

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

ПРИСВЯЧЕНО 130-РІЧЧЮ ЗАСНУВАННЯ НАЦІОНАЛЬНОГО  
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ»

**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ**  
**«ХПІ»**

*Серія: Електроенергетика та перетворювальна тех-  
ніка*

№ 19(1128)2015

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2015

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ» – 2015. – №19 (1128). – 169с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською , російською та англійською мовами.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових Фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. №1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України №6, 2010 р., стор. 3, №20).*

### **Координаційна рада:**

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; С. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Спіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф., Ю. В. Тимофіїв, д-р техн. наук, проф., М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

### **Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** І. Г. Хорошайло

**Члени редколегії:** Є. І. Сокол, член кор. НАН Укр, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; Б. В. Клименко, д-р техн. наук, проф.; В. В. Воїнов, канд. техн. наук, доц.; В. Ф. Болюх, д-р техн. наук, проф.; А. Г. Гурин, д-р техн. наук, проф.; С. М. Глоба, канд. техн. наук, доц.; К. Л. Ноздрачова, канд. техн. наук, доц.; Христо Радев, д-р техн. наук, проф.-завідувач кафедри Софійського ТУ(Болгарія)

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Електроенергетика та перетворювальна техніка», включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich'sPeriodicalsDirectory (NewJersey, USA).*

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 7 від 3 липня 2015 р.

**Й. І. СТЕНЦЕЛЬ**, д-р. техн. наук, проф. СНУ ім. В. Даля,  
Северодонецьк;

**О. І. ПРОКАЗА**, канд. техн. наук, доц. СНУ ім. В. Даля,  
Северодонецьк;

**А. В. РЯБІЧЕНКО**, канд. техн. наук, с.н.с. СНУ ім. В. Даля,  
Северодонецьк;

**Л. І. ПЕТРОСЯН**, лікар-кардіолог багатoproфiльної лікарні,  
Северодонецьк.

## **ДІАГНОСТИКА ЗАХВОРЮВАННЯ ЛЮДИНИ ЗА ХАРАКТЕРОМ ЗМІНИ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Досліджуються термодинамічні процеси в біологічному організмі при захворюваннях, котрі супроводжуються екзотермічними чи ендотермічними змінами теплової енергії. Показано, що такі процеси можна описати на основі теорії реологічних перетворень теплової енергії. Приведена узагальнена нелінійна математична модель термодинамічних процесів в організмі людини, а також можливі початкові та граничні умови, при котрих можна отримати аналітичне рішення для розподілення температурного поля. У результат

ті теоретичних та експериментальних досліджень показано, що характер зміни температурного поля залежить від вікового стану людини.

**Ключові слова:** температура, людина, процес, метод, хвороба, організм, реологія, рівняння, енергія.

**Вступ.** Термодинамічні процеси протікають в кожному біологічному організмі, в тому числі й людському, і характеризують стан його здоров'я. Тому температурні зміни в організмі в цілому або його окремих частинах є одним з основних показників, котрий широко використовується в медицині. За нормовану номінальну температуру людського організму прийнята температура  $36,6^{\circ}\text{C}$  [1]. У загальному номінальна температура є індивідуальною для кожної людини і може змінюватися від  $36,2^{\circ}\text{C}$  до  $36,7^{\circ}\text{C}$ . Підвищення температури тіла людини до  $37^{\circ}\text{C}$  і вище у клінічній практиці кваліфікується як початок захворювання, яке провокується тією чи іншою причиною. Тому підвищення температури людського організму вище  $37^{\circ}\text{C}$  є першою діагностичною ознакою його захворювання.

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** Як показано в [2] для кожного виду захворювання є свої індивідуальні характерні термодинамічні зміни, за котрими виноситься попередній діагноз щодо типу захворювання.

Кінцевий діагноз ставиться після лабораторного аналізу, наприклад, крові та інших характерних складових організму. Особливо складними з діагностичної точки зору є процеси захворювання, котрі супроводжуються одночасною дією на організм різних видів хвороб або одночасним захворюванням декількох органів різними хворобами. Як правило, діапазон зміни температур хворої людини в залежності від типу захворювання може коливатися від 34 °С до 42 °С. Як вказується в науковій літературі [1, 3], температура тіла людини на протязі доби є нестабільною і може змінюватися в широких межах. Основним джерелом теплової енергії кожного біологічного організму є біохімічні процеси, які проходять в шлунково-кишковій системі. Але при захворюванні появляються нові джерела, котрі є наслідком запальних процесів окремих органів. Якраз ті процеси, котрі викликають захворювання, створюють екзотермічний (коли температура тіла зростає), ендотермічний (коли температура тіла спадає) або суміщений ефект, котрий викликає коливальний температурний процес. Зміна температури за коливальним процесом може бути обумовлена шляхом уведення в організм лікувальних препаратів. При цьому термодинамічний процес (ТДП) може бути коливальним або колиально-загасаючим. Як правило, при захворюванні має місце накладання температури тіла, котра створюється основним джерелом тепла та хворого органу. Так як у багатьох випадках тепла енергія основного та додаткового джерел змінюється з різною амплітудою та фазою, то при їх накладанні можуть створюватися термодинамічні поля різної форми, як показано в [4]. Особливе значення для діагностики стану здоров'я людини є вивчення термодинамічних змін як здорового, так і хворого організму, характеру ТДП при захворюванні та в процесі протікання хвороби, а також частотних характеристик таких процесів, враховуючи те, що частотні зміни можуть визначати характер дії того чи іншого впливового фактора. Таким чином, розробка методів діагностування термодинамічного стану людського організму за динамічними змінами температурного поля тіла є важливою науковою задачею.

**Мета статті та постановка проблеми.** Метою статті є дослідження термодинамічних характеристик процесів захворювання та видужування людського організму на основі принципів реологічних перетворень і методу нульового градієнта. ТДП захворювання є інерційним без запізнення або з наявністю інкубаційного періоду (з запізненням). Температура захворювання є наслідком стоку теплової енергії, котра створюється організмом від додаткових джерел. Так як людському організму притаманні захисні властивості, то підвищення температури тіла почнеться тільки після того, коли тепла енергія додат-

кового джерела перевищить деякий умовний рівень  $E_{T_0} = M\theta c_p \Delta T$ , де  $M$  - маса людини;  $\theta$  - час перебування (кровообігу);  $c_p$  - питома теплоємність тіла;  $\Delta T = T_{H_{\max}} - T_{H_0}$ ,  $T_{H_{\max}} \approx 37,0^{\circ}C$  - максимально допустима нормальна температура;  $T_{H_0} \approx 36,6^{\circ}C$  - номінальна стандартна температура здорової людини. Якщо енергія додаткового джерела  $E_{\phi}$  стає більшою енергії  $E_{T_0}$ , то починається відчуття підвищення температури за рахунок слабості, не характерного потовиділення, зміни кольору шкіряного покриву тощо. Так як підвищення температури є інерційним процесом, то швидкість її зміни після інкубаційного періоду може різко зростати. Одночасно зростатиме й протидіюча енергія організму, яку можна визначити за наступною формулою

$$E_{TL} = k_{C3} M \theta c_p (T_E - T_{H_0}), \quad (1)$$

де  $k_{C3}$  - коефіцієнт стану здоров'я людини;  $T_E$  - поточна температура хворої людини.

При такому підході до процесу захворювання енергія  $E_{TL}$  створює в людському організмі своєрідний зворотний зв'язок, що може привести до різного характеру протікання ТДП: видужування – температура починає зменшуватися; стабілізації процесу протікання хвороби – температура підвищилася до деякого максимального значення і стабілізувалася; коливального процесу, коли температура на протязі доби змінюється з однаковою амплітудою й частотою; коливально-загасаючого процесу тощо. У клінічній практиці спостерігаються й інші форми протікання процесу захворювання, наприклад, описані в [1], коли має місце накладання частоти власних коливань температурних змін людини з частотою власних коливань температурних змін хворого органу. Основними задачами роботи є описання ТДП, котрі протікають у людському організмі при його захворюванні на основі теорії реологічних переходів та методу нульового градієнта, отримання математичних моделей зміни температурного поля людини в аналітичній формі, а також їх дослідження.

**Математичні моделі реологічних переходів термодинамічного поля в людському організмі.** Розглянемо задачу, коли основне та додаткове джерело теплової енергії працюють автономно. Тоді рівняння реологічного перенесення теплової енергії цього джерела можна описати наступним диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)}{\partial \theta_{\theta}} = -aLV_{\Pi} \frac{\partial^2 E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)}{\partial V^2} - \bar{v}_{\theta} S_{\theta} \frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)}{\partial V} + \gamma_{\theta E}(t), \quad (1)$$

де  $E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)$  - кількість теплової енергії, яка передається від додаткового джерела в об'єм  $V$  за час  $\theta_{\theta}$ ,  $a = \lambda / c_p \rho$  - температуропровідність біологічного матеріалу;  $L$  - довжина шляху перенесення теплової енергії;  $V_{\Pi}$  - об'єм перебування теплової енергії;  $\bar{v}_{\theta}$  - середня швидкість перенесення конвекційної складової теплової енергії від хворого органу;  $S_{\theta}$  - площа перенесення теплової енергії від хворого органу;  $\gamma_{\theta E}(t)$  - швидкість стоку теплової енергії від хворого органу за час  $t$ .

У першому наближенні приймемо, що перенесення теплової енергії є двоступеневим, тобто від додаткового джерела до поверхні хворого органу, а далі від цієї поверхні до рідинного потоку (наприклад, крові). Тоді для швидкості стоку теплової енергії  $E_{\theta C}(t)$  маємо:

$$\gamma_{\theta E}(t) = K_C \left[ \tau_{2\theta C}^2 \frac{d^3 E_{\theta}(t)}{dt^3} + \tau_{1\theta C} \frac{d^2 E_{\theta}(t)}{dt^2} + \frac{dE_{\theta}(t)}{dt} \right], \quad (2)$$

де  $K_C$  - коефіцієнт стоку теплової енергії від ураженого органа;  $\tau_{1\theta C}, \tau_{2\theta C}$  - сталі часу перенесення теплової енергії від цього органу за рахунок стоку.

Підставивши (2) у рівняння (1), отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)}{\partial \theta_{\theta}} + aLV_{\Pi} \frac{\partial^2 E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)}{\partial V^2} + \bar{v}_{\theta} S_{\theta} \frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)}{\partial V} = \\ = K_C \left[ \tau_{2\theta C}^2 \frac{d^3 E_{\theta C}(t)}{dt^3} + \tau_{1\theta C} \frac{d^2 E_{\theta C}(t)}{dt^2} + \frac{dE_{\theta C}(t)}{dt} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Рівняння (3) справедливе для випадку, коли хворий орган характеризується сталим об'ємом і постійністю створеної теплової енергії (до таких недугів можна віднести стаціонарні (хронічні) або квазістаціонарні захворювання окремих органів людини). У разі інших захворюваннях (наприклад, грипозного характеру, пневмонії, лихорадці тощо) спостерігається збільшення об'єму ураженого органу, площі теплообміну, а також кількості теплової енергії, що є предметом подальших досліджень.

Процес перенесення теплової енергії від ураженого органу до всього організму може мати різну форму. Так, наприклад, при локаль-

ному запальному процесі має місце перенесення теплової енергії за рахунок теплопровідності. Тоді рівняння (3) спрощується до наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)}{\partial \theta_{\theta}} + D_T \frac{\partial^2 E_{\theta}(\theta_{\theta}, V)}{\partial V^2} = \\ = K_C \left[ \tau_{2\theta c}^2 \frac{d^3 E_{\theta c}(t)}{dt^3} + \tau_{1\theta c} \frac{d^2 E_{\theta c}(t)}{dt^2} + \frac{dE_{\theta c}(t)}{dt} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

де  $D_T$  - коефіцієнт термодифузії.

Якщо об'єм  $V$  ураження є функцією часу  $\theta_{\theta}$ , то рівняння (3) ускладнюється, так як у цьому разі потрібно знати характер цієї функції. Залежність  $V = f(\theta)$ , як правило є характерною для кожного захворювання і визначається за результатами клінічних спостережень за змінами температури ураженого органу. Попередні дослідження показують, що при діагностуванні стану здоров'я людини залежність  $V = f(\theta)$  може описуватися наступними рівняннями регресії: 1 – лінійної; 2 – параболічної та трансцендентної. При лінійній зміні ураженого об'єму від часу захворювання, приймаючи, що  $\partial V = k_V \partial \theta_{\theta}$ , де  $k_V$  - коефіцієнт, рівняння (3) набуває такої форми

$$\tau_{\theta} \frac{\partial^2 E_{\theta}(\theta_{\theta})}{\partial \theta_{\theta}^2} + \frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta})}{\partial \theta} = K_C \left[ \tau_{2\theta c}^2 \frac{d^3 E_{\theta c}(t)}{dt^3} + \tau_{1\theta c} \frac{d^2 E_{\theta c}(t)}{dt^2} + \frac{dE_{\theta c}(t)}{dt} \right], \quad (5)$$

де  $\tau_{\theta} = aLV_{\theta\Pi} / (k_V + \bar{v}_{\theta} S_{\theta})$  - стала часу перенесення теплової енергії від додаткового джерела.

Рівняння (5) формально є нелінійним, якщо рахувати, що  $\theta$  і  $t$  є різним часом процесу перенесення теплової енергії. Так як на границі перенесення тепла від додаткового джерела до організму похідні  $\frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta})}{\partial \theta} = \frac{dE_{\theta c}(t)}{dt} = 0$ , то згідно з методом нульового градієнта [5] рівняння (5) розділяється на наступну систему простих диференціальних рівнянь:

$$\tau_{\theta} \frac{\partial^2 E_{\theta}(\theta_{\theta})}{\partial \theta_{\theta}^2} + \frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta})}{\partial \theta} = 0; \quad (6)$$

$$\tau_{2\partial c}^2 \frac{d^3 E_{\partial c}(t)}{dt^3} + \tau_{1\partial c} \frac{d^2 E_{\partial c}(t)}{dt^2} + \frac{dE_{\partial c}(t)}{dt} = 0. \quad (7)$$

Враховуючи, що швидкості перенесення теплової енергії та стоку є постійними, рівняння (6) і (7) приймають наступну форму:

$$\tau_{\theta} \frac{\partial E_{\theta}(\theta_{\theta})}{\partial \theta_{\theta}} + E_{\theta}(\theta_{\theta}) = k_{\Pi} E_{\partial 0}; \quad (8)$$

$$\tau_{2\partial c}^2 \frac{d^2 E_{\partial c}(t)}{dt^2} + \tau_{1\partial c} \frac{dE_{\partial c}(t)}{dt} + E_{\partial c}(t) = k_C E_{\theta}(\theta_{\theta}), \quad (9)$$

де  $k_{\Pi}$  і  $k_C$  - коефіцієнти перенесення і стоку теплової енергії відповідно;  $E_{\partial 0}$  - тепла енергія, яка створюється в ураженому органі за рахунок біохімічних процесів.

Як відомо [1-4], людському організму притаманні захисні функції, котрі проявляються на початку дії зовнішніх чи внутрішніх подразників, а фактично виконують роль своєрідного компенсатора. Виходячи зі сказаного, людський організм у процесі захворювання являє собою розімкнену систему регулювання за збуренням, структурна схема якої показана на рис. 1, де *ОЛ* - організм людини; *ХО* – уражений (хворий) орган; *БК* - біокомпенсатор. На деякий орган *ХО* діють збуджуючі фактори (наприклад, бактерії), котрі призводять до створення додаткової теплової енергії  $E_{\theta}(\theta_{\theta})$ . Частина останньої у формі стоку  $E_{2\theta}(t)$  додається до номінальної енергії організму людини *ОЛ*, а частина цієї енергії  $E_{1\theta}(t)$  – на біокомпенсатор *БК*. Якщо компенсуюча енергія  $E_K(t) = E_{2\theta}(t)$ , то впливу теплової енергії на загальну енергію тіла людини не буде, тобто  $E_0(t) = E_C(t)$ , а значить не буде підвищуватися температура організму.

