісійне та магнетоакустичне обстеження смостей, що працюють під тиском, та ділянок трубопроводів і обладнання нафтогазового комплексу України у Львівській та Івано-Франківській областях. Бібліогр. 11, рис. 6.

Ключові слова: неруйнівний контроль, акустична емісія, магнетопружна акустична емісія, багатоканальна акустико-емісійна система, магнетоакустична система, програмне забезпечення, алгоритми опрацювання сигналу, оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій, контроль метрологічних характеристик

Одним зі сучасних методів неруйнівного контролю, який забезпечує необхідною діагностичною інформацією і має високу чутливість та найкраще співвідношення «ефективність діагностування – затрати на його проведення», є метод акустичної емісії (АЕ). Важливими його перевагами є ще й те, що він не потребує додаткового збудження фізичних полів, підготовки поверхонь об'єкта контролю, не чутливий до його форми та розмірів, дає можливість отримувати інформацію про джерело руйнування на відстанях, що на порядки перевищують його розміри [1].

Однак традиційна реалізація методу АЕ вимагає в окремих випадках прикладання зовнішнього додаткового механічного навантаження об'єкта контролю. Ураховуючи те, що рівень цього навантаження, необхідний для провокування поширення малих дефектів, іноді може бути значно вищим за допустимі оптимальні режими напружень у матеріалі елемента конструкцій, практичне застосування АЕ-діагностування є дещо обмеженим, особливо для елементів конструкцій тривалого експлуатування, що працюють у контакт з водно-вмісним середовищем.

Щоб розширити рамки застосування методу АЕ, а також ефективніше проводити локальне діагностування елементів конструкцій чи виробів, пропонується збуджувати сигнали магнетопружної акустичної емісії (МАЕ) зовнішнім магнетним полем, яке ініціюватиме стрибкоподібне переми-

щення стінок магнетних доменів (ефект Баркгаузена) [2, 3]. Ці процеси відбуватимуться з деякими особливостями в околі окремих дефектів чи їх скупчень, де наявні значні градієнти механічних напружень чи суттєві зміни доменної структури матеріалу під впливом воднево-механічного чинника. Такі зміни структури матеріалу та його деградація виникають за час тривалого експлуатування.

Із огляду літературних джерел можна зробити висновок про недостатній рівень теоретичного та методичного обґрунтування методу МАЕ [1, 2]. Зрозуміло також, що апаратне забезпечення методів діагностування є актуальною задачею, розв'язання якої дасть можливість, зокрема для методу МАЕ, одержувати додаткову інформацію про стан феромагнетного матеріалу з його локального об'єму в умовах неперервної експлуатації об'єкта контролю.

Розроблення та виготовлення портативних систем. Роботи проводилися в рамках проекту «Створення портативних засобів діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами пружних хвиль різної природи» [4–8]. Було обґрунтовано виконання портативних багатоканальної акустико-емісійної та магнетоакустичної систем у вигляді набірних блочних конструкцій, розроблено їх структуру, здійснено макетування вузлів і блоків, лабораторне відпрацювання їх електричних принципів схем. Запропонова-

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.

© Є.П. Почапський, Б.П. Клим, Н.П. Мельник, Я.Д. Толопко, П.М. Долішній, П.П. Великий, 2020

на конструкція мобільного пристрою для переміщення накладного електромагнета. Виготовлено дослідний зразок багатоканальної акустико-емісійної системи (рис. 1). Конструкцію АЕ-системи виконано збірною з однотипних блоків, які з'єднано між собою механічно гвинтами, а електрично з'єднано стрічковими плоскими кабелями через роз'єми, розташовані на конструкції кріплення друкованих плат. Несучим елементом системи є блок живлення, до якого знизу та зверху кріпляться чотири блоки.

Кожен блок містить вісім акустичних каналів і три параметричних, а також один тестовий канал для перевірки якості контакту перетворювач акустичної емісії (ПАЕ) з поверхнею об'єкта контролю. Програмно вибирається сумісний чи роздільний режим роботи блоків.

Розроблено системне та інформаційне програмне забезпечення (ПЗ) багатоканальної акустико-емісійної системи (рис. 2). ПЗ здійснює планування діагностичного експерименту, зокрема, задається кількість використовуваних каналів, робоча смуга частот, частота дискретизації та об'єм вибірки сигналу, підсилення каналів АЕ, координати ПАЕ, вибирається тип об'єкта контролю, його розміри.

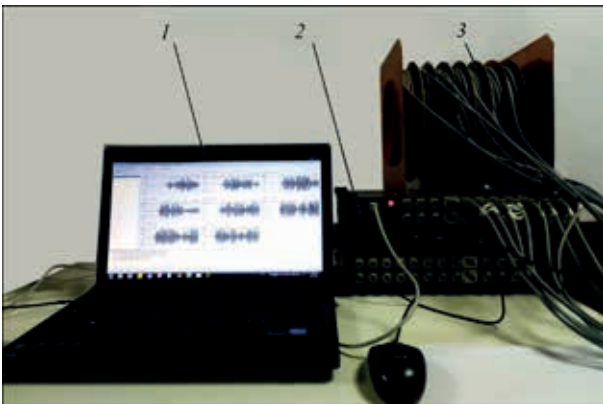


Рис. 1. Дослідний зразок портативної багатоканальної акустико-емісійної системи SKOP-32: 1 – ПК; 2 – блок обробки сигналів; 3 – комплект кабелів з попереднім підсилювачем (ПП)

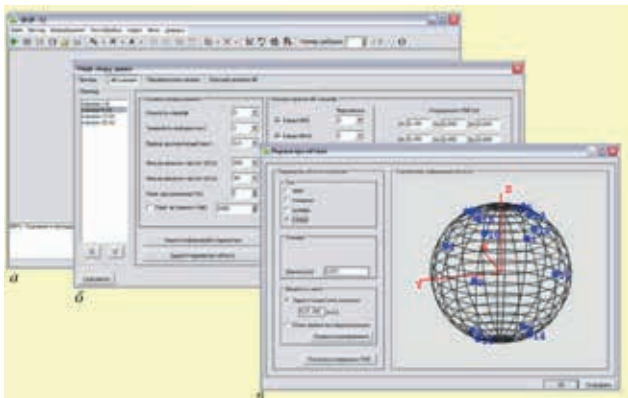


Рис. 2. Вигляд деяких вікон розробленого програмного забезпечення багатоканальної системи: а – головне вікно; б – опції збору даних; в – параметри об'єкта

Використовуючи одержану АЕ-інформацію, програма в реальному масштабі часу за розробленими алгоритмами забезпечує можливість знаходження координат джерела АЕ та дослідження амплітудних, часових та частотних характеристик сигналу.

Було виготовлено також дослідний зразок магнетоакустичної системи (рис. 3). МАЕ-система складається з трьох блоків, які з'єднано між собою механічно гвинтами, а електрично – кабелями через роз'єми, розташовані на задніх стінках блоків. Таку структуру МАЕ-системи вибрано з міркувань забезпечення її уніфікації та високої ремонтоздатності.

Перший верхній основний блок БВО – блок відбору і опрацювання. В ньому реалізовано канал відбору та реєстрації сигналу МАЕ, канали відбору та реєстрації індукції перемагнечувального поля і напруженості магнетного поля розсіювання та струму перемагнечення. Також реалізовано канал зв'язку з персональним комп'ютером. В БВО формується сигнал перемагнечення заданої частоти та форми, який поступає на другий блок системи БПМ. На задній панелі блока розміщений також роз'єм СИНХР, який забезпечує можливість використання для збудження МАЕ зовнішнього генератора.

Другий середній блок БПМ – блок перемагнечення. В ньому знаходиться блок живлення, який забезпечує стабілізовані напруги для живлення блока БВО та напруги для реалізованого в БПМ підсилювача потужності перемагнечувального сигналу, який поступає на накладний електромагнет (НЕМ). Третій блок БА – блок акумуляторів. Він забезпечує автономне живлення системи.

Розроблене системне (рис. 4) ПЗ магнетоакустичної системи, яке забезпечує налаштування режимів функціонування системи. Зокрема, для каналу відбору та реєстрації сигналу МАЕ задаються, виходячи із конкретних умов експерименту, значення основних його параметрів: коефіцієнт підсилення основного підсилювача каналу

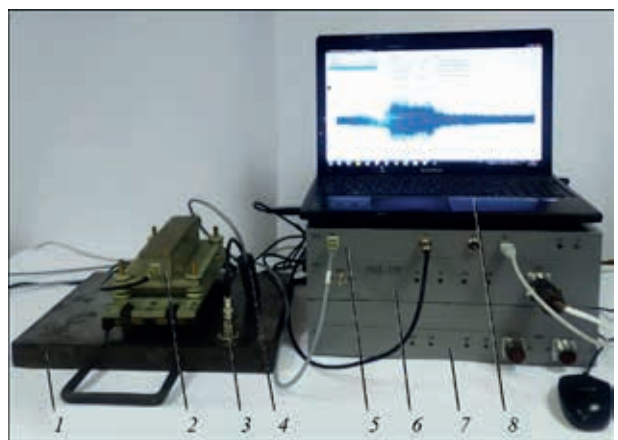


Рис. 3. Дослідний зразок магнетоакустичної системи МАЕ-1LP: 1 – досліджуваний зразок з феромагнетного матеріалу; 2 – НЕМ; 3 – ПАЕ; 4 – ПП; 5 – БВО; 6 – БПМ; 7 – БА; 8 – ПК