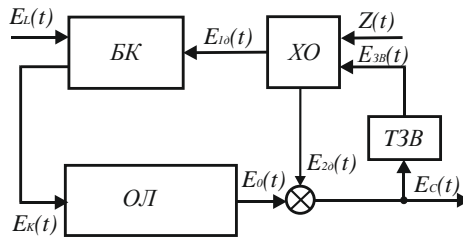


Рис. 1 - Структурна схема термодинамічних процесів хворої людини



При  $E_{2\theta}(t) > E_K(t)$  кількість теплової енергії  $E_C(t)$  стане більшою відносно номінальної енергії  $E_0(t)$  тіла, що приведе до підвищення температури. Так як уражений орган є складовою людського організму, то підвищення його температури автоматично призводить до появи температурного зворотного зв'язку (ТЗВ). Цей зв'язок може мати як позитивний, так і негативний вплив на процес захворювання людини. Так, при ГРЗ (гостре респіраторне захворювання), грипозному та деяких інших захворювання, цей ТЗВ приводить до послаблення дії бактерій, а відповідно, до стабілізації хвороби. Наприклад, при таких захворюваннях лікарі не рекомендують використовувати жарознижуючі засоби при підвищенні температури організму до  $38^\circ\text{C}$ . При інших захворюваннях, наприклад, пневмонії, туберкульозі тощо ТЗВ може привести до значного підвищення температури. У цьому випадку рекомендується вживати одночасно різні лікувальні засоби, включаючи й жарознижуючі. Останні в організмі людини створюють енергію  $E_L(t)$ , яка підсилює роль компенсатора БК.

**Термодинамічні моделі процесу захворювання людини.** При вищерозглянутому структурному підході до протікання ТДП захворювання швидкість зміни енергії  $E_0(\theta)$  в організмі людини, яка створює температуру  $T(\theta)$ , можна описати таким диференціальним рівнянням [6-8]:

$$\tau_n^n \frac{\partial^n T(\theta)}{\partial \theta^n} + \dots + \tau_i^i \frac{\partial^i T(\theta)}{\partial \theta^i} + \dots + \tau_2^2 \frac{\partial^2 T(\theta)}{\partial \theta^2} + \tau_1 \frac{\partial T(\theta)}{\partial \theta} = k_z Z(\theta), \quad (10)$$

де  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$  - сталі часу;  $\gamma_c$  - швидкість стоку теплової енергії з організму.

Якщо ліву частину рівняння (10) замінити квадратурами [6] зі сталими часу  $\tau_1 = \tau_{1j}$  і  $\tau_2^2 = \tau_{2j}^{2j}$ , де  $j$  - номер квадратури, а також приймаючи, що швидкість стоку описується рівнянням (2), то отримуємо:

$$\tau_2^2 \frac{\partial^3 T^{(1/j)}(\theta)}{\partial \theta^3} + \tau_1 \frac{\partial^2 T^{(1/j)}(\theta)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial T^{(1/j)}(\theta)}{\partial \theta} = k_z \frac{Z(\theta)}{\partial \theta}, \quad (11)$$

де  $Z(\theta)$  - збудники, котрі створюють теплову енергію за час  $\theta$ ;  $\tau_{1c}$ ,  $\tau_{2c}$  - сталі часу стоку;  $k_z$  - коефіцієнт перетворення дії збудника в теплову енергію.

Теплова енергія, яка характеризується температурою  $T^j(\theta)$ , від ураженого органа передається людському організму. Як правило, такий процес є двостадійним і може бути описаний наступним рівнянням:

$$\tau_{2zc}^2 \frac{d^2 T_{zc}(t)}{dt^2} + \tau_{1zc} \frac{dT_{zc}(t)}{dt} + T_{zc}(t) = k_{cz} T(\theta), \quad (12)$$

де  $T_x(t)$  - температура стоку теплової енергії від ураженого органу;  $\tau_{1zc}$ ,  $\tau_{2zc}$  - сталі часу стоку;  $k_{cz}$  - коефіцієнт передачі.

Якщо швидкість впливу збудника є сталою, то рівняння (11) приводиться до вигляду:

$$\tau_2^2 \frac{\partial^2 T^{(1/j)}(\theta)}{\partial \theta^2} + \tau_1 \frac{\partial T^{(1/j)}(\theta)}{\partial \theta} + T^{(1/j)}(\theta) = k_z Z_0. \quad (13)$$

Як правило, стік теплової енергії з організму є аперіодичною функцією, та при відповідних початкових умовах рішенням рівняння (12) буде:

$$T_{zc}(t) = k_{cz} T(\theta) \left[ 1 - \frac{p_{2c}}{p_{2c} - p_{1c}} \exp(p_{1c}t) + \frac{p_{1c}}{p_{2c} - p_{1c}} \exp(p_{2c}t) \right], \quad (14)$$

де  $p_{1c,2c} = -(\tau_{1zc} / 2\tau_{2zc}^2) \pm \sqrt{(\tau_{1zc} / 2\tau_{2zc}^2)^2 - (1/\tau_{2zc}^2)}$  - корені характеристичного рівняння.

Рівняння (13) може описувати як аперіодичний так і коливальний процес. Якщо перенесення тепла від ураженого органу є аперіодичним, то  $\tau_1 / \tau_2 > 2$  і його рішенням буде:

$$T_{II}^{(1/j)}(\theta) = k_z Z_0 \left[ 1 - \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(p_1\theta) + \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(p_2\theta) \right], \quad (15)$$

де  $p_{1,2} = -\tau_1 / 2\tau_2^2 \pm \sqrt{(\tau_1 / 2\tau_2^2)^2 - (1/\tau_2^2)}$  - корені характеристичного рівняння.

Якщо процес перенесення тепла є коливальним, наприклад, при лихоманці [1], то рівняння (13) матиме наступне рішення:

$$T_K^{(1/j)}(\theta) = k_z Z_0 \left\{ 1 - \exp(\alpha\theta) \left[ \cos(\omega_0\theta) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0\theta) \right] \right\}, \quad (16)$$

де  $\alpha = -\tau_1 / 2\tau_2^2$  - ступінь загасання коливального перехідного процесу;

$\omega_0 = \sqrt{\left(1/\tau_2^2\right) - \left(\tau_1/2\tau_2^2\right)^2}$  - частота власних коливань.

Рівняння (15) і (16) запишемо таким чином:

$$T_{\Pi}(\theta) = (k_z Z_0)^j \left[ 1 - \frac{P_2}{P_2 - P_1} \exp(p_1 \theta) + \frac{P_1}{P_2 - P_1} \exp(p_2 \theta) \right]^j; \quad (17)$$

$$T_K(\theta) = (k_z Z_0)^j \left\{ 1 - \exp(\alpha \theta) \left[ \cos(\omega_0 \theta) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0 \theta) \right] \right\}^j. \quad (18)$$

Підставивши (17) і (18) у рівняння (14) отримуємо термодинамічні моделі для різних видів захворювань та вікового стану  $j$  людського організму. Термодинамічні криві для чотирьох вікових категорій (ВК) людини при грипозному захворюванні, котре супроводжується плавним підвищенням температури та характеризується інкубаційним періодом  $t_{\text{инк}}$ , показані на рис. 2, а та описуються наступним рівнянням:

$$T_{zc}(t) = k_{zc} (k_z Z_0)^j \left[ 1 - \frac{P_2}{P_2 - P_1} \exp(p_1 \theta) + \frac{P_1}{P_2 - P_1} \exp(p_2 \theta) \right]^j * \left[ 1 - \frac{P_{2c}}{P_{2c} - P_{1c}} \exp(p_{1c} t) + \frac{P_{1c}}{P_{2c} - P_{1c}} \exp(p_{2c} t) \right]. \quad (19)$$

Інкубаційний період найменший для четвертої ВК, який може тривати до однієї доби й менше, а найбільший – для першої. З цього можна зробити висновок, що при ураженні організму людини першої та четвертої ВК однаковою об'ємною долею бактерій грипу, за рахунок більш швидкого виявлення підвищення температури тіла людини четвертої ВК захворювання можна локалізувати раніше, ніж для першої. Так як для першої ВК за інкубаційний період накопичується в організмі значно більша об'ємна доля бактерій, ніж для четвертої, та спостерігається зменшення захисних властивостей організму, максимум термодинамічної кривої зміщається вправо, що свідчить про затягування в дітей хвороби. Але при дії на останню лікувальними засобами швидкість видужування є більшою.

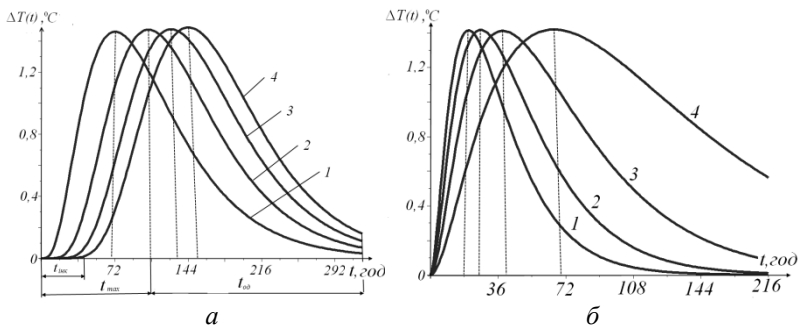


Рис. 2 - Температурні криві захворювання людини: *а* – при гриповому захворюванні; *б* – при ГРЗ

На рис. 2, *б* приведені термодинамічні криві для чотирьох ВК людського організму при ГРЗ. На підставі клінічних і теоретичних досліджень такий процес можна описати наступним рівнянням:

$$T_{zc}(t) = k_{cz} (k_z Z_0)^j \left( \frac{p_2}{p_2 - p_1} \right)^j \left[ \exp(p_1 \theta) + \frac{p_1}{p_2} \exp(p_2 \theta) \right]^j * \left[ 1 - \frac{p_{2c}}{p_{2c} - p_{1c}} \exp(p_{1c} t) + \frac{p_{1c}}{p_{2c} - p_{1c}} \exp(p_{2c} t) \right]. \quad (20)$$

З рис. 2, *б* видно, що при такому захворюванні практично немає інкубаційного періоду для всіх ВК. Найбільш вразливою є перша ВК, а до найменш вразливої групи відноситься четверта. Якщо для першої ВК характерне достатньо швидке видужування, то для четвертої процес видужування є тривалим. У клінічній практиці спостерігаються захворювання, котрі супроводжуються коливальними змінами температури людського організму. До таких захворювань відносяться хвороби серцево-судинної, шлунково-кишкової системи та багато інших. Такі хвороби умовно можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться захворювання, при яких термодинамічний процес ураженого органу має достатньо слабкий коливально-загасаючий характер (рис. 3, *а*), а до другої – захворювання, при котрих цей процес має коливальний характер з постійною амплітудою та частотою (рис. 3, *б*).

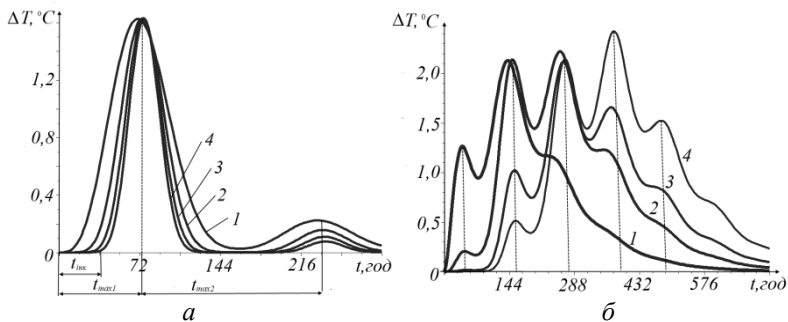


Рис. 3. Температурні криві захворювання людини:  
 а – при шлунково-кишковому розладі; б – при пневмонії

Найбільш складними є захворювання другої групи, так як у цьому випадку спостерігаються суттєвий вплив накладання термодинамічних змін ураженого органа на ТДП організму, як показано в [1]. Для першої групи захворювання може мати місце як інкубаційний період (наприклад, при захворюванні серцевої системи), так і одночасність досягнення максимуму температури не залежно від ВК людини. Сам процес протікання хвороби є достатньо тривалим, так як при цьому можуть спостерігатися хвилеподібні зміни температури тіла.

Такий ТДП можна описати наступним рівнянням:

$$T_{zc}(t) = k_{cz} (k_z Z_0)^j \left\{ 1 - \exp(\alpha\theta) \left[ \cos(\omega_0\theta) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0\theta) \right] \right\}^j * \left[ 1 - \frac{p_{2c}}{p_{2c} - p_{1c}} \exp(p_{1c}t) + \frac{p_{1c}}{p_{2c} - p_{1c}} \exp(p_{2c}t) \right]. \quad (21)$$

Щодо другої групи коливальних змін ТДП в організмі людини, то вони потребують значно глибшого вивчення результатів клінічних спостережень, так як кожна ВК людини має свої індивідуальні властивості. Теоретично такі захворювання коливального типу можна описати такою математичною моделлю:

$$T_{zc}(t) = k_{cz} (k_z Z_0)^j \left\{ 1 - \exp(\alpha\theta) \left[ 1 + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0\theta) \right] \right\}^j * \left[ 1 - \frac{p_{2c}}{p_{2c} - p_{1c}} \exp(p_{1c}t) + \frac{p_{1c}}{p_{2c} - p_{1c}} \exp(p_{2c}t) \right]. \quad (22)$$

На рис. 3, б виділені деякі характерні області термодинамічних кривих (показані пунктирними лініями) котрі відповідним чином визначають характерні риси процесу захворювання, тривалості хвороби та видужування. Як показують експериментальні дослідження, як правило, тривалість захворювань коливального характеру є значною навіть у тих випадках, коли технологія лікування приймається за оптимальну.

**Висновки.** Виконані експериментальні та теоретичні дослідження ТДП людського організму в процесі його захворювання та протікання хвороби. Показано, що інкубаційний період залежить від типу хвороби: при грипозному захворювання цей період є характерним для всіх ВК людини, а при ГРЗ – він є практично відсутнім. Запропонована структурна схема протікання захворювання людини, яке супроводжується ТДП. Запропоновано процес захворювання представляти розімкненою системою управління термодинамічним режимом хворої людини з позитивним зворотним зв'язком за температурою організму людини. Це дозволяє оцінити процес захворювання і попередити можливість появи критично високих температур в організмі. Показано, що ТДП при протіканні хвороби можуть бути аперіодичного, коливально-загасаючого та коливального характеру. Час досягнення максимального підвищення температури тіла є найменшою для людей середнього та старшого віку, а інкубаційний період для них є мінімальним. При ГРЗ інкубаційний період відсутній практично для всіх ВК людини. Таке захворювання найбільш легко переносять діти, а тривалість захворювання є мінімальною. Найбільш вразливі до ГРЗ є люди середнього та старшого віку. До найбільш простих форм захворювання можна віднести хвороби, котрі протікають за коливально-загасаючим ТДП. У них спостерігаються дві (іноді й більше) загасаючих хвиль протікання захворювання. Амплітуда другої хвилі може бути як малою, так і достатньо великою, що може бути причиною діагностування нового захворювання. Захворювання, які супроводжуються коливальним характером зміни температури організму можна віднести до найбільш складних, так як поява коливань може бути пов'язана з резонансними факторами, які мають місце в організмі.