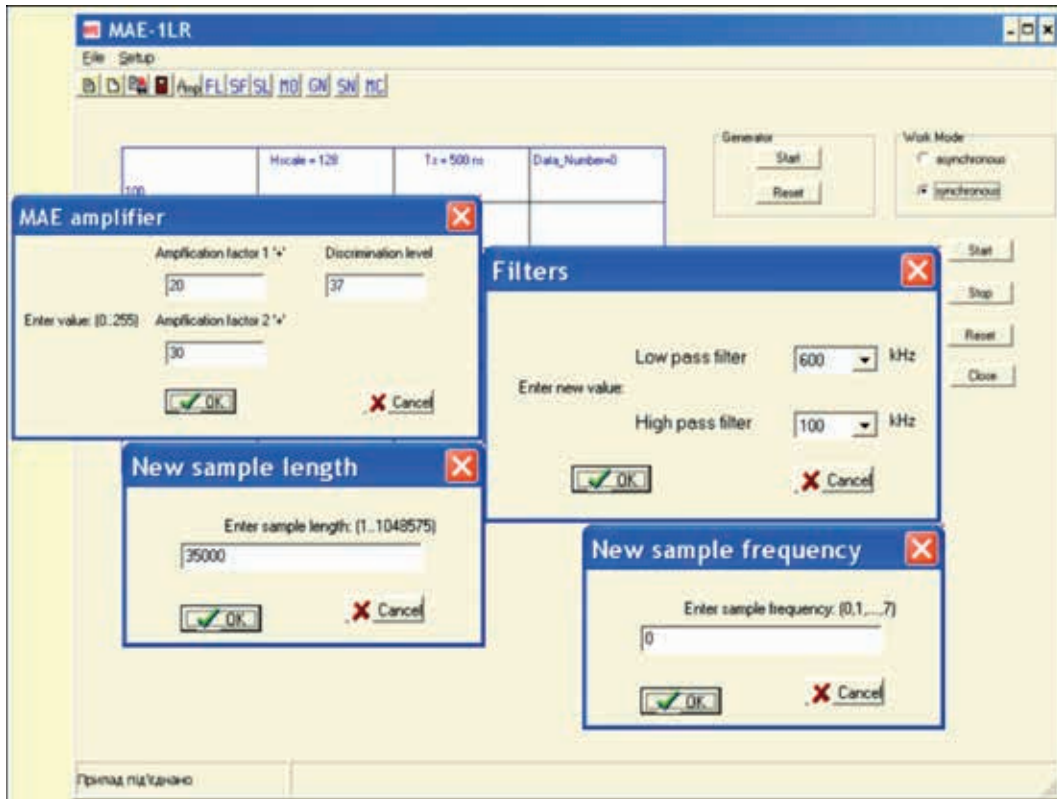


Рис. 4. Вигляд деяких вікон розробленого програмного забезпечення магнетоакустичної системи

МАЕ; поріг дискримінації, частота дискретизації та об'єм виборки сигналу МАЕ, кількість виборок; робоча смуга частот.

Також встановлюються параметри каналів відбору та реєстрації індукції В та напруженості магнетного поля Н, струму перемагнення І, зокрема, коефіцієнти підсилення підсилювачів та частота дискретизації сигналу. Налаштовується генератор сигналу перемагнення, зокрема, форма і частота сигналу, тип синхронізації та стабілізації параметрів сигналу перемагнення.

Розроблене інформаційне ПЗ дає можливість досліджувати амплітудні, часові та частотні параметри сигналу МАЕ. Зокрема, реалізовані алгоритми побудови гістограми амплітудного та часового розподілів, знаходження огинаючої сигналу МАЕ,

оцінки залежності кількості імпульсів сигналу МАЕ від порогу дискримінації, алгоритм знаходження частотного спектру сигналу та інші [9–11].

Апробація інформаційного програмного забезпечення. Було проведено апробацію розроблених алгоритмів опрацювання сигналів акустичної та магнетоакустичної емісії. Зокрема побудовано гістограми розподілів амплітуд імпульсів сигналу МАЕ для сталюого та нікелюого пластинчастих зразків.

Вигляд одержаних гістограм розподілів амплітуд імпульсів наводить на думку про експоненційний характер розподілів. Здійснено перевірку гіпотези про експоненційність законів розподілу за критерієм χ^2 . Проведені розрахунки дають підставу констатувати, що амплітуда імпульсів сигналу МАЕ розподілена за експоненційним законом,

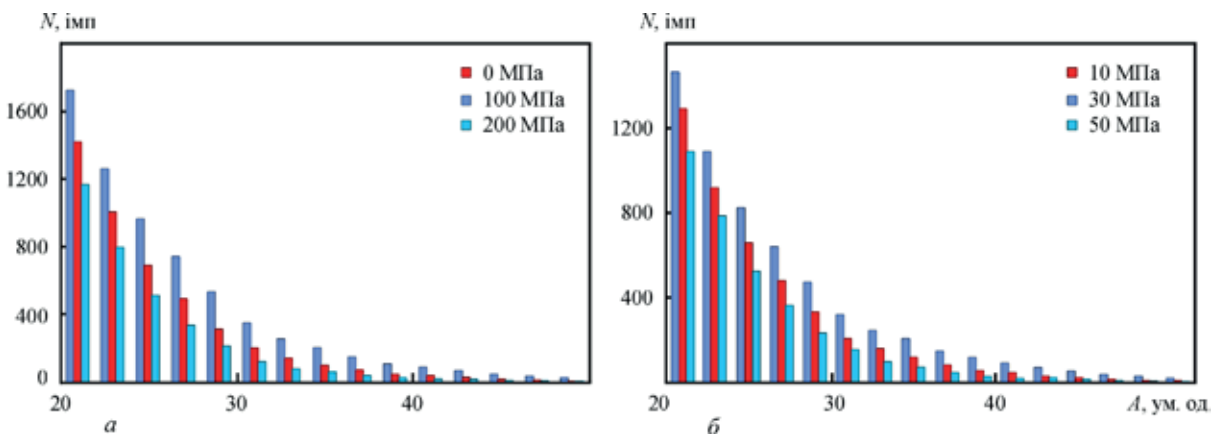


Рис. 5. Оцінки густини ймовірності розподілу амплітуд (гістограми) для сигналу МАЕ за різних навантажень зразків (а – зі сталі; б – з нікелю)

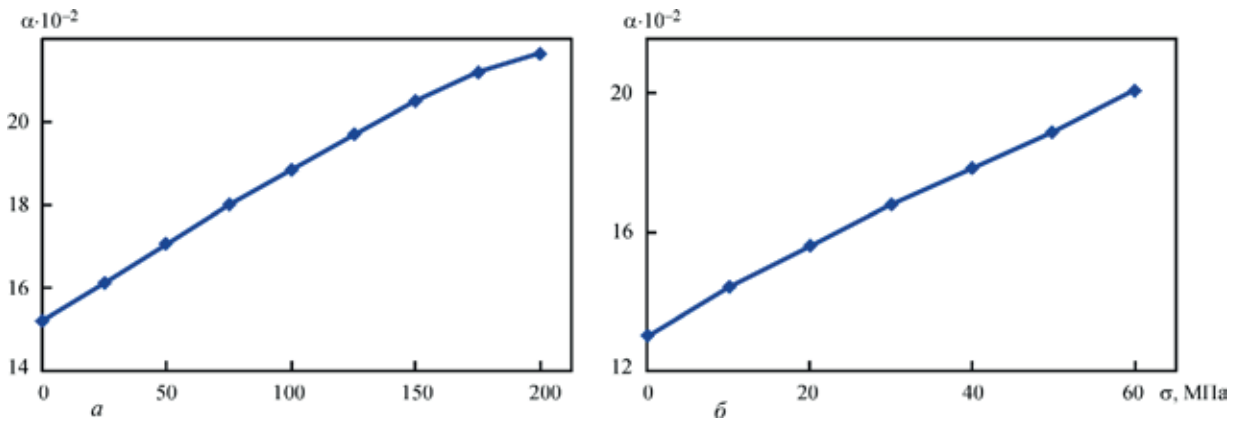


Рис. 6. Залежність коефіцієнта загасання апроксимувальної експоненти оцінки амплітудного розподілу від прикладеного навантаження для зразків (а – зі сталі; б – з ніколу)

а його параметр α можна використовувати як інформаційний при діагностуванні феромагнетних об'єктів методом МАЕ.

Для цих же зразків, які піддавалися навантаженню розтягу, знайдено оцінки розподілів амплітуд імпульсів для різних значень прикладеного навантаження (рис. 5, а, б).

Грунтуючись на результатах досліджень про експоненційний закон розподілу амплітуд сигналу МАЕ, побудовано залежності коефіцієнтів загасання апроксимувальних експонент оцінок амплітудних розподілів від прикладеного навантаження, які можна використати як градувальні криві для діагностування залишкових напружень у феромагнетних об'єктах тривалої експлуатації (рис. 6, а, б).

Ці залежності характеризується стійкістю до низки експериментальних чинників, які впливають на амплітудні характеристики сигналу (коефіцієнта підсилення сигналу МАЕ, якості контакту перетворювача акустичної емісії з поверхнею об'єкта, діаграми напрямленості перетворювача), в порівнянні з аналогічною залежністю суми амплітуд сигналу від величини прикладеного навантаження [8, 10].

На основі проведених досліджень з використанням розробленого інформаційного ПЗ запропоновано методику оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій за параметрами сигналу МАЕ, яка полягає у такому:

1. Реєстрування МАЕ на ділянці досліджуваного об'єкта.
2. Опрацювання зареєстрованого сигналу згідно розроблених алгоритмів:
 - оцінювання гістограми розподілу амплітуд сигналу МАЕ;
 - апроксимація гістограми експоненційною функцією;
 - знаходження коефіцієнта загасання експоненти.
3. Знаходження за еталонною залежністю коефіцієнта загасання від прикладеного напруження відповідних значень залишкового напруження в діагностованій області феромагнетного матеріалу.

Розроблені керівництва щодо експлуатування портативних систем та методики контролю їх метрологічних характеристик. За результатами контролю ДП «Львівстандартметрологія» метрологічних характеристик розроблених систем отримано Свідоцтва.