**Список літератури:** 1. *Василенко В. Х.* Пропедевтика внутренних болезней /В. Х. Василенко, А. Л. Гребенева, Н. Д. Михайлова и др. – М.: Медицина, 1974. – 528 с. 2. *Ремизов А. Н.* Медицинская и биологическая физика /А. Н. Ремизов. – М.: Высшая школа, 1987. – 638 с. 3. *Орлов В. Н.* Руководство по электрокардиографии /В. Н. Орлов. – М.: Медицина, 1984. – 526 с. 4. *Виноградов А. В.* Дифференциальный диагноз внутренних болезней /А. В. Виноградов. – М.: Медицина, 1980. – 836 с. 5. *Стенцель Й. І.* Фотоколориметричні газоаналізатори /Й. І. Стенцель – К.: ІСДО, 1995. – 124 с. 6. *Стенцель Й. І.* Автоматизація

технологічних процесів хімічних виробництв / *Й. І. Стенцель*. – К. : ІСДО, 1995. – 360 с.  
7. *Стенцель Й. І.* Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів / *Й. І. Стенцель* // Вісник Східноук. нац університету. Науковий збірник. - №5 (111). - 2007. – С. 91-97. 8. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности / *А. В. Лыков*. – М. : Высш. шк., 1967. – 599 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vasylenko, V. Kh, A. L. Hrebeneva, N. D. Mykhaylova et al. *Propedevtyka vnutrennykh bolezney*. Moscow: Medytsyna, 1974. Print. 2. Remyzov, A. N. *Medytsynskaya y byolohycheskaya fizyka*. Moscow : Visshaya shkola, 1987. Print. 3. Orlov, V. N. *Rukovodstvo po elektrokardyyografyy*. Moscow: Medytsyna, 1984. Print. 4. Vynohradov, A. V. *Dyfferentsyal'nyy dyahnoz vnutrennykh bolezney*. Moscow: Medytsyna, 1980. Print. 5. Stentsel', Y. I. *Fotokolorymetrychni hazoanalizatory*. Kyiv: ISDO, 1995. Print. 6. Stentsel', Y. I. *Avtomatyzatsiya tekhnolohichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnystv*. Kyiv: ISDO, 1995. Print. 7. Stentsel', Y. I. "Matematychnye modelyuvannya khimichnykh protsesiv na osnovi teoryi reolohichnykh perekhodiv." *Visnyk Skhidnouk. nats universytetu. Naukovyy zbirnyk*. No. 5 (111). 2007. 91-97. Print. 8. Likov, A. V. *Teoryya teploprovodnosti*. Moscow: Vissh. shk., 1967. Print.

*Надійшла (received) 14.04.2015*

УДК 620.179.14

**Б. М. ГОРКУНОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",  
**Н. Н. СИРЕНКО**, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",  
**И. В. ТЮПА**, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ",  
**А. А. ТИЩЕНКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ"

## РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

В работе рассмотрены вопросы теории электромагнитных преобразователей для многопараметровых измерений с полями, которые имеют пространственно-периодическую структуру. Показано, как с помощью зависимостей амплитудных пространственных гармоник можно расположить секции измерительных обмоток с тем, чтобы выделить из сигнала преобразователя необходимые гармоники. Приведены графики зависимостей нормированных амплитуд и фаз. Описан алгоритм определения электромагнитных и геометрических параметров цилиндрических изделий. Сделан вывод о том, что электромагнитные преобразователи позволяют осуществлять многопараметровый контроль за счет использования определенного числа отдельных пространственных гармоник зондирующего поля.

**Ключевые слова:** электромагнитный преобразователь, пространственно-периодическое поле, многопараметровые измерения, электромагнитные параметры.

© Б. М. Горкунов, Н. Н. Сиренко, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко, 2015

**Постановка проблемы.** В настоящее время достаточно актуальным является вопрос развития многопараметровых методов измерений, которые позволяют получить наиболее полную информацию о состоянии объектов. Для одновременного определения двух параметров изделия наиболее удобным является использование электромагнитных преобразователей (ЭМП), работающих на одной, фиксированной частоте. В этом случае измеряют два признака выходного сигнала ЭМП, а затем решают систему из двух уравнений, связывающих измерительные признаки сигнала с параметрами изделия. При одновременном определении трех и более информативных параметров исследуемого объекта необходимо использовать большее число независимых уравнений. Эти параметры можно определять с помощью ЭМП, работающем на нескольких частотах. Суть такого метода состоит в том, что изделие зондируется полями двух и более частот, а затем в выходных сигналах выделяют по два признака (амплитуду и фазу), соответствующих фиксированным частотам. Однако, использование этого метода на практике осложняется трудностями фазовой синхронизации во времени зондирующих полей и выделением выходных электрических параметров (и их признаков) из результирующего сигнала ЭМП [1-3].

Как указано в работе [4], одновременные многопараметровые измерения можно упростить, если использовать пространственно-периодические магнитные поля, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону на одной фиксированной частоте.

**Цель статьи.** Цель данной работы заключается в рассмотрении вопросов теории ЭМП для многопараметровых измерений с полями, имеющими пространственно-периодическую структуру.

**Основная часть.** При создании устройств с пространственно-периодическими полями целесообразно использовать трансформаторные преобразователи, у которых измерительные обмотки размещаются на радиусах меньших, чем радиусы возбуждающих полюсов. Это позволяет выделить несколько первых преобладающих гармоник, поскольку остальные затухают.

На рис. 2 показано, как с помощью зависимостей амплитудных значений 1-й и 2-й (*a*), а также 1-й и 3-й (*b*) пространственных гармоник  $H_r$  – составляющих поля от величины  $\varphi$  можно расположить секции измерительных обмоток с тем, чтобы выделить из сигнала преобразователя гармоники с указанными номерами [5].



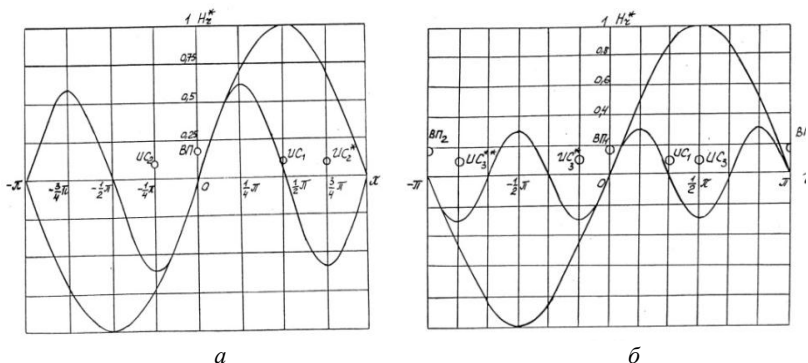


Рис. 1 – Зависимости пространственных гармоник поля от величины  $\varphi$  и расположения секций измерительной обмотки : а – 1-й и 2-й пространственных гармоник; б – 1-й и 3-й пространственных гармоник

При контроле параметров исследуемых изделий одним из главных вопросов является определение способов и средств выделения требуемых гармоник из результирующих сигналов преобразователя и ослабления влияния на результаты контроля гармоник с более высокими номерами. Отметим основные пути подавления амплитуд мешающих пространственных гармоник: размещение секций измерительных обмоток на радиусах, меньших радиусов намагничивающих полюсов; рациональный выбор числа полюсов с однонаправленными токами в них и числа пар полюсов с противоположно направленными токами; увеличение угловой ширины возбуждающих полюсов; размещение секций измерительных обмоток на определенных лучах  $\varphi = \text{const}$ ; соответствующее включение таких секций; выбор угловой ширины секций измерительной обмотки.

Необходимо отметить, что каждая пространственная гармоника электромагнитного поля по-разному проникает в проводящий цилиндр, а, следовательно, и реакция изделия на каждую зондирующую пространственную гармонику будет различна. Такое различие проявляется в изменении характерных, признаков гармоник, т. е. их амплитуд и временных фаз. Это дает возможность использовать и выбрать тип преобразователя с пространственно-периодическими полями для многопараметровых измерений.

Практический интерес представляет решение обратной задачи, т.е. определение косвенными методами электромагнитных и геометрических параметров цилиндрических изделий, а также связанных с ними механической нагрузки и температуры. Для

определения этих параметров нужно иметь рассчитанные значения зависимостей нормированных амплитуд и фаз первой и третьей гармоник в виде таблиц или графических зависимостей  $A_3/A_1^3 = f(\text{tg}\Phi_1)$ ,  $\text{tg}\Phi_1 = f(x)$ ,  $A_1 d/a = K = f(x)$ , которые приведены на рис. 2, 3.

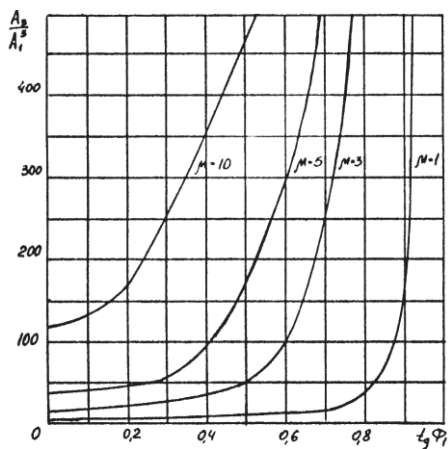


Рис. 2 – Универсальные зависимости нормированных амплитуд от фазы сигнала первой гармоники

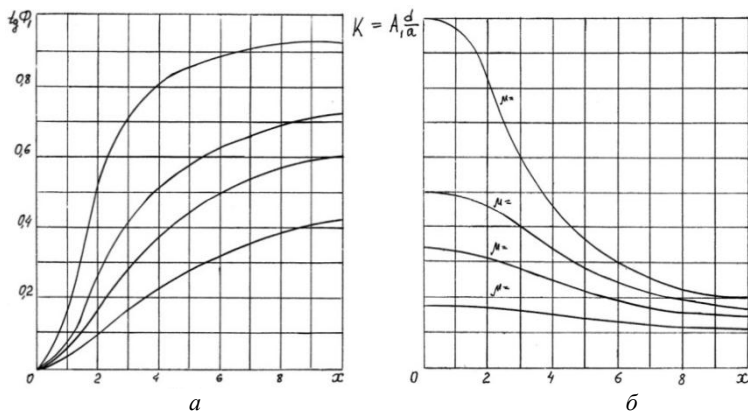


Рис. 3 – Графические зависимости: а – зависимость фазы первой гармоники от обобщенного параметра  $x$ ; б – зависимость нормированного параметра  $K$  от обобщенного параметра  $x$

Алгоритм определения параметров цилиндрического изделия следующий: по измеренным значениям амплитуд первой и третьей гармоники и фазы первой гармоники, пользуясь графиком  $A_3/A_1^3 = f(\text{tg}\Phi_1)$  (рис. 2), определяем по пересечению измеренных значений величину относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ , затем, пользуясь графиком  $\text{tg}\Phi_1 = f(x)$  (см. рис.3, а), по кривой соответствующего значения  $\mu_r$  и измеренному значению  $\text{tg}\Phi_1$  определяем обобщенный параметр  $x$ .

В дальнейшем по полученным значениям  $\mu_r$  и  $x$  из графической зависимости  $A_1 d/a = K = f(x)$  (рис. 3, б) находим значение  $K$  с последующим вычислением радиуса изделия  $a$  из формулы:

$$a = \frac{A_1 d}{K}, \quad (1)$$

где  $d$  – расстояние от центра ферромагнитного изделия до проводника с током;  $A_1$  – безразмерный параметр [6].

Затем определяем удельную электропроводимость изделия  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{x^2}{a^2 \mu_r \mu_0 \omega}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $\omega$  – циклическая частота.

**Вывод.** Достоинство электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями состоит в том, что при работе на одной фиксированной временной частоте они позволяют осуществлять многопараметровый контроль за счет использования определенного числа отдельных пространственных гармоник зондирующего поля. Таким образом, данные преобразователи могут найти широкое применение в системах мониторинга электросетей, системах контроля гололедообразования и системах мониторинга динамических параметров магистральных высоковольтных линий.

**Список литературы:** 1. Клоев В.В и др. Измерения, контроль, испытания и диагностика / В.В. Клоев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов.- М.: Машиностроение, 1996.- 464 с. 2. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль. -М.: Высшая школа, 1992.- 312 с. 3. Клоев В.В. Неразрушающий контроль: Справочник: В7т. – М.: Машиностроение, 2003.- 588 с. 4. Б.М. Горкунов, А.А. Тищенко, И.Б. Горкунова. Многопараметровый электромагнитный контроль токопроводов в пространственно-периодических полях // Актуальні проблеми автоматики і приладобудування. – Х: НТУ "ХПІ". – 2014. – С. 39-40. 5. Янке М., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1977. – 340 с. 6. А. С. 1287067 (СССР) Способ бесконтактного измерения

параметров цилиндрических проводящих изделий. / Б. М. Горкунов, С. С. Романов, В. П. Себко. – Опул. в Б.И., 1987, № 4.

**Bibliography (transliterated):** 1. Klyuev, V. V., F. R. Sosnin and V.N. Filinov. *Izmereniya, kontrol, ispytaniya i diagnostika*. Moscow: Mashinostroenie, 1996. Print. 2. Suhorukov, V.V. *Nerazrushayuschiy kontrol. Elektromagnitnyiy kontrol*. Moscow: Vysshaya shkola, 1992. Print. 3. Klyuev, V. V. *Nerazrushayuschiy kontrol*. Moscow: Mashinostroenie, 2003. Print. 4. Gorkunov, B. M., A. A. Tyshchenko and I. B. Gorkunova. "Mnogoparametrovyy elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvenno-periodicheskikh polyah." *VISNYK NTU «KhPI»*. No. 9. 2014. 39–40. Print. 5. Yanke, M., F. Emde and F. Lesh. *Spetsialnyie funktsii*. Moscow: Nauka, 1997. Print. 6. Gorkunov, B. M., S. S. Romanov and V. P. Sebko. "Sposob beskontaktnogo izmereniya parametrov tsilindricheskikh provodyaschih izdeliy." *A.S. 1287067*. No. 4. 1987. Print.

*Поступила (received) 27.04.2015*

УДК 620.179.14

**Б. М. ГОРКУНОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",  
**С. Г. ЛЬВОВ**, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ",  
**Н. Н. СИРЕНКО**, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",  
**Н. В. КОСТЮЧЕНКО**, магистр НТУ "ХПИ"

## **ОДНОПАРАМЕТРОВЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ НЕМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

В работе рассмотрена теория работы вихретокового преобразователя с исследуемым немагнитным цилиндрическим образцом. Получены функции преобразования, связывающие электрические и геометрические параметры исследуемого изделия с выходными сигналами преобразователя, что позволило существенно расширить пределы применения вихретокового преобразователя. Предложен метод однопараметрового контроля удельного электрического сопротивления при известных геометрических размерах образца и метод определения диаметра образца при известном удельном электрическом сопротивлении.

**Ключевые слова:** вихретоковый преобразователь, удельное электрическое сопротивление, функция преобразования, амплитуда, фаза, магнитный поток.

**Постановка проблемы.** Одной из основных характеристик любого первичного преобразователя является функция преобразования, т.е. функция, связывающая входные воздействующие величины (физические, химические и др.) с выходными характеристиками датчика. Она может быть представлена

---

© Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, Н. Н. Сиренко, Н. В. Костюченко, 2015

аналитически в виде математической зависимости, графически (таблично) в виде градуировочной кривой или другими способами.