Висновки

1. Розроблено структури багатоканальної акустико-емісійної та магнетоакустичної систем діагностування. Обґрунтовано виконання систем у вигляді набірних блочних конструкцій. Запропоновано конструкцію мобільного пристрою для переміщення накладного електромагнета магнетоакустичної системи.
2. Виготовлено дослідні зразки магнетоакустичної та багатоканальної акустико-емісійної портативних систем.
3. Розроблено системне та інформаційне програмне забезпечення магнетоакустичної та багатоканальної акустико-емісійної портативних систем.
4. Запропоновано методику оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій за параметрами сигналу магнетопружної акустичної емісії.
5. Розроблено методики контролю метрологічних характеристик магнетоакустичної та багатоканальної акустико-емісійної портативних систем.
6. За допомогою портативних багатоканальної акустико-емісійної системи «SKOP-32» та магнетоакустичної системи «МАЕ-1ЛР» проведено акустико-емісійне та магнетоакустичне обстеження ємностей, що працюють під тиском, та ділянок трубопроводів і обладнання нафтогазового комплексу України у Львівській та Івано-Франківській областях.

Список літератури

1. Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Почапський Є.П. (2014) *Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів*. Київ, Наукова думка.
2. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Рудак М.О. (2016) Застосування методу магнетопружної акус-

- тичної емісії для оцінювання технічного стану тривало експлуатованої на нафтогоні сталі 19Г. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **3**, 81–84.
3. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Рудак М.О. (2016) Застосування методу магнетопружної акустичної емісії для контролю напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій. *Технологические системы*, **2**, 67–69.
 4. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Сімакович О.Г. (2014) Визначення координат джерел акустичної емісії в тонкостінних об'єктах циліндричної форми. *Відбір і обробка інформації*, **41**, 55–62.
 5. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Сімакович О.Г. (2015) Розташування джерел акустичної емісії на тонкостінних об'єктах сферичної форми. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **1**, 122–129.
 6. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Коблан І.М. (2016) Підвищення ефективності збудження сигналів магнетопружної акустичної емісії. *Відбір і обробка інформації*, **44** (120), 5–11.
 7. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П. та ін. (2016) Розроблення концепції побудови системи діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами магнетопружної акустичної емісії. Матеріали доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції з неруйнівного контролю та технічної діагностики. Київ, 22–24 листопада 2016 р., 249–254.
 8. Почапський Є.П., Мельник Н.П., Коблан І.М. (2018) Вплив умов збудження на генерування сигналів магнетопружної акустичної емісії у феромагнетних матеріалах. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **3**, 142–147.
 9. Яворський І.М., Почапський Є.П., Воробель Р.А., Русин Б.П. (2018) Інформаційні технології неруйнівного контролю. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн. пос. у 8-ми томах. Назарчук З.Т. (ред.). Т. 7. Львів, Простір-М.
 10. Почапський Є.П., Клим Б.П., Мельник Н.П. та ін. (2019) Оцінювання впливу механічних властивостей конструкційних феромагнетних матеріалів та їх зварних з'єднань на зміну параметрів магнетопружної акустичної емісії. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, **2**, 7–12.
 11. Pochapskyi Ye.P., Melnyk N.P. (2019) Mathematical model and informative features of the signal of the magnetoelastic acoustic emission. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, **4**, 105–110.
 2. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Rudak, M.O. (2016) Application of the method of magnetoelastic acoustic emission for evaluation of technical condition of 19G steel after long-term operation in an oil pipeline. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **3**, 81–84 [in Ukrainian].
 3. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Rudak, M.O. (2016) Application of the method of magnetoelastic acoustic emission for control of stressed state of ferromagnetic structural elements. *Tekhnologicheskie Sistemy*, **2**, 67–69 [in Ukrainian].
 4. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Simakovych, O.G. (2014) Determination of the coordinates of acoustic emission sources in thin-walled objects of a cylindrical shape. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **41**, 55–62 [in Ukrainian].
 5. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Simakovych, O.G. (2015) Location of acoustic emission sources in thin-walled objects of a spherical shape. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **1**, 122–129 [in Ukrainian].
 6. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Koblan, I.M. (2016) Improvement of the effectiveness of excitation of signals of magnetoelastic acoustic emission. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **44** (120), 5–11 [in Ukrainian].
 7. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P. et al. (2016) Development of the concept of building a system for diagnosing products and structural elements by the parameters of magnetoelastic acoustic emission. In: *Proc. of 8th National Sci.-Techn. Conf. of Nondestructive Testing and Technical Diagnostics* (Kyiv, 22-24 November 2016), 249–254 [in Ukrainian].
 8. Pochapskyi, Ye.P., Melnyk, N.P., Koblan, I.M. (2018) Effect of excitation conditions on generation of magnetoelastic acoustic emission signals in ferromagnetic materials. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **3**, 142–147 [in Ukrainian].
 9. Yavorskyi, I.M., Pochapskyi, Ye.P., Vorobel, R.A., Rusyn, B.P. (2018) Information technologies of nondestructive testing. Technical diagnostics of materials and structures: Refer. book in 8 Vol. Ed. by Z.T. Nazarchuk., Vol. 7, Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
 10. Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Melnyk, N.P. et al. (2019) Assessment of the influence of mechanical properties of structural ferromagnetic materials and their welded joints on the change of parameters of magnetoelastic acoustic emission. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 7–12 [in Ukrainian].
 11. Pochapskyi, Ye.P., Melnyk, N.P. (2019) Mathematical model and informative features of the signal of the magnetoelastic acoustic emission. *Scientific J. of the Ternopil National Technical University*, **4**, 105–110.

References

PORTABLE MEANS FOR DIAGNOSTICS OF PRODUCTS AND ELEMENTS OF STRUCTURES BY THE PARAMETERS OF ELASTIC WAVES OF DIFFERENT NATURE

Ye.P. Pochapskyi, B.P. Klym, N.P. Melnyk, Ya.D. Tolopko, P.M. Dolyshnii, P.P. Velykyi

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: pochapskyi@ipm.lviv.ua

The paper presents the results of development of portable means for diagnostics of products and structural elements by the parameters of elastic waves of different nature. Structures of multichannel acoustic-emission and magnetoacoustic diagnostic systems were developed. System realization in the form of stacked block structures was substantiated. Design of a mobile device for moving the put-on magnet of the magnetoacoustic system is proposed. System and information software for magnetoacoustic and multichannel acoustic-emission portable systems was developed. A procedure is proposed for evaluation of the stressed state of ferromagnetic structural elements by the parameters of the signal of magnetoelastic acoustic emission. Procedures for controlling the metrological characteristics of the developed systems were elaborated. Acoustic emission and magnetoacoustic inspection of pressure vessels and pipeline sections and equipment of oil and gas complex of Ukraine in Lviv and Ivano-Frankivsk regions was performed. 11 Ref., 6 Fig.

Keywords: nondestructive testing, acoustic emission, magnetoelastic acoustic emission, multichannel acoustic-emission system, magnetoacoustic system, software, signal processing algorithms, evaluation of stress-strain state of ferromagnetic structural elements, control of metrological characteristics

Надійшла до редакції 13.07.2020

ВИКОРИСТАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРОКАТНИХ КЛІТЕЙ З ДІАГНОСТИЧНОЮ МЕТОЮ

А.В. Баглай

ДП «ДІАМЕХ-УКРАЇНА». 61105, м. Харків, вул. Киргизька, 19, АБК-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

Представлено результати вимірювань на одній з клітей стану 1680 часу запізнювання ділянок лінії приводу при двох режимах прокатки. Показано, що чим більша швидкість завдання полоси в кліть, тим більше розмикаються зазори в шпindelному зчленуванні і тим більше час запізнювання реакції ділянок лінії, який приймається в якості діагностичної ознаки. Запропоновано використовувати особливості технології та режимів роботи при визначенні часу запізнювання та технічного стану лінії. Бібліогр. 2, рис. 2.

Ключові слова: прокатний стан, лінія приводу, захоплення полоси, вібровимірювання, знос, зазори, час запізнювання, діагностування

Знос зчленувань в лініях головного приводу валків прокатних клітей та кутові зазори, що утворюються з цієї причини, суттєво впливають на ударні навантаження в обладнанні в період захоплення полоси валками та на рівень вібрації під час прокатки. Наприклад, відносна динамічна складова навантаження (механічного моменту) на ділянці двигун–редуктор при розвиненому зносі бронзових вкладишів в універсальних шпindelях збільшується у 1,5...2,0 рази [1]. З цієї ж причини рівень вібрації подушок робочих валків зі сторони приводу більше, ніж з робочої (не приводної), та збільшується по мірі зносу. У зв'язку з цим для прокатних клітей актуальною задачею є розробка методів та способів визначення безпосередньо або опосередковано зносу елементів або зазорів в зчленуваннях лінії приводу.

В даний час на станах відсутні штатні вимірювачі, за допомогою яких можна вирішувати таке завдання під час холостого ходу або прокатки. Знос бронзових вкладишів вимірюють вручну під час перевалки робочих валків шляхом визначення відстані між ними.

В роботах [1, 2] запропоновано спосіб визначення технічного стану лінії приводу в частині зносу та зазорів, який полягає в періодичному вимірюванні часу запізнювання віброреакції ділянок під час захоплення полоси валками. Суть полягає в тому, що чим більше зазор в шпindelному зчленуванні, тим більше часу необхідно для його замикання в процесі заповнення осередка деформації металом і тим більший час запізнювання віброреакції ділянок корпусного обладнання вздовж лінії приводу. Цей час пропорційний кутовому зазору та зносу і є їх непрямою ознакою.

Поставлена задача полягає в тому, щоби на основі вібровимірювань в декількох точках оцінити

© А.В. Баглай, 2020

ефективність визначення технічного стану лінії приводу під час запізнювання, визначити характер і діапазон його зміни.

В якості об'єкта для досліджень прийняли двохвалкову чорнову кліть широкосмугового стану гарячої прокатки 1680 ПАО «Запоріжсталь» (рис. 1). Її особливість полягає в тому, що в парі з наступною кліттю кварто № 1 тут ведеться роздільна прокатка слябів довжиною L або безперервна прокатка слябів подвоєної маси та довжиною $2L$. Крім того, при роздільній прокатці швидкість завдання слябів довжиною L погоджено з окружною швидкістю валків. При безперервній прокатці сляби подвійної довжини $2L$ за умовами технології завдають зі швидкістю, що перевищує швидкість валків у 1,5...1,7 рази.

Вимірювання вібропереміщення в точках К, 11, 6 та М згідно рис. 1 виконали в один період при прокатці партій слябів за двома технологіями ($L - 35$ та $2L - 37$ слябів). Відлік часу τ_i для трьох ділянок вели за початком різкої зміни вібрації та обертаючого моменту М на валу між двигуном і редуктором в результаті захоплення сляба валками. Час запізнювання ділянок відраховували від сигналу віброметра, що розташований на корпусі прокатної кліті (т. К). Розглянемо результати обробки вимірювань при прокатці за двома техноло-

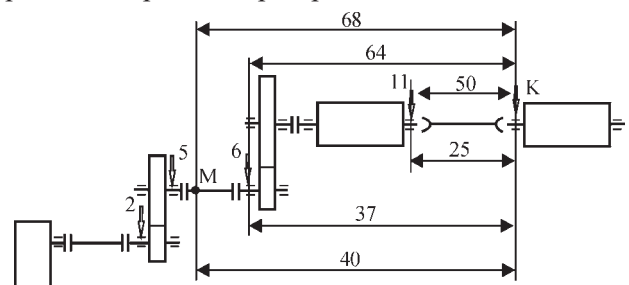


Рис. 1. Двохвалкова чорнова кліть: 2, 5, М, 6, 11, К – точки вимірювання; 25, 37, 40 – середній час запізнювання (мс) при захопленні «коротких» слябів; 50, 64, 68 – середній час запізнювання (мс) при захопленні «довгих» слябів

гіями, (умовно відзначимо їх як «короткі» (к) – L та «довгі» (д) – 2L), що наведені на рис. 1. В результаті отримані середні значення τ для трьох ділянок, з яких певний інтерес представляє шпindelна. Тут при прокатці «довгих» (д) слябів $\tau_{11д} = 50$ мс в два рази більший, чим при прокатці «коротких» (к) – $\tau_{11к} = 25$ мс при одному й тому ж технічному стані ділянки. Відомо, що розмикання зазору в момент удару полоси об валки відбувається в шпindelному зчленуванні зі сторони робочого валка. При завданні в кліть «довгих» слябів з більшою швидкістю, ніж окружна швидкість валків, останні приймають додаткову кутову швидкість. Внаслідок цього валки випереджують в кутовому русі шпindel і зазори розмикаються на більшу величину, ніж при узгодженій швидкості «коротких» слябів і валків.

Наведені результати інтерпретуються наступним чином. В зчленуванні «шпindel – валок» з-за зносу переважно бронзових вкладишів утворюється люфт. При прокатці «коротких» слябів він розмикається не на повну величину $\delta_{д}$, а частково, тобто на деяку середню величину кутового зазору $\delta_{к}$, якому відповідає статистично середнє запізнювання $\tau_{11к} = 25$ мс. Саме ця величина зазору впливає на максимальний піковий момент при захопленні «коротких» слябів.

Збільшення середнього значення τ_{11} при завданні «довгих» слябів підтверджує наявність люфту, який розмикається в середньому на величину зазору $\delta_{д}$, що відповідає середньому часу запізнювання $\tau_{11д} = 50$ мс.

Таким чином, середній час запізнювання реакції шпindelної ділянки відображає ту частину люфту $\delta_{д}$, яка в середньому розмикається на $\delta_{к}$ або $\delta_{д}$ до моменту захоплення валками «короткого» або «довгого» сляба та впливає на динамічне навантаження. Оскільки $\tau_{11д} > \tau_{11к}$, то очевидно, що $\delta_{д} > \delta_{к}$. Це підтверджує результати вимірювань обертального момен-

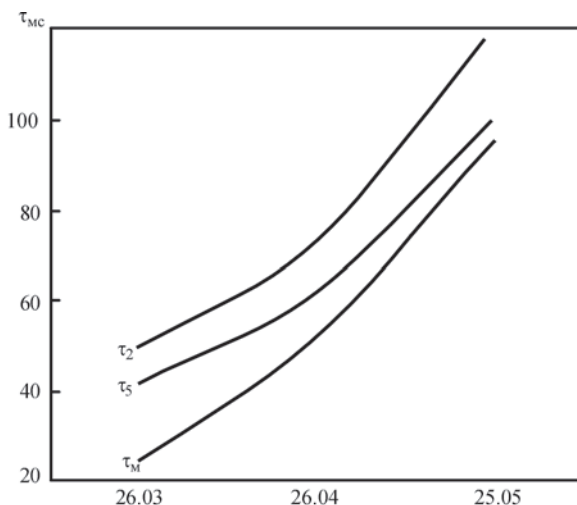


Рис. 2. Залежність часу запізнювання реакції точок 2, 5 та М від напрацювання лінії приводу

ту М. При прокатці «довгих» слябів вплив зазору $\delta_{д}$ призводить до збільшення середнього значення коефіцієнта динамічності до $K_{д} = 3,5$ в порівнянні з прокаткою «коротких» слябів – $K_{к} = 2,2$ [2].

Розглядаючи інші ділянки, встановлено, що збільшення часу запізнювання $\tau_{6д}$ та $\tau_{Мд}$ при прокатці «довгих» слябів відбулось за рахунок шпindelної ділянки. Різниця часу між точками 11 і 6, 11 і М, 6 і М при двох технологіях прокатки виявилось незначною. Очевидно, що періодичний аналіз відносного часу запізнювання цих ділянок дозволяє також оцінювати зміну їх технічного стану.

З метою визначення часу запізнювання при іншому стані лінії виконали трьохкратні вимірювання в трьох точках значення τ відносно прокатної кліті (т. К). Через 11 діб роботи, після того, як були встановлені шпindelі з новими вкладишами, коли можна вважати, що знос вкладишів був порівняно невеликим, час запізнювання трьох ділянок згідно з вимірюваннями склав найменше значення: $\tau_2 = 51$, $\tau_5 = 44$ та $\tau_M = 28$ мс (26.03). Наступні вимірювання провели через 30 діб (26.04). Запізнювання збільшилось: $\tau_2 = 75$, $\tau_5 = 65$ та $\tau_M = 56$ мс. Вимірювання 25.05. проведені при найбільшому зносі вкладишів, їх напрацювання склали 97 діб. Відповідні середні значення τ виявились найбільшими: $\tau_2 = 116$, $\tau_5 = 101$ та $\tau_M = 97$ мс.

Таким чином, час запізнювання реакції шпindelної ділянки пов'язаний зі зносом бронзових вкладишів в зчленуванні «шпindel – робочий валок» та відповідно з тією розмикаючою частиною люфту, яка впливає на ударне навантаження при захопленні полоси.

Висновки

На підставі наведених результатів та досвіду численних вимірювань вібродинамічних процесів, зокрема, в клітях стану 1680, підведемо деякі підсумки:

1. Час запізнювання ділянок лінії головного приводу однозначно пов'язаний насамперед зі зносом та кутовими зазорами в зчленуванні «валок – шпindel». При цьому середнє значення τ_i ділянок за даними вимірювань відображає середнє значення тої частини люфту, що називається зазором, на яку він розмикається при ударі полоси об валки, та яка безпосередньо впливає на динамічні навантаження.

2. У виміряній величині τ_i ділянок присутній час запізнювання шпindelної ділянки, що дозволяє значення τ_i для будь-якої іншої ділянки прийняти в якості діагностичної ознаки технічного стану лінії приводу. Тому, виходячи з практичної доцільності, спочатку можна скористатися двома вібродатчиками, наприклад, встановленими на

робочій кліті та на вході редуктора (т. 2). Потім, по мірі збільшення τ_2 , встановлювати додаткові датчики в інших точках з метою поглиблення аналізу стану лінії.

3. Значення τ_i та їх діапазон зміни достатні для їх фіксації, щоб розрізнити технічний стан ділянок лінії. Допустимі (граничні) значення τ_i доцільно встановлювати емпіричним шляхом з урахуванням особливостей технології, режимів роботи та конструкції зчленувань лінії приводу. В якості опорних (найменших) значень τ_i для порівняння слід приймати дані вимірювань, виконаних безпосередньо після ремонту, особливо капітального, коли обладнання знаходиться в найкращому стані.

Список літератури

1. Веренев В.В. (2014) *Снижение динамических нагрузок и диагностики широкополосных станов в переходных режимах*. Никополь, Фельдман О.О.
2. Веренев В.В. и др. (2007) *Диагностика и динамика прокатных станов*. Днепропетровск, ИМА-пресс.

References

References

1. Verenev, V.V. (2014) Decrease of dynamic loads and diagnostics of broad-strip mills in transition modes. Nikopol, Feldman O.O. [in Russian].
2. Verenev, V.V. et al. (2007) Diagnostics and dynamics of rolling mills. Dnepropetrovsk, IMA-press [in Russian].

USE OF THE FEATURES OF THE TECHNOLOGY AND OPERATING MODES OF MILL STANDS FOR DIAGNOSTIC PURPOSES

A.V. Baglay

SE «DIAMECH-UKRAINE», 19 Kirgizska str., 61105, Kharkiv, Ukraine. E-mail: baglay@diamech.com.ua

The results of measurements of the time delay in sections of the drive line at two rolling modes in one of the stands of mill 1680 are presented. It is shown that the greater the speed of the strip feeding into the cage, the more open are the gaps in the spindle joint, and the longer is the response time of the line sections, which is taken as a diagnostic feature. It is proposed to use the features of technology and operating modes at determination of the delay time.