Для вихретоковых преобразователей (ВТП) с исследуемым немагнитным металлическим образцом входными параметрами являются удельное электрическое сопротивление  $\rho$  и геометрические размеры образца, которые в свою очередь зависят от физико-химического состава, воздействия температуры, механических напряжений и других воздействующих факторов. Выходными сигналами ВТП являются индуктивность, сопротивление, напряжение, ток, фаза, частота сигнала и их производные.

**Цель статьи.** Цель данной работы заключается в получении функции преобразования ВТП, связывающих электрические и геометрические параметры немагнитных металлических изделий с выходными электрическими сигналами ВТП для различных схем включения и режимов его работы.

**Основная часть.** В существующей литературе [1] описаны бесконтактные многопараметровые методы и ВТП для совместного измерения  $\rho$  и  $d$ . Недостатком таких устройств является то, что их практически невозможно использовать при контроле изменения  $\rho$  и  $d$ , когда эти изменения незначительны (менее 10 % от исходного значения), а именно такие изменения контролируемых параметров изделий и возникают в процессе их эксплуатации при воздействии на них механических нагрузок, что приводит к изменению  $\rho$ , либо работа узлов в агрессивных средах, что приводит к изменению как  $\rho$ , так и геометрических размеров ( $d$ ).

Функцию преобразования можно получить, когда определены информативные параметры объекта контроля, выбран метод преобразования этих параметров в выходные сигналы датчика, известна схема включения преобразователя, конструктивные особенности датчика и объекта контроля, а иногда и режимы работы датчика.

Принципиальная схема включения ВТП, с помощью которой можно реализовать метод бесконтактного контроля  $\rho$  и  $d$ , приведена на рис. 1, а векторная диаграмма напряжений ВТП, поясняющая его работу, приведена на рис. 2.

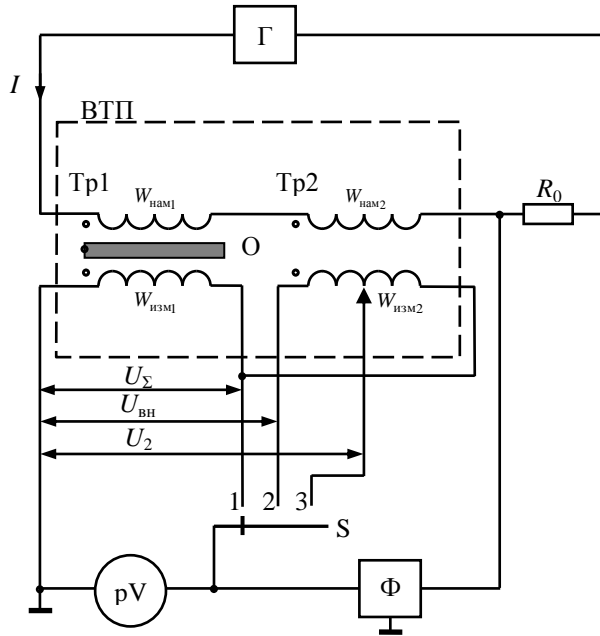


Рис. 1 – Схема включения ВТП при измерении выходного сигнала и его фазы

Преобразователь состоит из двух идентичных трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$ , в первом находится исследуемый образец  $O$ , а во втором имеется возможность изменять количество витков вторичной обмотки. Так как вторичные обмотки  $Tr1$  и  $Tr2$  включены последовательно-встречно, то на выходе ВТП можем получать в зависимости от положения выключателя  $S$  значения напряжений  $U_{\Sigma}$ ,  $U_{вн}$  и  $U_2$ . При этом фазометр  $\Phi$  будет измерять соответствующие фазовые углы.

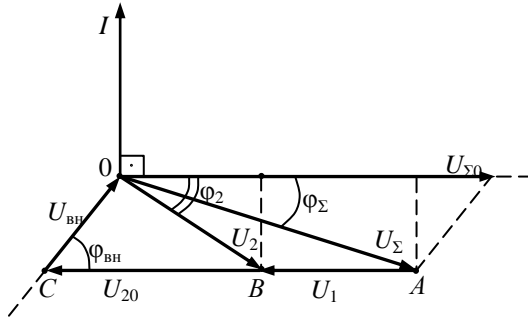


Рис. 2 – Векторная диаграмма напряжений, поясняющие работу ВТП для немагнитного образца

Воспользовавшись векторной диаграммой напряжений (см. рис. 2), получим основные функции преобразования ВТП при совместном бесконтактном определении  $\rho$  и  $d$  исследуемого немагнитного металлического образца для заданных значений напряженности (тока) и частоты зондирующего электромагнитного поля.

Из треугольника напряжений  $\Delta OBC$ , согласно рис. 2, получим выражения

$$U_2^2 = U_{\text{вн}}^2 + U_{20}^2 - 2U_{\text{вн}}U_{20} \cos \varphi_{\text{вн}}; \quad (1)$$

$$U_{\text{вн}}^2 = U_2^2 + U_{20}^2 - 2U_2U_{20} \cos \varphi_2. \quad (2)$$

где  $U_{20}$  – напряжение, пропорциональное магнитному потоку воздушного зазора трансформатора на размере образца;  $\varphi_2$  – фазовый угол магнитного потока в образце, который совпадает с углом сдвига фазы между  $U_2$  и  $U_{\Sigma 0}$ , где  $\varphi_{\text{вн}}$  – угол сдвига фазы между напряжениями  $U_{\text{вн}}$  и  $U_{\Sigma 0}$ .

Значение напряжения  $U_{20}$  связанос  $U_{\Sigma 0}$  через коэффициент заполнения  $\eta$  выражением [2]:

$$U_{20} = \eta U_{\Sigma 0}, \quad (3)$$

где  $\eta = d^2/d_{\text{п}}^2$ ;  $d$  – диаметр исследуемого образца;  $d_{\text{п}}$  – диаметр измерительной обмотки ВТП.

Для немагнитных изделий ( $\mu_r = 1$ ) выражения для  $U_2$  имеет вид [2]:

$$U_2 = \eta K U_{\Sigma 0}, \quad (4)$$

Иногда возникает задача разработки ВТП для контроля физико-механического состояния немагнитного металлического объекта при условии, когда геометрия (диаметр  $d$ ) исследуемого объекта известна и в процессе контроля не изменяется.

Получим основные функции преобразования ВТП для данного случая. Подставив выражение (3) и (4) в формулу (2), после несложных преобразований, получим:

$$Q_2 = \sqrt{K^2 - 2K \cos \varphi_2 + 1} = \frac{U_{\text{вн}}}{\eta U_{\Sigma 0}}. \quad (5)$$

Левая часть выражения (5) представляет собой универсальную функциональную зависимость, которую можно однозначно рассчитать с помощью функций Бесселя в широком диапазоне изменения  $x$  и представить в виде таблиц или графика  $x = f_1(Q_2)$  (см. рис. 3).

Используя известное выражение для  $x$

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r 2\pi f}{\rho}}, \quad (6)$$

и с учетом того, что  $\mu_r = 1$  получим функцию преобразования ВТП для случая, когда известен диаметр образца

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi f d^2}{2x^2}. \quad (7)$$

С другой стороны, вычитая уравнение (1) из уравнения (2), после преобразований, получим:

$$Q_3 = \frac{U_{\text{вн}}^2 - U_{\Sigma}^2 + U_{\Sigma 0}^2}{2\eta U_{\Sigma 0}^2}, \quad (8)$$

где  $Q_3 = 1 - K \cos \varphi_2$  – универсальная функция преобразования, которая связана с обобщенным параметром  $x$ , график  $x = f_2(Q_3)$  приведен на рис. 3.



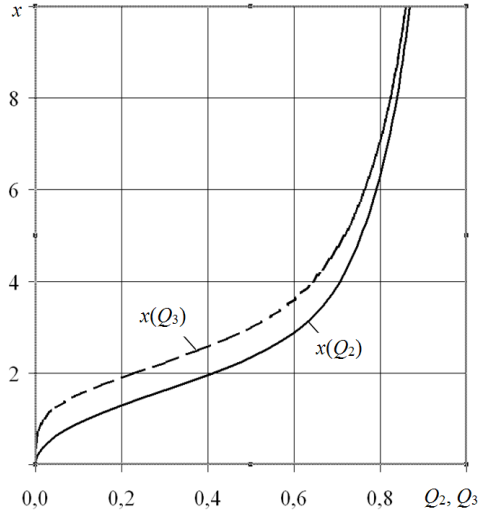


Рис. 3 – Зависимости  $x = f_1(Q_2)$  и  $x = f_2(Q_3)$

В нашем случае, когда  $d = \text{const}$ , соотношение для модуля удельного нормированного магнитного потока  $K$  можно получить, подставив известное [3] выражение

$$U_2 = \sqrt{\eta U_{\Sigma}^2 + (1 - \eta)(U_{\text{ВН}}^2 - \eta U_{\Sigma 0}^2)}. \quad (9)$$

в формулу (4), т.е.:

$$K = \frac{\sqrt{\eta U_{\Sigma}^2 + (1 - \eta)(U_{\text{ВН}}^2 - \eta U_{\Sigma 0}^2)}}{\eta U_{\Sigma 0}}, \quad (10)$$

а фазу магнитного потока в изделии определяют из выражения [3]:

$$\cos \varphi_2 = \frac{U_{\Sigma}^2 - U_{\text{ВН}}^2 + (2\eta - 1)U_{\Sigma 0}^2}{2U_{\Sigma 0} \sqrt{\eta U_{\Sigma}^2 + (1 - \eta)(U_{\text{ВН}}^2 - \eta U_{\Sigma 0}^2)}}. \quad (11)$$

Графики зависимостей  $x = f(K)$  и  $x = f(\cos \varphi_2)$  приведены в работе [2].

Получим функции преобразования ВТП при определении электрических и геометрических параметров образцов по измеренным значениям амплитуды и фазы выходного сигнала ВТП.

Используя результаты работы [4], запишем:

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_1}; \quad (12)$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_2$  – фаза магнитного потока внутри исследуемого изделия.

На основании векторной диаграммы из  $\Delta OAB$  (см. рис. 2) запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} U_2^2 = U_{\Sigma}^2 + U_1^2 - 2U_{\Sigma}U_1 \cos \varphi_{\Sigma} \\ U_{\Sigma}^2 = U_2^2 + U_1^2 + 2U_2U_1 \cos \varphi_2 \end{cases} \quad (13)$$

Просуммировав эти два уравнения, получим:

$$U_1 = U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_2 \cos \varphi_2. \quad (14)$$

Подставив (14) в (12) с учетом (4), найдем:

$$\eta = \frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma 0} K \sin \varphi_2}. \quad (15)$$

С другой стороны, из выражений (14), (15), (12) и (4), после некоторых преобразований, можно получить уравнение, которое исключает влияние коэффициента заполнения, т.е.:

$$\frac{U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_{\Sigma 0}}{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}} = \frac{K \cos \varphi_2 - 1}{K \sin \varphi_2}, \quad (16)$$

где правая часть уравнения  $Q_4 = \frac{K \cos \varphi_2 - 1}{K \sin \varphi_2}$  – универсальная

функция, которая зависит от обобщенного параметра  $x$ ; а левая часть уравнения зависит только от измеренных значений выходных сигналов ВТП ( $U_{\Sigma}$ ;  $\varphi_{\Sigma}$ ).

Следует отметить, что из выражения (15) можно получить обратную функцию преобразования ВТП для независимого контроля  $d$  образца [5]:

$$d = d_{\pi} \sqrt{\frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma 0} K_{\mu}}}, \quad (17)$$

где  $K_{\mu} = K \sin \varphi_2 = f_4(Q_4)$  – мнимая часть удельного нормированного магнитного потока в образце, которая через параметр  $x$  зависит от функции  $Q_4$ , приведенной на рис. 4.

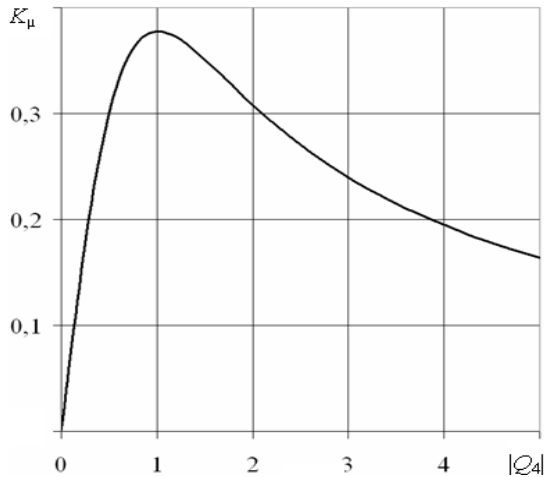


Рис. 4 – График функциональной зависимости  $K_{\mu} = f_4(Q_4)$

Используя выражение (6) для случая  $\mu_r = 1$ , получим обратную функцию преобразования ВТП при независимом контроле  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi d^2 f U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{2 U_{\Sigma 0} K_{\rho}}. \quad (18)$$

где  $K_{\rho} = x^2 K \sin \varphi_2 = f_5(Q_4)$  – универсальная функция, которая однозначно связана с параметром  $Q_4$ , которая приведена на рис. 5.

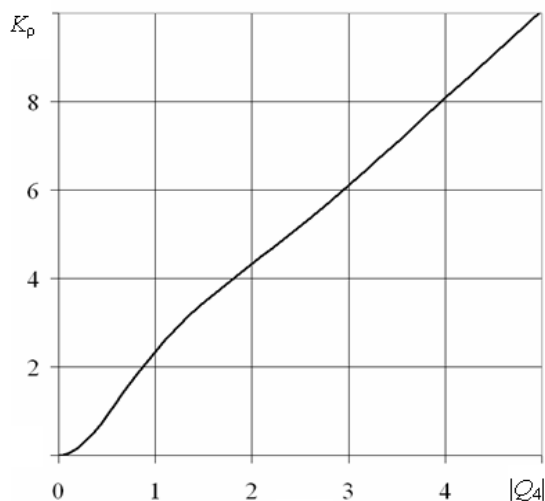


Рис. 5 – График функциональной зависимости  $K_p = f_5(Q_4)$

**Вывод.** Получены основные функции преобразования ВТП при контроле электрического ( $\rho$ ) и геометрического ( $d$ ) параметров немагнитных металлических изделий для частных случаев неразрушающего контроля одного из параметров изделия при известном значении второго, что расширило функциональные возможности ВТП.

**Список литературы:**1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля / В.В. Клюев, В.Ф. Мужижский, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с. 2. Бесконтактное измерение магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости цилиндрических изделий / В.П. Себко, В.И. Бондаренко, Б.М. Горкунов, В.И. Тюпа // Измерительная техника. –1984. –№6. –С.57–58. 3. Горкунов Б.М. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа // Вестник НТУ "ХПИ". – 2004. – №5. – С. 93-99. 4. Москаленко И.И. Трансформаторный электромагнитный преобразователь физико-механических величин / И.И. Москаленко, В.П. Себко, Б.М. Горкунов // Нетрадиционные электромеханические и электрические системы: междунар. науч.-техн. конф., 1997 г; матер. конф. – Алушта, 1997. – С.1173-1176. 5. Горкунов Б.М. Выбор рационального метода вихретокового контроля немагнитных металлических изделий / Б.М. Горкунов // Технічна електродинаміка, тематичний випуск "Силові електроніка та енергоєфективність". –2006. – Ч.4. –С.57–60.