Keywords: rolling mill, drive line, strip capture, vibration measurements, wear, gaps, delay time, diagnosing.

Надійшла до редакції 03.11.2020

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING-ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN
THE WORLD!

13. – 17. September, 2021

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1
0.10.2020

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

XV МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРОБЛЕМИ КОРОЗІЇ ТА ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ» (КОРОЗІЯ-2020)

15-16 жовтня у м. Львові відбулася XV міжнародна конференція «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» (КОРОЗІЯ-2020), присвячена 110-річчю від дня народження академіка Г.В. Карпенка. Конференції традиційно проводяться вже понад 20 років (починаючи з 1998 р.). В цьому році вперше проведено у змішаному форматі: поряд з усними прозвучали доповіді *online* та *offline*.

Урочисте засідання конференції відкрив директор фізико-механічного Інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, академік З.Т. Назарчук. З привітанням виступив Президент Української асоціації корозіоністів, чл.-кор. НАН України В.І. Похмурський.

У доповіді, присвяченій 110-річчю з дня народження академіка В.Г. Карпенка, В.І. Похмурський відмітив, що започаткований В.Г. Карпенком напрямок наукових досліджень в галузі фізико-хімічної механіки матеріалів, зокрема корозії та корозійно-механічного руйнування металів, понад півсторіччя залишається актуальним. Цей напрямок успішно розвивають його послідовники (М.С. Хома, Г.М. Никифорчин, І.М. Дмитрах, О.Є. Андрейків та інші).

У роботі конференції взяли участь понад 120 науковців та представників промислових підприємств з 9 країн світу (Україна, Китай, Німеччина, Мексика, Польща, Словаччина, Білорусь, Казахстан, Швейцарія). На конференції заслухано 38 усних доповідей (з них 24 – у режимі *online*; 14 – у режимі *offline*); 80 доповідей представлено як стендові та заочні за такими науковими напрямами: фундаментальні аспекти корозії та корозій-

но-механічного руйнування; воднева та газова корозія; нові корозійнотривкі матеріали та покриття; інгібіторний та біоцидний захист; електрохімічний захист; методи досліджень і корозійний контроль; протикорозійний захист обладнання нафтогазової, хімічної та енергетичної промисловостей.

Фахівцями Інституту електрозварювання було представлено 7 доповідей, що транслювалися у *online* режимі. Звичайно, в короткому повідомленні неможливо дати огляд всіх розглянутих питань, тому торкнемося більшою мірою тих, які стосуються напрямків наукових досліджень Інституту електрозварювання.

Корозія металів є однією із найпоширеніших причин передчасного, часто аварійного виходу з ладу металевих конструкцій і спричиняє величезні матеріальні збитки в різних галузях промисловості. Зокрема, низка доповідей була присвячена питанням надійної експлуатації трубопровідного транспорту. Так, вплив сірководню в нафтопродуктах, який може спричинити сірководневе корозійне розтріскування під напруженням труб зі сталі 17Г1СУ, висвітлено у доповіді М. Хоми. Відмічено, що в останні роки зростає кількість відмов промислових трубопроводів. За результатами вивчення дії сірководню та тривалості його контакту зі сталлю на корозійну стійкість трубої сталі 17Mn1Si зроблено висновок, що ця сталь при концентрації сірководню 1500 мг/л має низьку корозійну стійкість, що призводить до зростання ризику руйнування труб.

У доповіді Г. Никифорчина повідомлялося, що під час експлуатації у трубопроводах можуть утворюватися розшарування, як на лінійних ді-



Відкриття конференції КОРОЗІЯ-2020 (зліва направо: Похмурський В.І., Хома М.С., Назарчук З.Т.)



Учасники конференції КОРОЗИЯ-2020

лянках, так і на згинах труб. Підкреслено, що розшарування розташовуються на ділянках з відносно слабшою текстурою, паралельно напрямку прокату, який має анізотропію мікроструктури. Розшарування зазвичай поширюється в оточуючому напрямку, що може викликати руйнування трубопроводу. Наводнювання металу зсередини труби призводить до накопичення молекулярного водню в певних місцях, наприклад, в міжзеренних включеннях і створює високий тиск, що сприяє формуванню та накопиченню мікродфектів у трубі, погіршенню її механічних властивостей, зокрема пластичності та опору крихкому руйнуванню, що, при тривалій експлуатації, може призводити до порушення цілісності протяжних ділянок.

Обговорено вплив гідратування на швидкість та локалізацію корозійних процесів на промислових трубопроводах (сталі 17ГС) у хлоридних середовищах (доповідач д.т.н. Л. Побережний). У доповіді представлено механізм впливу газогідрату на корозію матеріалу трубопроводів та зроблено висновок про те, що газогідрат корозії не викликає, а лише інтенсифікує і локалізує вплив корозивних компонентів. На основі закономірності спільної дії механічних напружень, утворення хлоридів та гідратів на швидкість та локалізацію корозійного процесу, аналізі коефіцієнтів гідратування для загальної та місцевої корозії, які складають відповідно 1,13 та 1,32, підтверджена гіпотеза про інтенсифікацію локальної корозії завдяки утворенню гідратів.

Проаналізовано нормативні документи у сфері захисту від корозії щодо нормованих значень показників захисних потенціалів (доповідач С. Осадчук). Показано, що у стандартах країн СНД значення мінімального захисного поляризаційного потенціалу нормуються в діапазоні від $-0,85$ В до

$-1,05$ В, у європейських – від $-0,65$ В до $-0,95$ В. Натомість у європейських стандартах відсутні вимоги до верхньої границі захисного потенціалу без омичної складової, що обумовлено диференційованим підходом до його вибору з урахуванням корозійної активності оточуючих ґрунтів. Проінформовано про надання чинності зміні № 1 до ДСТУ 4219, в якій встановлено, що для сталевих трубопроводів з рівнем міцності вище 580 МПа, поляризаційні потенціали не повинні перевищувати $-1,10$ В. При цьому захисний потенціал повинен забезпечувати технічно достатній захисний ефект, при якому швидкість залишкової корозії металу трубопроводу менше $0,01$ мм/рік.

Доповідалося, що за результатами прискорених корозійних випробувань корозійно-механічна тривкість зварних з'єднань, отриманих високочастотним та дуговим зварюванням, практично не відрізняється (доповідач аспірант С. Прокопчук).

Для прогнозування залежності швидкості корозії сталі від температури у повідомленні д.т.н. Р. Джали запропоновано нову математичну модель, яка описує корозійне розтріскування сталевих труби біля нафтоперекачувальної станції. Модель базується на вдосконаленому співвідношенні типу Кеше для густини анодного струму, новому критерію міцності металу, методі оцінювання граничного стану сталевих трубопроводів, що знаходиться під тиском, та застосуванні оптимізації з використанням нейронної мережі. Для контролю корозійного стану підземних трубопроводів описано обладнання, однією з переваг якого є більша ефективність та інформативність при менших витратах праці.

Продемонстрована ефективність високочастотної механічної проковки (ВМП) для підвищення опору втомному руйнуванню таврових зварних

з'єднань з низьколегованої сталі 15ХСНД, що експлуатуються у помірному та морському кліматі (доповідач к.т.н. С. Соловей). Показано та ґрунтовно доведено, що використання технології ВМП є ефективним методом підвищення втомної довговічності зварних з'єднань на всіх стадіях експлуатації металевих конструкцій, у тому числі, тривало експлуатованих.

Командою мексиканських та українських науковців зроблено повідомлення щодо ефективності використання магнітного поля під час аргонодугового зварювання дуплексної нержавіючої сталі 2205 для підвищення тривкості проти локальної корозії та утворення корозійно-втомних тріщин (доповідач к.т.н. О. Білий).

Дослідження абсорбції водню зразками зі сталі 09Г2С, латуні, мельхіору та міді показало, що мідь в 17 разів менше наводнюється, ніж мельхіор та в 4,5 рази – ніж латунь, а швидкість контактної та щільної корозії сталі з цими металами практично однакова, без ознак локальної корозії. Враховуючи домінуючий вплив наводнювання на зародження тріщин в теплопередавальних трубках в процесі їх тривалої експлуатації, для промисловості рекомендовано виготовляти газоохолоджувачі турбогенератора з мідними теплопередавальними трубками (доповідач д.т.н. О. Нарівський). Для виготовлення газоохолоджувачів та холодильників масла, яке передбачає підвищення їх надійності та довговічності внаслідок зниження небезпеки розгерметизації з'єднань трубна решітка – теплопередавальні трубки, запропоновано нове технічне рішення, яке полягає у наплавленні на трубні решітки шару міді та наступному зварюванні його з мідними теплопередавальними трубками та розвальцьовуванням.

Досліджено складний антикорозійний пігмент на основі кальційвмісного цеоліту з осаждением цинком фосфат на його нанопористій поверхні (доповідач д.т.н. І. Зінь). Встановлено, що це ефективно уповільнює корозію алюмінієвого сплаву в розчині синтетичних кислотних дощів. Пігмент пригнічує підплівкову корозію металу біля дефектів алкідної фарби, що може бути перспективним інгібуючим компонентом фарби покривів для захисту конструкцій з алюмінієвих сплавів в промисловій атмосфері. Побічний продукт синтезу біодизеля – технічний гліцерин у концентрації 2,5 г/л ефективно інгібує корозію алюмінієвого сплаву в 0,1% розчині NaCl, а при підвищенні температури середовища до 353 К його захисний ефект все ще високий. Механізм пригнічення корозії обумовлений адсорбцією через функціональні гліцеринові функціональні групи на поверхні металу і утворює захисну бар'єрну плівку.

Результатами досліджень впливу термооброблення (гартування та штучне старіння) на корозійно-механічну тривкість зварного з'єднання тонколистового алюмінієвого сплаву системи Al-Mg-Si-Cu, отриманого неплавким електродом, показано, що експлуатаційні характеристики виробу в корозивному середовищі будуть визначатися тривкістю проти міжкристалітної корозії (доповідач к.х.н. Л. Ниркова).

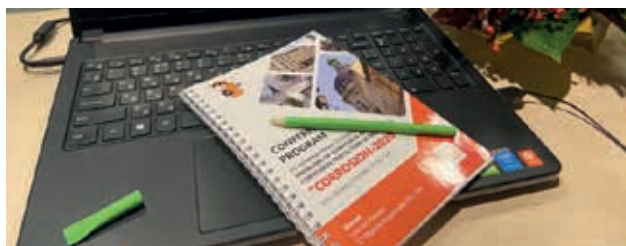
Для ремонту корозійних зварних швів трубопроводів, що експлуатуються під водою, розроблено технологію для вологого підводного зварювання із використанням аустенітного наплавленого шару (доповідач д.т.н. С. Максимов). За результатами досліджень таких зварних з'єднань встановлено, що після корозійних випробувань у рухомому потоці та при періодичному зануренні з наступним згинанням на кут 180°, на зварних з'єднаннях з наплавленими феритним та аустенітним шарами пошкоджень у вигляді тріщини вздовж лінії сплавлення зварного шва з наплавленим шаром не утворилося, що підтверджує ефективність такої технології.

Німецькими вченими (доповідач Dr M. Wiegand) висвітлено питання щодо внутрішньої корозії трубопроводів холодного та гарячого водопостачання, опалення, у тому числі, у відносно нових будівлях, які не введені в експлуатацію. Як чинники виходу з ладу таких систем відмічені неоднорідність поверхні труб, що сприяє розвитку локальної корозії, якість води, окислювально-відновлювальний потенціал, рН, розчинений кисень, електропровідність, температура. Слід зазначити, що з аналогічними проблемами до фахівців Інституту звертаються представники різних експлуатуючих організацій, і проблема внутрішньої корозії трубопроводів є також актуальною для України.

Конференція «CORROSION-2020» сприяла конкретизації нових пріоритетних напрямків досліджень у галузі корозії та протикорозійного захисту матеріалів, а також встановленню ділових контактів між науковцями та виробничниками. Додаткова інформація про конференцію та збірка рефератів доповідей за посиланнями:

URL: <http://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020/>;
URL: http://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020/en/Book_abstract_Corrosion2020.pdf.

Л.І. Ниркова, С.О. Осадчук



НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ СПОРУДЖЕННІ ТРАНСАЛЯСКІНСЬКОГО ТРУБОПРОВОДУ

Трансаляскінський трубопровід довжиною 12288 км є одним з наймасштабніших зварювальних і будівельних проєктів в історії. Протягом трьох років десятки тисяч зварювальників, незважаючи на суворий клімат і рельєф дикої місцевості Аляски, робили все щоб змонтувати і зварити разом всі частини 1220 мм трубопроводу. З тих пір було викачано більше 2,7 млрд м³ нафти з нафтового родовища Прадхо-Бей, яке знаходиться на півночі Аляски. Закінчується нафтопровід в місті Валдиз на узбережжі Тихого океану.

Будівництво такого величезного по обсягах роботи трубопроводу почалося в 1975 р. Для проєкту довелося залучати робітників з усієї країни. Люди, які залучалися до зварювання трубопроводу в своїй більшості були від профспілкової організації Pipeliners Local 798. Ця організація спеціалізується на наданні зварників для реалізації великомасштабних трубопровідних проєктів.

Зварювальники вперше приймалися на роботу за допомогою сертифікації, для якої потрібно було виконати декілька тестових зварних швів. Якщо зварнику не вдавалося зробити необхідні зварні шви, він уже ніяк не міг бути прийнятий на роботу за цим проєктом. Причиною такого суворого процесу найму на роботу, ймовірно, було те, що зварювальники повинні були виконувати зварювання нової сталеві труби, яка була товща і більша ніж в повсякденній роботі. Раніше лише невелика кількість фахівців стикалося з такою товщиною металу з урахуванням всіх вимог щодо якості зварного шву і умов, в яких доводилося працювати.

Перший крок до будівництва газопроводу передбачав проєктування і очищення ділянки довжиною в 800 миль. До роботи залучалися лише висококваліфіковані геодезисти. Робочим в свою чергу доводилося досить складно. Трансаляскінський трубопровід прокладали через ліс, після того, як шлях був очищений, взяли за буріння отворів у землі для опор з компенсаторами. Останні служили в якості основи для підтримки секцій трубопроводу з використанням напівкруглих опор. За допомогою крана опори опускалися в отвори, а потім приварювалися один до одного.

Якість зварних швів інженери управління перевіряли за допомогою радіографічного методу. Інспектори з контролю за якістю зварювання вказували дату перевірки прямо на опорному елементі. Прокладка траси нафтопроводу в цілому проводилася зигзагоподібною лінією. Таким чином стало можливим компенсувати напруги, що виникають

при зміщенні ґрунту під час сильних поздовжніх сейсмічних коливань. Крім того, така конструкція дуже ефективна при температурному розширенні металу.

Зварювальні роботи. Спочатку шви на трубопроводі повинні були мати середню ударну в'язкість 20 фут-фунт. Нижній поріг для цього параметра вимагав щонайменше 15 фут-фунт. Шви були зроблені з використанням зануреної зварювальної дуги і дроту, який містив 3 % нікелю. У загальній сукупності для трубопроводу було використано близько 80000 фунтів цього дроту. При цьому застосовувалися труби з стінкою завтовшки 11,7 мм на рівнинах і 14,3 мм в гірських районах, де потрібно підвищувати робочий тиск в трубопроводі. Межа плинності металу 422...492 МПа. В середині процесу будівництва, Департамент внутрішніх справ США та координаційна група по трубопроводу, що представляє штат Аляска, ввели більш жорсткі вимоги до ударної в'язкості зварного шву. Замість звичайного електроду, який спочатку використовувався для більшості монтажних швів, нові вимоги передбачали використання електроду E8010-G вищої якості. Ці електроди поставлялися на Аляску з Німеччини і були малознайомі для абсолютної більшості зварників. Протягом всього проєкту, зварювальники працювали в переносних алюмінієвих кабінках, які захищали їх від вітру і інших несприятливих погодних явищ. Такі хитрощі забезпечували робочим





освітлення, давали можливість працювати в нічний час. Після зварювання обов'язково слідувала перевірка якості швів за допомогою рентгенівського випромінювання. Інспектори подорожували разом з бригадами зварників в фургонках, де рентгенівська плівка автоматично оброблялася і перевірялася.

31 травня 1977 р. Трансаяльскінський трубопровід був готовий до експлуатації. Три місяці по тому танкер ARCO Juneau відплив з порту Вальдез з першим вантажем нафти, перекачаною по Трансаяльскінському трубопроводу.

Труби виготовлені зі сталі, в незначній мірі легованою ванадієм, причому були використані три типи труб з товщиною стінок 12 і 14 мм. Мінімальна межа плинності сталі труб становить 4218, 4570 і 4920 кгс/см². Труби з поздовжнім швом були поставлені з Японії. Трубопровід діаметром 1220 мм виготовлявся з труб методом стикового зварювання, як звичайні трубопроводи. Зварювання проводилося на трасі відповідно до федеральних стандартів на забезпечення безпечної експлуатації. Стики на трубах з товщиною стінки 14,3 мм виконувалися методом дугового зварювання під флюсом за сім проходів, з яких 1–3 виконувалися всередині труби, а 4–6 – зовні. В основному застосовувалося ручне і напівавтоматичне зварювання. Зварювання труб довжиною 12 м в двотрубні секції здійснювалося на спеціалізованих трубоукладальних базах.



Випробування матеріалів для зварювання і розробка методів зварювання здійснювалися задовго до початку будівництва. Були вивчені майже всі існуючі види зварювальних матеріалів обладнання та технології. У процесі кожного випробування проводилося зварювання труб, які передбачалося використовувати для Трансаяльскінського нафтопроводу, їх візуальний огляд і контроль якості зварних швів радіографічним методом. Потім труби розрізали на частини, з яких шляхом механічної обробки виготовлялися невеликі зразки для випробування в металургійних лабораторіях з руйнуванням зразка. Зразки проходили ударне випробування за методом Шарпі (метод з V-подібною розробкою), перевірку мікротвердості, випробування на зрушення з розкриттям тріщин, на розрив, на згин, а також випробування з руйнуванням зварного зразка з двома надрізами, передбачене стандартами нафтової промисловості США. Проводилися також випробування зварювальних машин і електродів з метою визначення меж сили струму, напруги та рекомендованих швидкостей зварювання. В процесі будівництва з трубопроводу періодично вирізалися зразки швів і спрямовувалися в лабораторію на дослідження. Якість зварного шву оцінювалося візуально, а потім проводилася рентгенодефектоскопія всіх швів із заповненням відповідного сертифіката. Зварні шви двотрубних секцій після зварювання на трубозаставних базах також піддавалися радіографічному контролю і огляду з метою виявлення внутрішніх дефектів. Контроль якості зварювання після закінчення зварювальних робіт показав, що близько 4000 швів мали ті чи інші дефекти. На пе-



решарування швів потрібні були додаткові витрати, які оцінюються в 30–40 млн. дол. Всього на трубопроводі було зварено близько 106 тис. стиків.

Детектування коливань ґрунту. Для детектування коливань ґрунту на Трансаяскінському нафтопроводі передбачалася спеціальна система, що складається з ряду акселерографів, встановлених на 10 перекачувальних станціях і в диспетчерському центрі в м. Валдез. Чутливість акселерографів становить мінімум 0,001 прискорення сили тяжіння. Зміни коливань ґрунту безперервно реєструються в цифровій формі.