**Bibliography (transliterated):**1. Klyuev, V. V. et al. "Nerazrushayushchiy kontrol: Magnitnyie metody kontrolya". Vol. 6:– Moscow: Mashinostroenie, 2004. 8 vol. Print. 2. Sebko, V. P. et al. "Beskontaktnoe izmerenie magnitnoy pronitsaemosti i udelnoy elektricheskoy provodimosti tsilindricheskikh izdeliy". *Izmeritel'naya tekhnika*. No. 6. 1984. 57–58. Print. 3. Gorkunov, B. M.

and I.V. Tyupa. "Vihretokovyyi dvuhparametrovyyi kontrol ferromagnitnykh tsilindricheskikh izdeliy". *Vestnik NTU "KhPI"*. No. 5. 2004. 93-99. Print. 4. Moskalenko I. I., V. P. Sebko and B. M. Gorkunov. "Transformatornyy elektromagnitnyy preobrazovatel fiziko-mekhanicheskikh velichin". *Netraditsionnye elektromekhanicheskie i elektricheskie sistemy: konf.* Alushta. 1997. 1173-1176. Print. 5. Gorkunov B. M. "Vyibor ratsionalnogo metoda vihetokovogo kontrolya nemagnitnykh metallicheskikh izdeliy". *Tehnichna elektrodinamika, tematichniy vipusk "Silova elektronika ta energoefektivnIst.* Vol. 4. 2006. 57-60. Print.

*Поступила (received) 27.04.2015*

УДК 620.179.16

**Е. Л. НОЗДРАЧЕВА**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

## **РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ СОЗДАНИЯ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ (ОБЗОР)**

В работе проанализированы способы и средства ультразвукового неразрушающего контроля емкостным бесконтактным методом. Описаны преимущества, недостатки, возможности и условия применения емкостного метода ультразвукового контроля. Установлена перспективность применения емкостного метода, описан принцип работы. Рассмотрены емкостные преобразователи и направления их применения, исследования их возможностей по сравнению с другими.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, емкостной преобразователь, электрод, электрическое поле, объект контроля, бесконтактный.

**Введение.** При производстве металлоизделий на предприятиях различных отраслей промышленности, и изделий, находящихся в эксплуатации широко применяют различные методы и средства неразрушающего контроля, позволяющие проверять качество продукции без дальнейшего нарушения ее пригодности к использованию по назначению [1].

Наиболее распространенным методом неразрушающего контроля является акустический, который позволяет обнаруживать не только макроскопические дефекты в металлах, но и определять их структуру. Автоматизация процессов акустического контроля повысила его производительность и качество технологии производства.

**Актуальность темы.** Повышение требований к качеству промышленной продукции обусловило интенсивное развитие средств ультразвукового контроля материалов и изделий, основу которых составляют приборы, которые реализуют контактный метод ультразвукового контроля (то есть с использованием контактной жидкости). При-

© Е. Л. Ноздрачева, 2015

менение данного метода не достаточно эффективно при некоторых условиях производства и эксплуатации продукции. Например, при контроле изделий с загрязненной, корродированной поверхностью или с покрытиями (краска, полимерные пленки и другие изоляционные покрытия), дефектоскопия горячих и холодных изделий, высокоскоростной контроль, дефектоскопия с низкими эксплуатационными затратами и др. Заполнить нишу возможно за счет применения приборов, не предусматривают применения контактной жидкости [2–4]. То есть приборов, которые могут эффективно контролировать качество изделий с загрязненной, корродированной поверхностью или с изоляционными покрытиями. Применение таких средств повышает производительность контроля, снижает затраты на зачистку поверхности изделий и постоянно расходуемую контактную жидкость. За счет исключения из процесса контроля контактной жидкости улучшаются экологические условия.

В настоящее время наиболее эффективно среди бесконтактных методов неразрушающего контроля реализованы средства, которые используют электромагнитно - акустический (ЭМА) способ возбуждения и приема ультразвуковых колебаний [3]. Однако, они имеют ряд ограничений в некоторых областях применения. В частности при контроле ферромагнитных материалов, из-за сильного взаимного притяжения преобразователя и изделия, налипания окалина. Низкая эффективность ЭМА преобразования для сплавов на основе меди, титана и других. Существенно влияет на результаты контроля возникновения помех в полезном сигнале от пластинок  $Fe_2O_3$  и  $Fe_3O_4$ . При реализации данного метода применяются достаточно мощные кратковременные, которые могут приводить к быстрому выходу из строя элементов ЭМА дефектоскопа импульсы тока [2–4].

Таким образом, значительные потенциальные преимущества, с одной стороны, недостатки и сложность реализации, с другой стороны, привели к появлению важной для промышленности научной проблемы. Ее суть заключается в развитии теории и практики создания новых приборов для бесконтактного контроля, обеспечивающие обнаружение дефектов, измерения толщины и определения структурных параметров электропроводящих изделий широкого сортамента. Решение поставленной проблемы требуют: железнодорожный транспорт, объекты нефтегазовой промышленности, металлургическая промышленность, химическая промышленность – при контроле изделий пораженных коррозией, авиа и судостроения и др.

Следовательно, создание новой разновидности приборов и способов для эффективного бесконтактного ультразвукового контроля явля-

ется социально значимым, актуальным и своевременным.

Известны и другие методы возбуждения и приема ультразвуковых колебаний (УЗК) бесконтактно. Это – метод лазерного возбуждения и детектирования УЗК; метод электромагнитно-акустического контроля; пьезоэлектрические преобразователи с воздушно-акустической связью.

Среди таких методов контроля можно выделить емкостной способ ультразвукового контроля, который потенциально обладает следующими преимуществами: прежде всего бесконтактность реализации метода; высокие технические характеристики, простота изготовления и удобство в эксплуатации, а следовательно, высокая воспроизводимость технических характеристик. В известной литературе также отмечается [5–9], что этот способ имеет низкую чувствительность, и существенную сложность аппаратурной реализации, но достаточно эффективные разработки, учитывающие особенности применения емкостного способа по настоящее время – отсутствуют. Недостаточно рассмотрены теоретические вопросы метода, в результате не созданы эффективные приборы для дефектоскопии, не разработаны высокочувствительные преобразователи. Не учтены особенности метрологического обеспечения емкостных приборов ультразвукового контроля.

О возможности использования механических сил, действующих на обкладки конденсатора, подключенного одновременно к источникам постоянного и переменного электрического напряжения известно уже давно [5, 6]. Но, несмотря на широкополосность, присущую ультразвуковым (УЗ) преобразователям, основанным на этом эффекте, большого распространения они не получили. В последние годы интерес к таким преобразователям вновь возрос в связи с возможностью их применения для бесконтактного возбуждения ультразвуковых волн в твердых телах на высоких и сверхвысоких частотах.

Последние исследования, которые были направлены на определение влияния основных технических и технологических факторов, определяющих результаты контроля [10–14] показали, что данный метод потенциально может иметь достаточную чувствительность. Он реализуется в широком частотном диапазоне при возбуждении и приеме ультразвуковых колебаний. Поэтому дальнейшая разработка преобразователей данного типа является перспективной.

Емкостные приемники акустических сигналов широко известны еще с 60-х годов прошлого столетия [15–19], которые могут измерять два параметра в акустической волне : смещение и колебательную скорость. Конструктивно, они представляют собой два электрода, между которыми находится либо воздушный промежуток, либо диэлектрическая пленка.

Емкостный способ возбуждения акустических колебаний в упругой среде использует эффект воздействия на объект контроля электрическим полем [12-14]. В качестве источника поля выступает емкостный преобразователь (ЕП). Реализовать данный метод возможно в случае, если электропроводящую поверхность изделия сделать одной из обкладок конденсатора, при этом происходит притяжения пластины конденсатора 1 ЕП с изделием 3 (рис. 1), где в последнем возникают упругие колебания. Регистрацию акустических колебаний производят за счет обратного эффекта - появлении переменного электрического напряжения на обкладках ЕП при изменении расстояния  $h$  между обкладками (одна из которых - объект контроля), а следовательно и емкости конденсаторного преобразователя при обязательном наличии поляризующего напряжения.

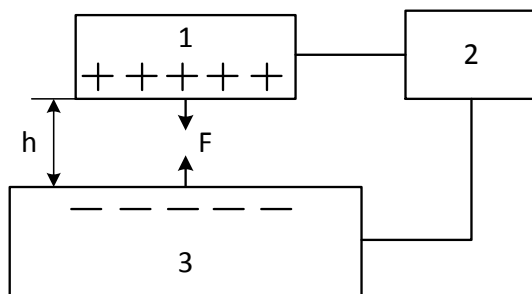


Рис. 1 – Упрощенная схема емкостного преобразователя:

1 – электрод конденсаторного преобразователя; 2 – генератор переменного напряжения;  $h$  – толщина слоя;  $F$  – сила, действующая между обкладками ЕП 1 и электропроводящим изделием 3

При разноименных зарядах на обкладках конденсатора пластина 1 и изделие 3 притягиваются. Максимум сила притяжения достигается дважды за один период колебаний переменного напряжения высокой частоты. Следовательно, возникает эффект удвоения частоты акустических колебаний. Для исключения эффекта удвоения и повышение коэффициента преобразования электрической энергии в акустическую одновременно на электрод 1 подают постоянное поляризующее напряжение [12].

На основе емкостного метода в известной литературе было разработано много вариаций бесконтактных широкополосных датчиков и макетов лабораторных установок на основе емкостного способа, поз-



воляющих проводить исследования в таком направлении ультразвукового неразрушающего контроля как структуроскопия. Работы [12-14] были направлены на совершенствования реализации метода, но разработок в области дефектоскопии и толщинометрии не было.

Например, в работе [15] описан метод емкостного датчика, предназначенного для непрерывной регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности, который позволяет исследовать параметры упругих волн в металлах. При этом, точность, которую можно получить при записи скорости оценивают в 3-5 %, что связано с низким уровнем принимаемого сигнала, а, следовательно, с недостаточно высокой помехоустойчивостью метода.

На основе емкостного способа была разработана методика [20] для проведения измерений на большом гравитационном детекторе. Установка реализована на основе емкостного датчика, позволяющего регистрировать акустические колебания твердого тела с амплитудой  $5 \cdot 10^{-14}$  см в диапазоне частот около 4 кГц. Конструкция датчика и объекта исследования достаточно сложная, так как рабочие поверхности должны быть отполированы до  $\pm 0,5$  мк и зазор рабочей емкости не должен превышать 1 мк, для чего на внутреннем конце одного из стержней емкостного датчика укреплялась обмотка электрического нагревателя, увеличение температуры стержня приводило к уменьшению зазора. Подстройка такого плана достаточно трудоемкая в реализации.

В более ранних экспериментальных исследованиях емкостных преобразователей использовались кварцевые пластинки или пластинки из пьезокерамики, обладающие резонансными свойствами и требующие акустического контакта [21, 22].

С целью более полного определения параметров пьезопреобразователей авторами [22] были разработаны установки, в которых в качестве приемников и излучателей использовались электродинамический и емкостной преобразователи. Методика реализации электродинамического приемника ультразвуковых колебаний (УЗК) заключается в следующем – на грань образца, выполненного из материала с малым затуханием УЗК, наносится тонкая металлическая пленка. При вводе УЗК с противоположной грани на концах проводника, находящимся в магнитном поле, развивается ЭДС. Данные установки позволяли определить чувствительность датчиков ультразвуковой дефектоскопической аппаратуры, как в режиме передачи, так и в режиме приема, причем в последнем случае в качестве приемного элемента использовался исследуемый датчик, а излучателем служил электродинамический либо емкостной преобразователь. Но так как электродинамический метод и

установка, его реализующая, имеет недостаточную чувствительность, что требует применения дополнительных усилительных устройств. Кроме того громоздкость магнитной установки с достаточно сильным магнитным полем, что ограничивало и затрудняло подбор широкополосного усилителя из-за низкочастотных электрических наводок на приемных от схемы питания магнита, то применение емкостного преобразователя (рис. 2 а, б) оказалось более целесообразно и удобно, который применялся для абсолютных измерений интенсивности ультразвуковых сигналов.

На рис. 2 а приведена конструкция емкостного приемника. Электрод 1 вместе с металлизированной поверхностью образца 2 создает конденсатор, который принимает УЗК. Для обеспечения необходимого зазора (10—20 мк) электрод 1, выполненный в виде шлифованного (с последующей полировкой) диска, прижимался к металлизированной поверхности через бумажную или полимерную пленку определенной толщины. Образец 2 представлял собой тарированный стеклянный стержень, соответствующий ГОСТ 1151–54. Одна из тарированных плоскостей была покрыта тонким слоем серебра (сначала химически, а затем гальванически). Для стабилизации акустического контакта исследуемой пьезопластины 3 со стеклянным стержнем 2 используется пружина 4. Однако влияние слоя смазки может оказаться существенным, особенно, если поверхность исследуемой пьезопластины недостаточно хорошо обработана.

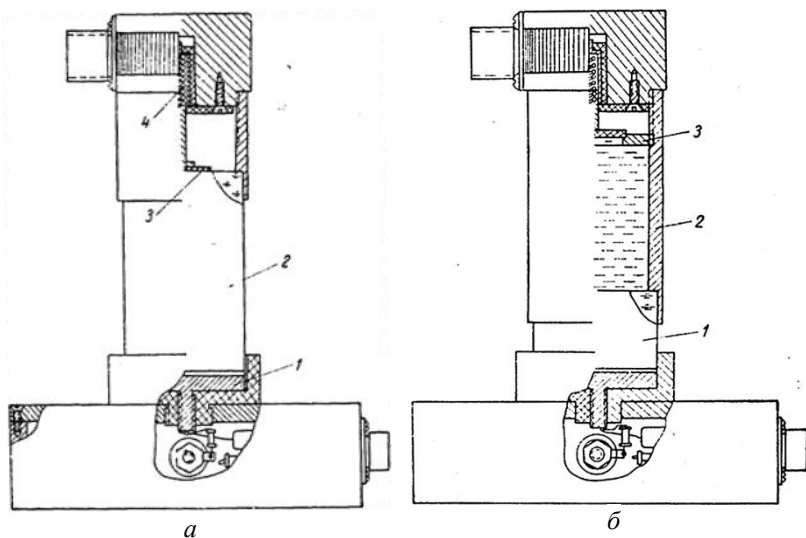


Рис 2. – Емкостной приемник [22]:  
*а, б* – контактный и емкостной варианты соответственно

Для этих случаев использовалась конструкция емкостного приемника, показанная на рис. 2 б. Здесь исследование пьезопластины производится в иммерсионном варианте. Конструктивные особенности емкостного датчика в иммерсионном варианте незначительны. Стекланный образец 1 помещается в металлическую трубу 2, в которой находится дистиллированная вода. Пьезопластина устанавливается в оправке 3 и излучает УЗК в жидкость. Использование дополнительной переходной среды не приводит к существенным изменениям формы излученного сигнала. Ввиду достаточно большого столба жидкости и длины стержня, последние можно рассматривать как безграничные среды, что позволяет ввести не зависящую от частоты поправку, учитывающую акустические сопротивления воды и стекла.

Использование предлагаемых установок позволило калибровать преобразователи как в режиме излучения, так и приема. Недостатком схемы на основе емкостного преобразователя является подбор зазора между обкладками преобразователя и поляризирующего напряжения для достижения максимального коэффициента передачи.

Так же, емкостной метод широко использовался для регистрации сигналов акустической эмиссии, длительность которых составляла  $10^{-7}$  с [23].

Как частный случай исследования бесконтактных методов возбуждения акустических импульсов с радиочастотным заполнением в твердых телах авторами [24, 25] разработан диэлектрический преобразователь, представляющий собой диэлектрик, помещенный между плоскопараллельными проводящими электродами, одним из которых служит торец звукопровода. Причиной возникновения механических сил, действующих на звукопровод, является электростатическое притяжение обкладок под действием переменного электрического поля в диапазоне частот 30 – 1000 МГц, а при наличии акустического контакта между диэлектриком и звукопроводом также и стрикции диэлектрика, помещенного в электрическое поле. Авторами [26] разработана установка для измерения затухания ультразвуковых колебаний в твердых телах в диапазоне частот 0,16–30 МГц с широкополосными диэлектрическими преобразователями.