Детектування тепловиділення. Унікальна система, що включає вертоліт «Jet Ranger», телевізійну апаратуру та обладнання для детектування інфрачервоного теплового випромінювання, забезпечувала вимір, реєстрацію та аналіз кількості тепла, що виділяється теплими трубами на наземних ділянках трубопроводу. Вертоліт, пролітаючи над трасою трубопроводу на висоті 30,5 м зі швидкістю 64 км/год, виконував роль повітряного термометра, що вимірює температуру майже 120 тис. труб. Система забезпечувала контроль теплового режиму трубопроводу і теплорегулюючих пристроїв. Комплект з 20 детекторів інфрачервоного випромінювання сканував поле зору об'єктива. Чутливість контрольної-вимірної апаратури становила $\pm 0,5$ °С.

Заповнення нафтопроводу почалося 20 червня 1977 р. Перша нафта поступила в резервуари терміналу Вальдес 1 серпня 1977 р. 3 листопада

2002 р. цей трубопровід витримав випробування при землетрусі магнітудою 7,9 балів в зоні регіонального розлому Деналі. Епіцентр землетрусу розташовувався в 80 км на захід від трубопроводу, але горизонтальні зміщення трубопроводу в зоні розлому досягали 2,5 м, а вертикальні – 1,5 м. Було зруйновано кілька демпферних конструкцій, але сам трубопровід не пошкоджено. При таких зсувах на ділянках довжиною близько 600 м труби розташовуються на рейкових і демпферних 133 конструкціях, що компенсують можливі переміщення ґрунтів землі в горизонтальних (до 6 м) і вертикальних (до 3 м) напрямках.

Одним з основних розробників Трансаяскінського проекту був уродженець Києва Ігорь Павлович Попов (він також брав участь в проектуванні мосту між Сан-Франциско і Оклендом), головним інженером будівництва нафтопроводу був Франк П. Молін.

У 2002 р. Американське товариство по зварюванню оголосило Трансаяскінській трубопровід видатним проектом в зварювальному виробництві. Alyeska Pipeline Service Company була вручена нагорода за реалізацію такої складної конструкції, яка до сих пір є символом інженерної думки. У 2006 р. відбулася перша за 29 років аварія, трубопровід на час ремонтних робіт був закритий. Незважаючи на це, завдяки модернізації та зниження швидкості потоку, передбачається, що нафта зможе текти через трубопровід до 2075 року.

За матеріалами закордонних публікацій.



АТЕСТАЦІЙНИЙ ЦЕНТР З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ при ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

Державне підприємство «Атестаційний центр з неруйнівного контролю при ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» (АЦНК) створено у 1991 р. на базі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України постановою Президії НАН України з метою організації навчання і атестації для подальшої сертифікації фахівців I, II та III рівнів з неруйнівного контролю зварних конструкцій і виробів, згідно з національними, європейськими та міжнародними стандартами та нормами. Центр акредитовано в національній та міжнародній кваліфікаційній системі по навчанню, атестації та сертифікації фахівців по наступним методам неруйнівного контролю:

- візуально-оптичний (VT);
- ультразвуковий (UT);
- радіографічний (RT);
- капілярний (PT);
- магніто-порошковий (MT);
- вихрострумний (ET);
- акустичний (AT);
- контроль герметичності (LT);
- тепловий (TT).

За час свого існування в атестаційному центрі пройшли підготовку близько 10 тис. фахівців (у тому числі й іноземні спеціалісти), надано тисячі послуг з технічного діагностування та неруйнівного контролю об'єктів підвищеної небезпеки.



Практичні заняття



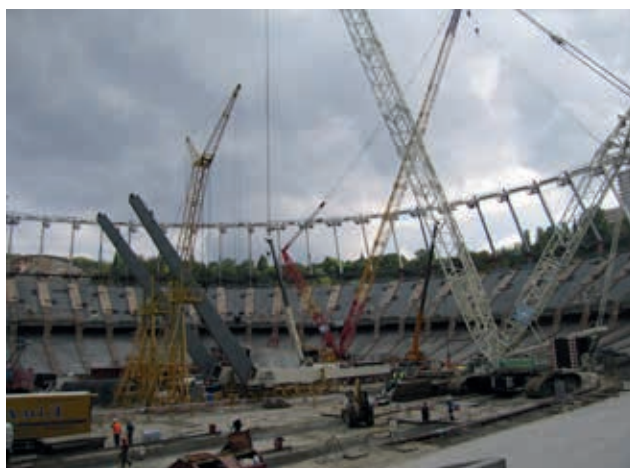
Теоретичні заняття



Навчання по UT



Група слухачів з НК



Республіканський стадіон, де було проведено роботи по неруйнівному контролю



Проведення діагностики зварних з'єднань на Подільському цементному заводі

Іншим напрямком діяльності АЦНК є обстеження методами неруйнівного контролю технічного стану об'єктів підвищеної небезпеки з метою запобігання потенційно аварійним ситуаціям. Центр проводить неруйнівний контроль, технічне діагностування та технічне опосвідчення наступного обладнання:

- метало- та будівельні конструкції;
- парові та водогрійні котли;
- посудини, що працюють під тиском;
- трубопроводи пари та гарячої води;
- вантажопідйомні механізми;
- технологічні трубопроводи та обладнання;
- магістральні трубопроводи;
- резервуари для зберігання нафтопродуктів.

АЦНК займається розробкою технологій для контролю обладнання у відповідності до нових національних стандартів гармонізованих з європейськими та міжнародними, а також розробляє обладнання для неруйнівного контролю.

За багато років своєї діяльності ДП «АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О. Патона» зарекомендувало себе, як надійний та висококваліфікований партнер, клієнтами якого стали найбільші підприємства України.

У своїй діяльності центр дотримується наступних принципів:

- якісне та своєчасне виконання своїх обов'язків перед Замовником;
- збереження єдиних принципів роботи з Замовником незалежно від його статусу;
- збереження конфіденційності інформації;
- оперативне реагування на побажання Замовника;
- чесність та порядність у виконанні своїх обов'язків.

Наші можливості:

- колектив досвідчених та висококваліфікованих викладачів;
- сучасна матеріально-технічна та методична база;
- багаторічний досвід на ринку послуг;
- використання сучасних комп'ютерних технологій для самопідготовки та об'єктивного оцінювання набутих знань;
- гнучкий підхід до побажань Замовника;
- можливість проведення виїзних сесій;
- індивідуальний підхід до кожного.

Тел.: +38 (044) 200-81-83, 200-81-40, 200-81-86
acnk.kiev.ua



Міжгалузевий учбово-атестаційний центр
Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України



Програми професійної підготовки на 2021 р.

Шифр курсу	Найменування програми	Тривалість	Строки проведення
1. Підвищення кваліфікації інженерно-технічних працівників			
101	Підтвердження професійної компетентності координаторів (керівників) зварювальних робіт згідно ДСТУ ISO 14731 «Координація зварювальних робіт. Завдання і функції»	сертифікація	3 тижня (112 г)
102		ресертифікація	24 г
103	Розширення області сертифікації координаторів (керівників) зварювальних робіт		6 г
106	Технічне керівництво зварювальними роботами при ремонті діючих трубопроводів (під тиском)	підготовка і атестація	2 тижня (72 г)
107		переатестація	22 г
109	Технічне керівництво роботами по контактному стиковому зварюванню залізничних рейок.		72 г
111	Підготовка і атестація голів комісій з атестації зварників - експертів Українського атестаційного комітету зварників (УАКЗ)		3 тижня (112 г)
112	Розширення області атестації голів комісій з атестації зварників – експертів УАКЗ (згідно НПАОП 0.00-1.16-96)		8 г
1121	Розширення повноважень експертів УАКЗ на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г
1122	Розширення повноважень експертів УАКЗ на право атестації зварників пластмас згідно ДСТУ EN 13067		72 г
113		фахівців технологічних служб, відповідальних за організацію атестації зварників	2 тижня (72 г)
114	Підготовка і атестація членів комісій по атестації зварників:	фахівців служб технічного контролю, відповідальних за контроль зварних з'єднань (включаючи спеціальну підготовку до атестації по візуально-оптичному методу контролю)	2 тижня (74 г)
115		фахівців служб охорони праці підприємств	2 тижня (74 г)
116	Розширення області атестації членів комісій по атестації зварників – фахівців технологічних служб по зварюванню (згідно НПАОП 0.00-1.16-96)		6 г
117	Розширення повноважень членів комісій по атестації зварників – фахівців технологічних служб по зварюванню на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г
118	Розширення повноважень членів комісій по атестації зварників – фахівців з технічного контролю на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		24 г
119	Підтвердження повноважень (переатестація) голів комісій по атестації зварників - експертів УАКЗ з розширенням повноважень на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 г
120		фахівців технологічних служб по зварюванню з розширенням повноважень на право атестації зварників згідно ДСТУ EN ISO 9606-1	32 г
121	Підтвердження повноважень (переатестація) членів комісій по атестації зварників:	фахівців з технічного контролю	16 г
122		фахівців з технічного контролю (включаючи спец. підготовку до атестації по візуально-оптичному методу контролю)	36 г
123		фахівців з охорони праці	16 г
130		Міжнародний інженер із зварювання	453/ 128 г ¹
132		Міжнародний технолог із зварювання	372/91 г ¹
134		Міжнародний спеціаліст із зварювання	248/60 г ¹
135	Перепідготовка фахівців зварювального виробництва по програмах Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) із присвоєнням кваліфікації:	Міжнародний практик із зварювання	114 г
136		Міжнародний дизайнер (конструктор) із зварювання	40 г
137		повного рівня	230 г
140		стандартного рівня	170 г
139		базового рівня	115 г
149		фахівців, які мають кваліфікацію «Міжнародний інженер / технолог із зварювання»	76/78 г
141	Металографічні дослідження металів і зварних з'єднань	спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (72 г)
142		переатестація	22 г
143	Фізико-механічні випробування матеріалів і зварних з'єднань	спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (72 г)
144		переатестація	20 г
145	Емісійний спектральний аналіз (стилоскопіювання) металів і сплавів	спеціальна підготовка і атестація	2 тижня (74 г)
146		переатестація	22 г
151	Виробництво зварювальних матеріалів: організація, технології і системи управління якістю		2 тижня (72 г)