Отличие данного метода от емкостного заключается в том, что принимают во внимание механические напряжения, возникающие в диэлектрике за счет силы электростатического притяжения обкладок конденсатора при подаче на него одновременно высокочастотного и импульсного напряжения.

Лишь в 80-х гг. прошлого столетия А.И. Кондратьеву, А.Н. Бондаренку, В.А. Луговому и др. [27, 28] в своих исследованиях удалось в какой-то мере усовершенствовать схему емкостного преобразователя и повысить чувствительность метода. Исследования авторов были направлены на совершенствование бесконтактных методов возбуждения ультразвуковых колебаний.

В частности, в работах [29, 30] теоретически и экспериментально исследованы амплитудно-временные характеристики сигнала, излученного емкостным преобразователем с заполнением [29] и без [30]. На рис. 3 приведена блок-схема экспериментальной установки. Генератор 1 возбуждает электрические импульсы (ЭИ) прямоугольной или треугольной формы длительностью 0,04–2,0 мкс, амплитудой до 2000 В, которые посредством ЕП 2–4 преобразуются в упругие. Возбуждающий электрод 2 диаметром 10 мм через слюдяную прокладку 3 толщиной 20 мкм прижат силой ~10 Н к образцу 4 – стальной плите диаметром 60 мм и толщиной 10 мм. Упругие импульсы регистрировались лазерным интерферометром 5 и осциллографом 6. Порог чувствительности регистрирующей аппаратуры составлял  $0,5 \cdot 10^{-10}$  м в полосе частот 0,05–100 МГц.

В результате экспериментов было установлено, что амплитуда УИ растет пропорционально квадрату амплитуды возбуждающего ЭИ. При длительности последнего более 0,15 мкс форма упругого импульса

подобна форме электрического (под формой УИ подразумевается зависимость смещений в упругом импульсе от времени), а длительности упругого  $\tau_{у,и}$  и электрического импульсов  $\tau_{э,и}$  совпадают. Амплитуда УИ от  $\tau_{э,и}$  не зависит. На рис. 4 показаны типичные формы электрических и соответствующих им упругих импульсов ( $T_3$  — время задержки упругого импульса относительно электрического, равное времени распространения УИ в образце). При  $\tau_{э,и} < 0,15$  мкс выполняются следующие соотношения: 1) длительность переднего фронта УИ совпадает с  $\tau_{э,и}$ ; 2) длительность УИ (по полувысоте) не зависит от  $\tau_{э,и}$  ( $\tau_{э,и} < 0,1$  мкс); 3) характер изменения амплитуды УИ с уменьшением  $\tau_{э,и}$  близок к линейному ( $\tau_{э,и} < 0,1$  мкс).

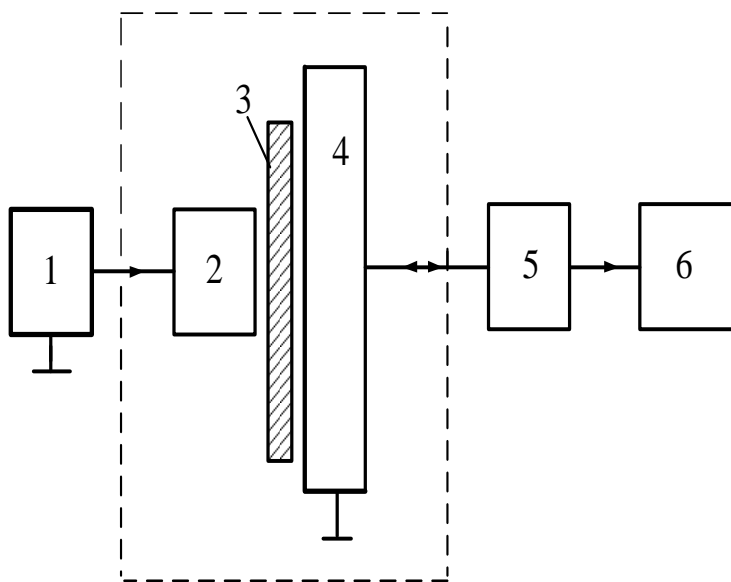


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки

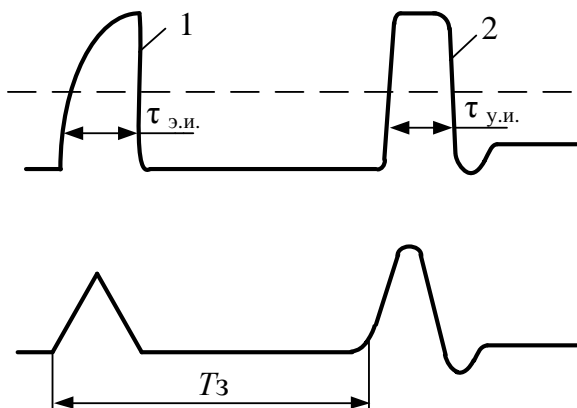


Рис. 4 – Форма электрического (1) и упругого (2) импульсов

При этом производился тщательный подбор параметров датчика и амплитуды излучаемого сигнала. Показано, что имеет место совпадение теоретических и экспериментальных результатов при и в отсутствии контакта между электродами преобразователя. Результаты проведенных исследований показали, что емкостные преобразователи могут быть использованы в качестве источника коротких упругих импульсов, причем их форму можно рассчитать, если известна форма возбуждающего электрического импульса. Результаты данных исследований могут быть весьма полезны и учтены при разработке и исследованиях емкостных преобразователей.

По результатам дальнейших исследований чувствительности емкостного преобразователя в режиме приема упругих импульсов в работе [31] приведены данные измерений акустических импульсов, возбуждаемых лазерными импульсами длительностью  $3 \cdot 10^{-8}$  с в стальной пластине толщиной 1,5 см, диаметром 4 см. Измерение упругих импульсов производилось либо лазерным интерферометром, либо емкостным приемником. В данном эксперименте, из сравнения форм сигналов на выходе обоих устройств, следовало, что емкостной метод позволяет измерять короткие акустические импульсы с достаточно высокой чувствительностью, но не приведены значения амплитуд принятых импульсов.

В работе [32] описан приближенный метод расчета формы принимаемых ультразвуковых импульсов при конечных размерах зоны возбуждения. Даны результаты экспериментальных исследований,

подтверждающие теоретические. Ультразвуковой импульс возбуждался в изделии с помощью емкостного и пьезоэлектрического преобразователей. Прием осуществлялся лазерным интерферометром с достаточно высокой точностью. При этом наблюдалось хорошее качественное совпадение теории с экспериментом. При теоретических расчетах использовался метод приближения осесимметричной динамической задачи Лемба для упругого полупространства. Учитывалась длительность и действия давления пластины преобразователя на поверхность объекта контроля, что применительно к пьезоэлектрическим преобразователям, но не учитывалась влияние электрических сил для емкостного преобразователя.

При дальнейших разработках авторами был усовершенствован емкостной преобразователь и схема его реализации [33–47]. В [33] используется емкостной приемный преобразователь, в котором один из электродов изготовлен из алюминия или его сплава, а диэлектрический слой получается анодированием этого электрода, благодаря чему значительно уменьшаются такие недостатки преобразователя как накопление объемного заряда, создающего обратное поле в диэлектрике, что уменьшает чувствительность датчика во времени и не позволяет проводить долговременные эксперименты. Коэффициент преобразования  $2 \cdot 10^8$  В/м; полоса воспроизводимых частот  $25 - 5 \cdot 10^5$  кГц. Чтобы в полной мере реализовать возможности разработанного емкостного датчика, была разработана конструкция с самоустанавливающимся электродом, в которой устранен перекоп между образцом и электродом с диэлектрическим слоем. Экспериментальные исследования датчика на установке, приведенной в [34] показали, что его чувствительность выше на 2 порядка, чем у акустического интерферомента, и составляет  $\sim 10^8$  В/м. Кроме того, доказано, что уменьшение диаметра электрода с диэлектрическим покрытием от 20 до 5 мм практически не приводит к уменьшению чувствительности. Это позволило с хорошим приближением использовать емкостной датчик как точечный приемник.

Схематический чертеж датчика представлен на рис. 5. Образец 8 из исследуемого материала устанавливается в корпус 9 и прижимается сверху накидной гайкой 10. Электрод 1 с диэлектрическим покрытием вместе с эбонитовым стаканом 2 плотно закреплен в шарнирном подшипнике 3, который впрессован в латунную втулку 4. В нижний конец втулки вворачивается латунная трубка 5, которая оканчивается разъемом 6 (СР-50-27 ОС). Электрод 1 тонким проводом соединен с разъемом 6. Винтом 7 перемещается втулка 4, а вместе с ней и электрод 1 до соприкосновения с образцом 8. При этом электрод 1, имея возможность углового перемещения  $\sim 7^\circ$ , устанавливается на образец без пере-

коса.

Было проведено детальное экспериментальное исследование опытного образца емкостного датчика по определению его чувствительности и полосы воспроизведения частот на установке, схематично представленной на рис. 6.

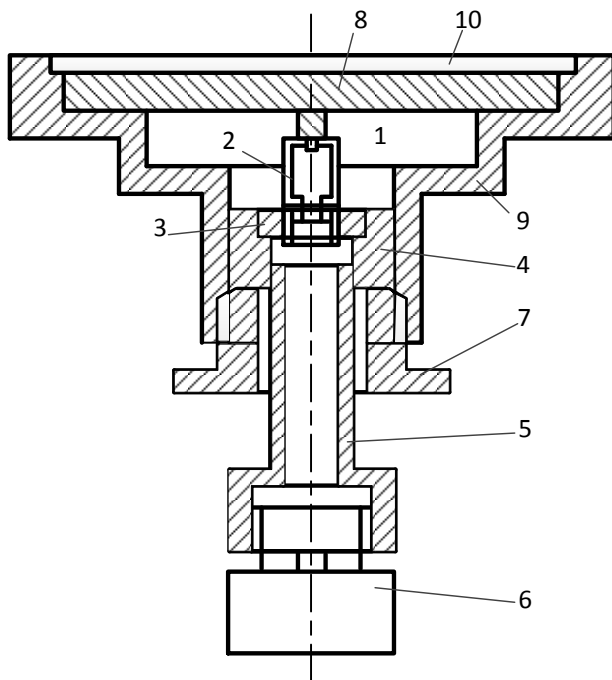


Рис. 5 – Схематический чертеж датчика [37]

Акустические импульсы в образце 3 из алюминиевого сплава Д16 толщиной 10 мм возбуждались емкостным преобразователем. Преобразователь состоит из алюминиевого электрода 1 диаметром 20 мм с диэлектрическим покрытием 2 и образца 3, являющегося вторым электродом. Источником электрического сигнала служил генератор высоковольтных импульсов, содержащий длинную линию с волновым сопротивлением  $r$ , искровой разрядник  $P$ , нагрузочное сопротивление  $R_n$ , источник постоянного тока  $E_0$ . Зарядное сопротивление  $R_3$  составляло 1 МОм. Амплитуда акустического сигнала на свободной поверхности



образца достигала  $2 \cdot 10^{-9}$  м и контролировались оптическим интерферометром И. Исследования проводились в диапазоне частот 0,1 – 20 МГц.

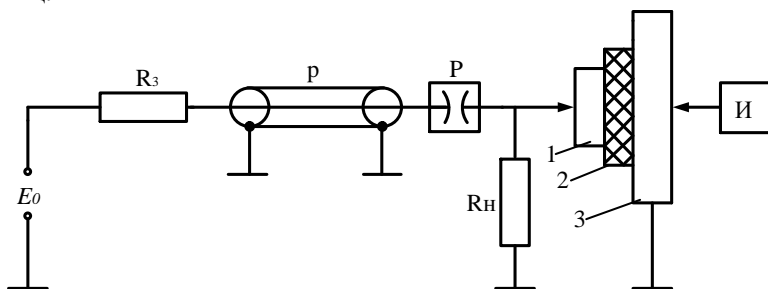


Рис. 6 – Блок-схема измерительной установки [37]

Также датчик обладал высокими эксплуатационными характеристиками, так, при нагревании электрода с диэлектрическим слоем до  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  чувствительность не менялась. Датчик применялся в установке по измерению затухания в твердых телах. Но, не смотря на преимущества разработанного датчика, его конструкция довольно сложна и трудна в выполнении и настройке и не применима для ультразвукового неразрушающего контроля, так как используется в качестве точечного приемника.

В работе [35] были произведены лабораторные исследования по определению скорости продольных ультразвуковых волн в различных металлоизделиях с помощью емкостных преобразователей, применение которых позволило исключить фазовые искажения сигналов в переходных слоях между преобразователями и образцом. Отличительной особенностью данной установки являлась возможность проводить измерения скорости УЗ волн в широком диапазоне частот 1–15 МГц, а не на фиксированных, как предполагалось в то время, с относительной погрешностью порядка  $1 \cdot 10^{-3}$ , что является хорошим показателем.

Из выбранного материала Д16Т были изготовлены образцы диаметром 100 мм, толщиной  $h=10; 15; 20; 25; 30$  мм с непараллельностью и несоосностью торцов не хуже  $1 \cdot 10^{-4}$  рад и  $5 \cdot 10^{-7}$  м (на базе 40 мм) соответственно. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 7.

Емкостные преобразователи 1, 9 устанавливались соосно (несоосность не более 0,1 мм) на противоположных торцах образца 2. Радиоимпульс амплитудой до 100 В генератора 3 через разделительную

емкость  $C1(4,2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф})$  подавался на преобразователь 1. Ультразвуковой импульс распространялся в образце 2 и трансформировался преобразователем 9 в электрический сигнал. Полученный сигнал через емкость  $C2(4,2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф})$  и усилитель подавался на вход 1 осциллографа 7, запуск которого производится синхрипульсом генератора 4. На вход 2 осциллографа подавалась пара импульсов генератора 5. Временной интервал между импульсами измерялся частотомером 6. Для поляризации преобразователей использовались источники постоянного напряжения 10, 11 ( $R_1 = R_2 = 1 \text{ МОм}$ ). Емкостными преобразователями служили электроды из алюминиевого сплава АМГ-2 диаметром 10; 15 и 20 мм с диэлектрическим слоем в виде анодно-окисной пленки [33].

Методика измерений заключалась в следующем [35]. Развертка осциллографа 7 выбиралась таким образом, чтобы на экране наблюдалась серия импульсов, соответствующих многократным отражением УЗ волны. Затем, регулируя задержку генератора 4 (рис. 7) и временной сдвиг генератора 5, добиваются приближенного временного совпадения импульсов генератора 5 с выбранной полуволевой импульса регистрируемого сигнала. После этого осциллограф 7 переводят в режим работы *В зад*, добиваются точного их совпадения и по частотомеру 6 определяют временной интервал  $t_u$ . Выбранное число измерений обеспечивало погрешность измерения  $t_n$  менее  $3 \cdot 10^{-9}$  с во всем исследуемом диапазоне частот для различных пар УЗ импульсов и образцов.