Тематичні семінари (можливе проведення на території замовника)			
161	Нормативно-технічна документація у зварювальному виробництві, стан і перспективи	2 дні (16 г)	березень, червень
162	Забезпечення якості зварювання. Вимоги національних і міжнародних стандартів	2 дні (16 г)	квітень, червень, жовтень
163	Виготовлення конструкцій із сталі згідно вимог ДСТУ EN 1090	32 г	лютий

2. Підвищення кваліфікації педагогічних працівників системи професійної освіти в галузі зварювання

203	Підвищення кваліфікації майстрів (інструкторів) виробничого навчання із зварювання	110 г	за узгодженням з замовником
204	Підвищення кваліфікації викладачів спеціальних дисциплін професійно-технічних навчальних закладів по напрямку «Зварювання»	70 г	

3. Професійна підготовка, перепідготовка і підвищення кваліфікації кваліфікованих робітників в галузі зварювання і споріднених технологій

(з присвоєнням кваліфікації відповідно до національної і міжнародної кваліфікаційних систем)

Курсова підготовка ЗВАРНИКІВ:

301	ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	9 тижнів (356 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
302	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	5 тижнів (192 г)	
304	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) (з присвоєнням національної і міжнародної кваліфікації)	7 тижнів (276 г)	
306	автоматичного дугового зварювання під флюсом / в захисних газах	3 тижня (112 г)	
308	контактного (пресового) зварювання (рейок, промислових трубопроводів)	3 тижня (112 г)	
309	пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) з атестацією відповідно до ДСТУ EN 13067	5 тижнів (196 г)	

Підготовка зварників по програмах Міжнародного інституту зварювання із присвоєнням кваліфікації:

310	Міжнародний зварник кутових швів (IFW) з атестацією по EN ISO 9606-1	130 – 210 г ²	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
312	Міжнародний зварник плоских з'єднань (IPW) з атестацією по EN ISO 9606-1	250 – 380 г ²	
315	Міжнародний зварник труб (ITW) з атестацією по EN ISO 9606-1	360 - 510 г ²	
318	Міжнародний практик-зварник (IWP) з атестацією по EN ISO 9606-1	35 - 153 г ²	

Перепідготовка ЗВАРНИКІВ із присвоєнням кваліфікації «Міжнародний зварник»: (IFW, IPW, ITW)

321	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 - 112 г ²	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
322	перепідготовка зварників механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	76 - 118 г ²	
323	перепідготовка зварників ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG) з атестацією по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 - 78 г ²	

Підвищення кваліфікації ЗВАРНИКІВ:

330	ручного дугового зварювання покритими електродами	2 тижня (72 г)	постійно, (індивідуальна підготовка за модульною технологією)
331	ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах	2 тижня (72 г)	
333	механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG)	2 тижня (72 г)	
334	механізованого дугового зварювання порошковим дротом	2 тижня (72 г)	
335	автоматичного дугового зварювання під флюсом / в захисних газах	2 тижня (72 г)	за узгодженням з замовником
336	електрошлакового зварювання	2 тижня (72 г)	

Курсова підготовка контролерів неруйнівного контролю:

343	Спеціалізація – візуально-оптичний контроль	72/196 г ³	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
344	Спеціалізація – радіографічний контроль	72/196 г ³	
345	Спеціалізація – ультразвуковий контроль	72/196 г ³	
346	Спеціалізація – магнітопорошковий контроль	72/196 г ³	
347	Спеціалізація – капілярний контроль	72/196 г ³	

4. Атестація персоналу зварювального виробництва

400	Атестація координаторів (керівників) зварювальних робіт відповідно до ДСТУ ISO 14731	8 г	проводиться по закінченні курсів 101-109
401	Спеціальна підготовка і атестація зварників відповідно до НПАОП 0.00-1.16-96 і стандартів ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732	72 г	постійно
402	Додаткова і позачергова атестація зварників згідно з НПАОП 0.00-1.16-96	24 г	
403	Періодична атестація зварників відповідно до НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5	32 г	
405	Спеціальна підготовка і атестація зварників авіаційної промисловості відповідно до ДСТУ ISO 24394	72 г	

406, 457	Періодична атестація зварників відповідно до міжнародного (європейського) стандарту EN ISO 9606-1	24 г	постійно	
407	Спеціальна підготовка і атестація операторів автоматичного зварювання плавленням відповідно до стандарту ДСТУ ISO 14732	2 тижня (72 г)		
411	Спеціальна підготовка і атестація зварників на допуск до виконання зварювальних робіт при ремонті діючих магістральних трубопроводів (під тиском)	3 тижня (112 г)	за узгодженням з замовником	
412	Періодична атестація зварників на допуск до виконання зварювальних робіт при ремонті діючих магістральних трубопроводів (під тиском)	32 г		
413	Спеціальна підготовка і атестація операторів-зварників контактної-стикового зварювання рейок відповідно до ДСТУ ISO 14732 і СОУ 35.2-00017584-030-1:2009	2 тижня (72 г)	проводиться по закінченню курсу 308	
414	Атестація зварників пластмас відповідно до ДСТУ EN 13067 (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб)		проводиться по закінченні курсу 309	
415	Періодична атестація зварників пластмас (зварювання трубопроводів з поліетиленових труб) відповідно до ДСТУ EN 13067	32 г	щокварталу	
421	Спеціальна підготовка дефектоскопістів до сертифікації згідно ДСТУ EN 9712	ультразвуковий контроль	32/36 / 64 (I рів) г ⁴	індивідуальна підготовка за узгодженням з замовником
423			40/48 / 72/80 / 144 (II рів) г ⁴	
427		радіографічний контроль	36/40 72 (I рів) г ⁴	
430			40/48 / 76/80 / 152 (II рів) г ⁴	
433		візуально-оптичний контроль	16/20 / 30 (I рів) г ⁴	
436			20/24 / 35/40 / 70 (II рів) г ⁴	
448	Переатестація операторів-зварників контактної-стикового зварювання рейок відповідно до вимог ДСТУ ISO 14732 і СОУ 35.2-00017584-030-1:2009	32 г	лютий	

5. Тренінги, тестування і підтвердження кваліфікації

501	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників механізованого дугового зварювання плавким електродом в захисних газах (MIG/MAG)	4 – 12 г ⁵	за узгодженням з замовником
502	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників ручного дугового зварювання неплавким металевим електродом в інертних газах (TIG)	4 – 12 г ⁵	
503	Професійне тестування і підтвердження кваліфікації зварників ручного дугового зварювання покритими електродами (MMA)	4 – 16 г ⁵	
512	Практичні тренінги з різних способів зварювання	8 – 32 г ⁵	

¹ - Тривалість навчання визначається залежно від базової професійної підготовки і досвіду роботи у зварювальному виробництві.

² - Тривалість навчання залежить від спеціалізації.

³ - Тривалість програми визначається за результатами вхідного тестування.

⁴ - Тривалість навчання вказується в направленні ОСП (орган по сертифікації персоналу).

⁵ - Тривалість програми залежить від умов і характеру випробувань.

- За узгодженням із Замовниками можливе проведення навчання по інших програмах, що не ввійшли в даний перелік.
- На період навчання слухачам надається житло з оплатою за готівку.
- Вартість навчання визначається при укладанні договору.
- Для прийому на навчання необхідно направити заявку із зазначенням шифру курсу, кількості фахівців і поштових реквізитів підприємства.

Україна, 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 56 Тел. (044) 294-61-65; 294-61-67, 200-82-80, 200-81-09,
E-mail: paton_muac@ukr.net, http://muac.kpi.ua



ПЕРЕДПЛАТА 2021

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	пів року	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	240	720	1440	2880
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	240	480	960
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	240	480	960
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	520	1560	3120	6240

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

**«The Paton Welding Journal» – переклад журналу «Автоматичне зварювання» на англійську мову.

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2020 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2018 рр.



Журнал «**Автоматичне зварювання**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень за напрямками: матеріалознавство та металургія зварювання, наплавлення та інших споріднених технологій; технології та матеріали для зварювання конструкційних матеріалів; виробництво зварних метало конструкцій для різних галузей промисловості; відновлювальний ремонт для подовження ресурсу зварних конструкцій і вузлів; проблеми міцності, конструювання та оптимізації зварних конструкцій; технології 3D друку, які базуються на зварювальних процесах; гібридні технології зварювання. В журналі публікується також інформація про нові зварювальні матеріали, джерела живлення та технології; звіти про виставки, конференції та семінари, анонси нових книг та винаходів, новини від відомих компаній та інше.



Журнал «**Сучасна електрометалургія**» є міжнародним науково-теоретичним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень у сферах: металургія чорних і кольорових металів та сплавів; спеціальна електрометалургія (електрошлакова, електронно-променева, плазмова- та вакуумно-дугова технології); нові матеріали; енерго- і ресурсозбереження; матеріалознавство, 3D технології у спеціальній електрометалургії. Публікується також допоміжна інформація з тематики журналу.



Журнал «**Технічна діагностика та неруйнівний контроль**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень з діагностики матеріалів і конструкцій та методи неруйнівного контролю для оцінки стану матеріалів і конструкцій; теорія, методи і засоби технічної діагностики. Розміщуються матеріали з моніторингу конструкцій та подовження ресурсу та працездатності засобами НК. Публікується супутня інформація з тематики журналу, а також інформація про події та новини в Українському товаристві НК та ТД.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм.

Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм.

А5 – 185x130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥК, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

Ціна договірна. Передбачена система знижок. Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі. Публікується тільки профільна реклама з тематики журналів. Відносно вартості, знижок та термінів публікації прохання звертатися у видавництво.

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
 Тел./факс: 38044 200-82-77
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>