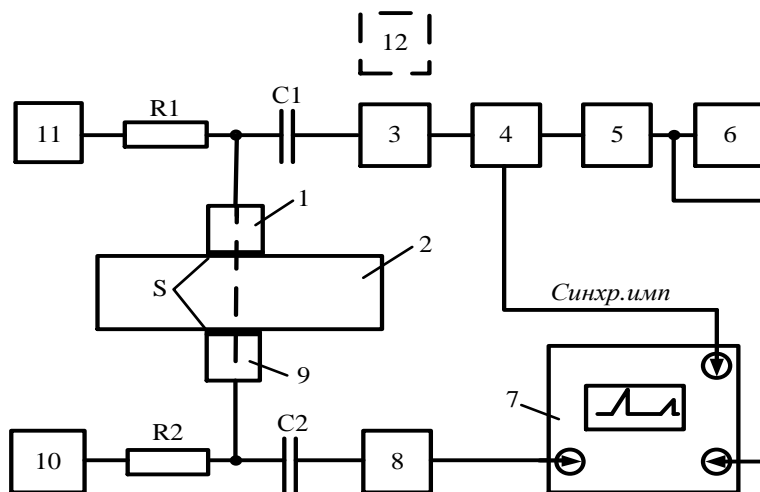


Рис. 7 – Блок-схема экспериментальной установки [35]

Реализация работы данной установки в лабораторных условиях достаточно сложная, так как преобразователи для возбуждения и приема УЗ колебаний, находящиеся на противоположных торцах преобразователя должны располагаться соосно (несоосность не более 0,1 мм).

Для контроля крупногабаритных изделий из неметаллических материалов, которые используются на предприятиях различных отраслей хозяйства, где применение традиционных пьезоэлектрических преобразователей для УЗ контроля не всегда применимо, ввиду ярко выраженной неравномерности частотной характеристики, авторами [36] был разработан емкостной датчик, работающий в низкочастотном диапазоне 0,1–20 кГц. Исследования показали, что на частотах до 2 кГц чувствительность емкостных преобразователей на 10–20 дБ выше чувствительности пьезоэлектрических, что дает возможность принимать сигнал акустической эмиссии от крупномасштабных разрушений. По данным исследований, на частотах выше 2 кГц амплитудно-частотные характеристики данного датчика и пьезопреобразователя совпадали. Отсутствие у ЕП собственных резонансов позволило использовать его для исследования модуля спектральной плотности и амплитудно-временных параметров сейсмоакустических сигналов.

Но для улучшения частотной характеристики ЕП на частотах ниже 2 кГц для снижения влияния паразитной емкости необходимо подбирать предварительный усилитель с как можно меньшей входной емкостью и размещением его непосредственно в корпусе преобразователя, а также уменьшать механическую связь между электродами путем выбора размеров электродов и их взаимной фиксации, что затрудняет реализацию датчика.

Коэффициент затухания, скорость распространения продольных и сдвиговых УЗ волн – важные информативные параметры при УЗ неразрушающем контроле материалов и изделий. Вопрос о точности и достоверности измерений этих физических величин, метрологическом обеспечении акустических измерений в твердых средах весьма актуален.

В настоящее время в качестве эталонных установок измерения скоростей распространения и коэффициентов затухания УЗ волн в металлах используются иммерсионные установки.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования иммерсионных вариантов измерения скорости и затухания УЗ колебаний в твердых средах со всей очевидностью доказали факт искажения амплитудно-фазовых характеристик УЗ волн на границе жидкость – твердая среда. Такое влияние границы существенно снижает точность

измерений и должно либо учитываться при оценке систематической составляющей погрешности измерений, либо исключаться из процедуры измерений применением бесконтактных методов измерений.

Примером служит разработанная установка описанная в [37-43] для измерения коэффициента затухания и скорости распространения продольных УЗ волн в твердых средах и передачи средствам измерений низшего разряда размера единицы этих физических величин. Она позволяет также измерять групповую скорость распространения сдвиговых волн. В установке ИЗУ-1 реализован емкостный метод генерации и приема УЗ колебаний, основанные на применении емкостных преобразователей (ЕП) с тонкопленочным оксидным диэлектриком.

Структурная схема установки приведена на рис.8, где 1 – генератор радиоимпульсов амплитудой 0-200 В, частотным диапазоном 1-25 МГц, длительностью 2-200 мкс; 2 – излучающий ЕП; 3 – образец толщиной 1-100 мм, диаметром 20-150 мм; 4 – приемный ЕП; 5 – регистрирующая аппаратура, включающая полосовой усилитель, осциллограф, блок измерения ослабления, состоящий из аттенуатора АД-30 и измерителя затуханий; 6 – спектроанализатор СК4-59. Ключ в положении *a* (на рис. 8) соответствует резонансному режиму работы.

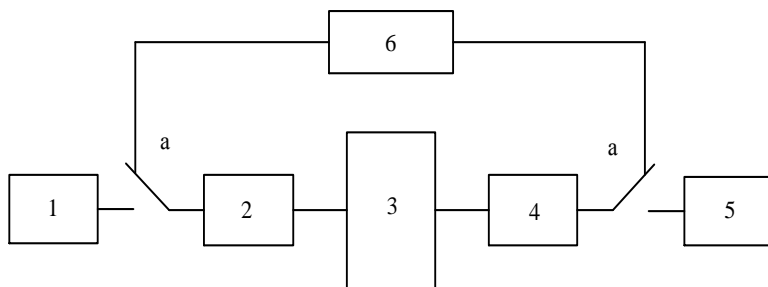


Рис. 8 – Структурная схема установки ИЗУ-1

Внешний вид установки (без приборной стойки) представлен на рис. 9. Масса оригинальной части не превышает 10 кг, а ее размеры составляют  $(50 \times 30 \times 20)$  см<sup>3</sup>. Стрелкой на рисунке 9 указан исследуемый образец.

Разработанную установку ИЗУ-1 использовали для исследований образцов из различных материалов, подвергшихся термомеханической обработке или без нее и изготовленных из проката различных видов [41]. Эксперименты проводили в резонансном и эхо-режимах. Для воз-

буждения и приема ультразвуковых колебаний использовали ЕП с диаметром рабочих поверхностей 10 и 20 мм. Установка позволяла измерять скорость продольных волн с погрешностью менее 0,1% (чувствительность  $\sim 0,01\%$ ) и коэффициент затухания продольных волн в диапазоне 5-900 дБ/м, с погрешностью менее 5% (чувствительность  $\sim 0,05$  дБ/м). В качестве образцов использовали плиты с плоскопараллельными рабочими поверхностями из стали, меди, латуни и т.д., шероховатость которых не превышала 0,05 мкм и непараллельность не более  $10^{-5}$  рад, также была необходима точная подстройка частоты под определенный образец, чтобы дифракционные эффекты проявлялись незначительно. Все вышесказанное свидетельствует о громоздкости и точности настройки установки для каждого типа образца, а также большие требования к вспомогательной аппаратуре.



Рис. 9 – Внешний вид установки ИЗУ-1

При решении ряда прикладных задач возникает необходимость определения акустических параметров в объектах, имеющих малую толщину [5, 42]. В этом случае применение традиционных эхоимпульсных методов нецелесообразно, так как для тонких образцов

---

*ISSN 2079-4525. Вісник НТУ «ХПІ».2015. № 19 (1128)* 45

они не обеспечивают требуемую точность измерения, а иногда их просто невозможно реализовать. Поэтому, для проведения измерений данной сложности разрабатываются новые методы и средства, где в качестве излучателя и приемника ультразвуковых колебаний все чаще применяют емкостные преобразователи [39–47], имеющие широкую полосу излучения и приема ультразвуковых импульсов, а так же главным преимуществом которых является бесконтактность проведения контроля. При этом, полученные результаты показывают [43], что емкостной метод позволяет определить качество тонкостенных изделий, в случае, когда применение оптических или радиационных методов – традиционных для подобных объектов, невозможно. Так же в [39, 42, 43] описывается возможность использования емкостных преобразователей для приема релеевских волн и волн Лемба, возбуждаемых любыми методами.

Подведя итоги работ [27–47] в данном направлении высокая сложность методик и необходимость учета множества различных факторов в процессе проведения измерений, что в свою очередь влечет за собой необходимость предъявления очень высоких требований к операторам эталонных установок. В работе [48] было разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее использовать существующие и разрабатываемые эталонные установки в совокупности с современными цифровыми приборами с целью образования информационно-измерительного комплекса по определению параметров распространения различных типов акустических волн в твердых средах. Автором предложен ряд методик измерений. Для импульсного режима предложены методики нахождения скорости сдвиговой составляющей импульса при наличии помехи, методика определения частотной зависимости скорости распространения и коэффициента затухания УЗ колебаний. Для резонансного режима предложена методика определения дополнительной дифракционной поправки при нахождении коэффициента затухания, а также методика определения коэффициента затухания и скорости ультразвуковых колебаний при наличии помехи, зависящей от частоты (при значениях коэффициента затухания до 2000 дБ/м). Предложенные методики позволяют повысить точность, а также расширить диапазон измерений соответствующих физических величин.

Последние исследования [49–55] были направлены на создание математической модели емкостного преобразователя в режиме возбуждения и приема ультразвуковых колебаний. Авторы утверждают, что такой способ возбуждения упругих импульсов высокой частоты позволяет оценить качество обработки поверхности объекта контроля, что

экспериментально не подтверждено.

Так же в [50–55] было указано, что акустические колебания в изделии возбуждаются силами взаимодействия электрических зарядов, приходящих на электропроводную поверхность после подачи поляризующего напряжения. Возникающий при этом избыточный заряд в объекте контроля, взаимодействуя с кристаллами решетки, создает упругие колебания в поверхностном слое изделия. Авторами проведен только расчет акустического смещения контролируемой поверхности, в зависимости от создаваемого давления, но не учтено распределение зарядов в поверхностном слое изделия. В [52, 53] приводятся ряд теоретических исследований, заключающихся в том, что частота возбуждающего поля практически не влияет на процесс затухания акустической волны в объекте контроля, что противоречит экспериментальным данным.

В работах [51, 56, 57] авторами разработан емкостной преобразователь излучения и приема акустических колебаний, который представляет собой две круглые пластины, находящиеся коаксиально друг относительно друга. При этом внутренний электрод служит излучателем, внешний, соответственно, приемником. Реализация такого преобразователя достаточно сложная конструктивно. Авторы утверждают, что при таком расположении электродов преобразователя повышается чувствительность контроля, но экспериментального подтверждения результатов исследований не приведено.

### **Выводы.**

1. В настоящее время ультразвуковой контроль изделий и материалов является наиболее распространенным средством для оценки качества материалов и изделий. Наиболее применяемыми при УЗ контроле являются контактные пьезоэлектрические датчики, которые считаются высокочувствительными. Которые обладают очевидными преимуществами, но имеют и существенный недостаток, заключающийся в необходимости применения контактной жидкости.

2. В связи с повышением требований к качеству выпускаемой и эксплуатируемой продукции, возникла острая необходимость в эффективном применении средств бесконтактного емкостного способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов. Емкостные датчики, по сравнению с традиционными методами УЗ контроля, имеют низкую чувствительность. В то же время, новый класс приборов, использующий емкостной способ, может дополнить традиционный метод при неразрушающем контроле металлоизделий: с высокой производительностью, с загрязненной поверхностью или с неэлектропроводными покрытиями и т.п.

3. Несмотря на значительный объем теоретических и экспериментальных исследований, посвященных созданию емкостных датчиков, недостаточно развита теория построения преобразователей такого типа. Не в достаточной степени исследованы и оптимизированы параметры и технологии применения емкостного способа. Не используются современные возможности борьбы с шумами и помехами. На низком уровне остается чувствительность емкостных датчиков. Недостаточно используются возможности математических методов и средств стремительно развивающейся вычислительной техники. Общность характера нерешенных вопросов позволяет ставить проблему по разработке комплекса научно-технических мероприятий по созданию нового дополнительного класса приборов, предназначенных для осуществления емкостного способа ультразвукового контроля.

4. В известной литературе [27–47] установки с использованием емкостных преобразователей нашли узкую область применения в виде эталонных лабораторных установок для прецизионных акустических измерений в твердых средах, определение упругой неоднородности материала образца, аттестация стандартных образцов по коэффициенту затухания продольных УЗ колебаний и по скоростям распространения продольных и сдвиговых акустических волн. Но свидетельств широкого их применения в области неразрушающего контроля так и не найдено. Следовательно, не разработаны емкостные преобразователи различного назначения с высокими эксплуатационными характеристиками. Их разработка сдерживается недостаточностью применения современной элементной базы, новых материалов и конструкций.

За счет применения новых принципов создания приборов, адаптации современных методов выделения полезных импульсов из шумов и помех, нетрадиционных схемно-технических решений возможно увеличение чувствительности и повышение эффективности работы и области применения емкостных преобразователей и приборов на их основе.

**Список литературы:** 1.Патон Б. Є. Неруйнівний контроль в Україні / Б. Є. Патон, В. О. Тройцький, Ю.М. Поспайко // Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. –2003. –№ 2(18). – С. 5–9.2.Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА способа / Г.М.Сучков// Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 67–70.3.Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий: дис. ... д-ра. техн. наук – Харьков : НТУ «ХПИ», 2005 – 521 с.4.Palmer S.B. Industrially viable non-contact ultrasound / S.B. Palmer, S. Dixon. // Insight. – 2003. – V. 45. – No. 3. – P.211–217.5.Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3 : Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 6. Буденков Г.А. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля. Обзор / Г.А. Буденков ,



С.Ю. Гурвич // Дефектоскопия. – 1983. – №5. – С. 5–33 **7.Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем. Изд.2. – Москва : Издательство иностранной литературы. – 1957. – 728 с. **8.Ермолов И.Н.** Неразрушающий контроль: практ. пособие: в 5 кн. кн. 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потанов ; под ред. В.В. Сухорукова. – М. : Высшая школа, 1991. – 283 с. **9.** Крауткреммер Й. Ультразвуковой контроль материалов: справ. изд. / Й. Крауткреммер, Г. Крауткреммер: пер. с нем. – М. : Металлургия, 1991. – 752 с. **10.** Глебова Л.В. Емкостные методы неразрушающего контроля / Л.В. Глебова, Г.М. Сучков // III Університетська науково-практична студентська конференція магістрів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 14-16 квітня 2009 р. : тези доп. частина 2 – Харків Ж НТУ «ХПІ», 2009. – С. 170-172. **11.**Сучков Г.М. Возможность приема ультразвуковых импульсов преобразователями емкостного типа. / Г.М. Сучков, С.Н. Глоба, Л.В. Глебова // Вестник НТУ «ХПИ»: Тематический выпуск "Приборы и методы неразрушающего контроля – НТУ «ХПИ». : Харків, 2007. – №35. – С. 29-32. **12.**Сучков Г.М. Дослідження факторів, які впливають на збудження акустичних імпульсів емнісним способом. / Г.М. Сучков, Л.В. Глебова // Вестник НТУ «ХПИ»: Тематический выпуск "Приборы и методы контроля и определения состава вещества" – НТУ «ХПИ». : Харків, 2008. – №48. – С. 116-123. **13.**Львов С.Г. Макет прибора для ультразвукового контроля емкостным способом / С.Г. Львов, Л.В. Глебова // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 41 – С. 128 – 131. **14.**Пат. 72010 (Україна), МПК G 01 N 29/34 (2006.01). Конденсаторний спосіб прийому акустичних сигналів при неруйнівному контролі / Глебова Л.В., Петрищев О.Н., Глоба С.М.; заявник і власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» – № у 2011 12741; заяв. 31.10.2011; надрук. 10.08.2012, Бюл. №15. **15.** Иванов А.Г. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности / А.Г. Иванов , С.А. Новиков // Приборы и техника эксперимента. – 1963. – №1. – С. 135–139. **16.** Микс. Емкостные микрофоны для ультразвуковых измерений в твердых телах / Микс, Петере, Арнольд // Приборы для научных исследований. – 1971. – 40. – С. 57-60. **17.** Ким. Самоустанавливающийся емкостный датчик для регистрации широкополосных ультразвуковых сигналов смещения / Ким, Сакэ // Приборы для научных исследований. – 1986. – №2. – С. 133–136. **18.** Bruneau A.H. Amplitude and phase measurement of vibration of radiation surfaces in order to determine the emitted sound field / A.H. Bruneau // Audio Engineering Society. –1983. –31, №12. – P. 907–913. **19.** Bindal V.N. A Broodhand Capacitive Transducer for Characterizing Pulsed Ultrasonic System / V.N. Bindal, T. K.Saksena, S.K.Yanis // Indian Journal of Technology. – 1984. – 22. – P. 397–400. **20.** Измерение слабых акустических волн при помощи емкостного датчика / В.Б. Брагинский, В.П. Митрофанов, Руденко В.Н., Хорев А.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1971. – № 4. – С. 241–244. **21.** Legros D. Generation of Ultrasound By a Dielectric Transduced. / D.Legros, I.Lewiner, P.Biguard // J. Acoust. Soc. Amer. –1979. – 52, №1. – P. 196–198. **22.** Гитис М.Б. Определение некоторых параметров датчиков ультразвуковых дефектоскопов / М.Б. Гитис, В.М., Добромислов, В.В. Сажин // Дефектоскопия. – 1971. – №1. – С. 51–57. **23.** Wadley H. N. G. A study of deformation and fracture processes in a low-alloy steel by acoustic emission transient analysis. / H. N. G.Wadley, C.B.Scruby // Acta Met. – 1979. – 27, №4. – P. 613–626. **24.** Болтарь К.О. Возбуждение ультразвуковых импульсов в твердых телах / К.О. Болтарь, Г.Д. Мансфельд // Приборы и техника эксперимента. – 1977. – №1. – С. 128–131. **25.** Болтарь К.О. Исследование диэлектрического электроакустического преобразователя. / К.О. Болтарь, И.М. Котеланский, Г.Д. Мансфельд // Акустический журнал. – 1977. – т. 23. – №4. – С. 544–549. **26.** Пябус Г.В. Установка для измерения коэффициента затухания ультразвука в твердых телах / Пябус Г.В., Мельканович А.Ф., Кушуклей Л.М. // Дефектоскопия. – 1987. – №2. – С. 57–63. **27.** Луговой Владимир Александрович. Оптические методы для метрологического обеспечения акустических измерений в конденсированных средах : диссертация ... д-ра физико-математических наук : 01.04.05, 01.04.06. – Хабаровск, 2004. – 337 с.: ил. РГБ ОД, 71 05-1/345. **28.** Кон-

дрыхтев, Александр Иванович. Исследование бесконтактных методов возбуждения ультразвуковых колебаний : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.06. – Хабаровск, 1983 173 с. : ил. РГБ ОД 61:85-1/353. **29.** Бондаренко А.Н. Возбуждение упругих колебаний емкостным методом / А.Н. Бондаренко, Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. 1979. № 6. С. 99–100.**30.** Дробот Ю.Б. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом/ Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1983. – № 3. – С. 36–41. **31.** Бондаренко А.Н. Применение емкостного метода для регистрации коротких акустических импульсов/ А.Н. Бондаренко, Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. – 1981. – №5. – С. 109–111. **32.** Кондратьев А.И. Метод приближенного расчета формы ультразвуковых импульсов/ А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. – 1985. – № 1. – С. 53–59. **33.** Луговой В.А. Высокостабильный емкостный преобразователь ультразвуковых сигналов / В.А. Луговой, В.П. Троценко // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – №3. – С. 194–195. **34.** Тонкопленочный самоустанавливающийся емкостный преобразователь ультразвуковых сигналов / А.Н. Бондаренко, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 197–199. **35.** Измерение скорости продольных у.з. волн емкостными преобразователями / В.И. Архипов, Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1988. – № 2. – С. 90–94. **36.** Кондратьев А.И. Исследование работы емкостного преобразователя в низкочастотном диапазоне / А.И. Кондратьев, И.А. Кривошеев // Дефектоскопия. – 1989. – № 7. – С.13–17. **37.** Кондратьев А.И. Прецизионные измерения скорости и затухания ультразвука в твердых телах / А.И. Кондратьев // Акустический журнал. – 1990. – Т. 36. – №3. – С. 470–476. **38.** Кондратьев А.И. Датчик акустических сигналов для высокоточных измерений/ А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1990. – № 3. – С. 30–38. **39.** Кондратьев А.И., Измерение скорости и затухания Рэлеевских волн емкостным преобразователем / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Измерительная техника. – 1991. – №5. – С. 43–44. **40.** Гусаков С.А. Образцовая установка для измерения акустических параметров материалов/ С.А. Гусаков, А.И. Кондратьев // Измерительная техника. – 1989. – №7. – С.50–52. **41.** Архипов В.И. О качестве образцов для ультразвуковых измерений / В.И. Архипов, А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. – 1991. – № 10. – С. 41–48. **42.** Кондратьев А.И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред. В двух частях. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. – 2006. – 152 с. **43.** Кондратьев А. И. Измерение скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в тонких образцах /А. И. Кондратьев, А. А. Кондратьев, В. И. Римлянд, К. А. Драчѳев // Вестник ТОГУ. – 2013. № 4(31). – С. 17-24. **44.** Кондратьев А.И. Емкостный широкополосный датчик сигналов акустической эмиссии / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Акустическая эмиссия. Неразрушающий контроль :IV междунар. конф. : тезисы докл. – Москва, 1998 – С. 47. **45.** Луговой В.А. Широкополосный емкостный приемник акустических сигналов / В.А. Луговой // Сейсмоакустика переходных зон : материалы 3-го Всероссийского симпозиума. - Владивосток, 2003. – С.56–58. **46.** Пат. RU 2137118, МПК G 01 N 27/22. Самокалибрующийся емкостной преобразователь / Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Казарбин А.В.; заявитель и патентообладатель : Хабаровский государственный технический университет – № 97120210/28 ; заяв. 04.12.1997; опубл. 10.09.1999. **47.** Пат. RU 2140072, МПК G 01 N 27/22. Способ контроля и стабилизации чувствительности емкостного преобразователя / Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Казарбин А.В.; заявитель и патентообладатель : Хабаровский государственный технический университет – № 97120202/28 ; заяв. 04.12.1997; опубл. 20.10.1999. **48.** Король, Андрей Александрович. Алгоритмическое и программное обеспечение измерительного комплекса для определения параметров распространения различных типов акустических волн в твердых средах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.16 / Король Андрей Александрович; [Место защиты: Тихоокеан. гос. ун-т].- Хабаровск, 2011.- 140 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/2448. **49.** Глебова Л.В. Возбуждение ультразвуковых колебаний емкостным преоб-

зователем. / Л.В. Глебова, И.В. Тюпа, А.Л. Григорьев, С.Н. Глоба // – Вестник НТУ "ХПИ". – Харків: НТУ «ХПИ», 2010. – Вип. 12. – С. 192–195. **50.** Григорьев А.Л. Математическая модель емкостного метода возбуждения колебаний в упругих средах. / А.Л. Григорьев, И.В. Тюпа, Л.В. Глебова // Вісник НТУ"ХПИ": Тематичний випуск "Математичне моделювання в техніці та технологіях" – 2010. – №68. – С.38–51. **51.** Горкунов Б.М. Емкостной преобразователь в режиме возбуждения и приема ультразвуковых колебаний. / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, Л.В. Глебова // – Методы та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, – 2010. – №. 25. – С. 10–16. **52.** Горкунов Б.М. Теория возбуждения и приема акустических волн емкостным преобразователем / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, Л.В. Глебова // ТД и НК. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, МА «Сварка», 2011. – №3. – с. 35-39. **53.** Глебова Л.В. Выбор режимов работы емкостного преобразователя акустических колебаний/ Л.В. Глебова // Вісник НТУ «ХПИ» . – Харків : НТУ «ХПИ», 2011. – Вип. 19. – с. 98-101. **54.** Глебова Л.В. Исследования емкостного преобразователя возбуждения ультразвуковых колебаний / Л.В. Глебова, И.В. Тюпа // Радиоэлектроника та молодь в ХХІ віці : 15-й ювілейний міжнародний молодіжний фору., 18 – 20 квітня 2011 р. : тези доп. – Харків, 2011. – С. 203-204. **55.** Львов С.Г. Требования к аппаратуре для неразрушающего контроля с использованием емкостного способа / С.Г. Львов, Л.В. Глебова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія освіти, здоров'я: Анотації доповідей ХХ міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 травня 2012р. – Харків: НТУ "ХПИ" – Ч. II – С. 151. **56.** Capacitance method excitation and reception acoustic waves / Gorkunov B.M., Tiupa I.V., Zaitzeva L.V., Mitko Mihovski // Defectoscopy'13. Conference proceedings "NTD days 2013" : XXVIII International Conference: June 17-21, 2013. – Sozopol. Bulgaria, 2013.– P. 411–413. **57.** Пат. 60639 (Україна), МПК G01N 29/34 (2006.01). Перетворювач збудження прийому ультразвукових акустичних хвиль лавторів / Горкунов Б.М., Тюпа І.В., Глебова Л.В. Заявник і власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» – № у 201112741 ; заяв. 31.10.2011 ; надрук. 25.06.2011, Бюл. № 12.

**Bibliography (transliterated):** 1. Paton, B. Ye., Troitskiy, V. A., Posypayko, YU.M. "Nerazrushayushchiy kontrol' v Ukraine. " *Inform. byul. Ukrainskogo obshchestva nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoy diagnostiki* 2 (18) (2003): 5-9. Print. **2.** Suchkov, G. M. "O glavnom preimushchestve EMA sposoba. " *Defektoskopii* 10 (2000): 67-70. Print. **3.** Suchkov, G.M. *Razvitiye teorii i praktiki sozdaniya priborov dlya elektromagnitnogo -akusticheskogo kontrolya metalloizdeliy. Dis. ... d-ra tehn. nauk.* Kharkov, 2005. Print. **4.** Palmer, S.B. and Dixon S. "Industrially viable non-contact ultrasound. " *Insight*. Vol. 45. No. 3 P.211–217. **5.** *Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: v 8 t.* Pod obshh. red. V. V. Kljueva. T. 3. *Ul'trazvukovoy kontrol'.* Moscow: Mashinostroenie, 2004. Print. **6.** Budenkov, G.A. and Gurvich, S.YU. "Sovremennoye sostoyaniye beskontaktnykh metodov i sredstv ul'trazvukovogo kontrolya. Obzor. " *Defektoskopii* No. 5 (1983): 5-33. Print. **7.** Bergman, L. *Ul'trazvuk i yego primeneniye v nauke i tekhnike.* Per. S nem. Izd.2 Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1957. Print. **8.** *Nerazrushayushchiy kontrol' : prakticheskoy. posobiye* : v 5 kn. kn. 2. Yermolov, I.N., Aleshin, N.P., Potapov, A.I.; pod red. V.V. Sukhorukova. Akusticheskiye metody kontrolya. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. Print. **9.** Krautkremmer, I., Krautkremmer, G. *Ul'trazvukovoy kontrol' materialov:* Moscow: Metallurgiya, 1991. Print. **10.** Glebova, L.V., Suchkov, G. M. "Yemkostnyye metody nerazrushayushchego kontrolya. " III Universitetskaya nauchno-prakticheskaya studencheskaya konferentsiya magistrrov Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta « Khar'kovskiy politekhnicheskiy institut», tezisy dop. chast' 2 NTU «KhPI» : Kharkov, 2009. 170-172. Print. **11.** Suchkov, G.M., Globa, S. N., Glebova, L.V. "Vozmozhnost' priyema ul'trazvukovykh impul'sov preobrazovatelyami yemkostnogo tipa. " *Vestnik NTU « KhPI ».* *Tematich. vypusk Pribory i metody nerazrushayushchego kontrolya.* No 35. Kharkov : NTU « KhPI », 2007. 29–32. Print. **12.** Suchkov, G.M., Glebova, L.V. "Issledovaniye faktorov, vliyayushchikh na vobuzhdeniye akusticheskikh impul'sov yemkostnym

sposobom. " *Vestnik NTU «KhPI» Tematich. vypusk Pribory i metody kontrolya i opredeleniya sostava veshchestva*. No 48. Kharkov : NTU «KhPI», 2008. 116-123. Print. **13**. L'vov, S. G., Glebova, L.V. " Maket pribora dlya ul'trazvukovogo kontrolya yemkostnym sposobom. " *Vestnik NTU «KhPI»*. No 41. Kharkov : NTU «KhPI», 2012. 128–131. Print. **14**. Pat. 72010 (Ukraina), MPK G 01 N 29/34 ( 2006.01 ) . " Kondensatornyy sposob priyema akusticheskikh signalov pri nerazrushayushchemu kontrolyu. " Glebova, L.V., Petrishchev, A.N. , Globa, S.M. *Zajavnik ta patentovlasnik*Natsional'nyy tekhnicheskyy universitet « Khar'kovskiy politekhnicheskyy institut» No. u 2011 12741 ; zayavleniy. 31.10.2011 ; na pechat' . 10.08.2012 , Byul. №15. Print. **15**. Ivanov, A.G., Novikov, S.A. " Metod yemkostnogo datchika dlya registratsii mgnovennoy skorosti dvizhushcheyssa poverkhnosti. " *Pribory i tekhnika eksperimenta* No. 1 (1963): 135–139. Print. **16**. Miks , Petere , Arnol'd " Yemkostnyye mikrofony dlya ul'trazvukovykh izmereniy v tverdykh telakh. " *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy* No. 40 (1971): 57–60. Print. **17**. Kim, Sake. " Samoustanavlivayushchiysya yemkostnyy datchik dlya registratsii shirokopolosnykh ul'trazvukovykh signalov smeshcheniya. " *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy*. No. 2 (1986): 133–136. Print. **18**. Bruneau A.H. " Amplitude and phase measurement of vibration of radiation surfaces in order to determine the emitted sound field. " *Audio Engineering Society*. No. 12 (1983): 907–913. Print. **19**. Bindal, V.N., Saksena, T. K., Yanis, S.K. " A Broadband Capacitive Transducer for Characterizing Pulsed Ultrasonic System. " *Indian Journal of Technology*. No. 12 (1984): 397–400. Print. **20**. Braginsky, V.B. et al. " Izmereniye slabykh akusticheskikh voln pri pomoshchi yemkostnogo datchika. " *Pribory i tekhnika eksperimenta*. No. 4 (1971): 241–244. Print. **21**. Legros, D., Lewiner, I., Biguard, P. " Generation of Ultrasound By a Dielectric Transduced. " *J. Acoust. Soc. Amer.* Vol. 52, No. 1 (1979): 196–198. Print. **22**. Gitis, M.B., Dobromyslov V.M., Sazhin ,V.V. " Opredeleniye Nekotorykh parametrov datchikov ul'trazvukovykh defektoskopov. " *Defektoskopii* No. 1 (1971): 51–57. Print. **23**. Wadley, H. N. G., Scruby, C.B. " A study of deformation and fracture processes in a low-alloy steel by acoustic emission transient analysis. " *Acta Met.* Vol. 27, No. 4 (1979): 613–626. Print. **24**. Boltar', K.A., Mansfel'd, G.D. " Vozbuzhdeniye ul'trazvukovykh impul'sov v tverdykh telakh. " *Pribory i tekhnika eksperimenta*. No. 1 (1977): 128–131. Print. **25**. Boltar', K.A. Kotelanskiy, I.M. and Mansfel'd G.D. " Issledovaniye dielektricheskogo elektroakusticheskogo preobrazovatelya. " *Akusticheskyy zhurnal* .Vol. 23. No. 4 (1977): 544–549. Print. **26**. Pyabus G.V., Mel'kanovich A.F. and Kushkuley L.M. " Ustanovka dlya izmereniya koeffitsiyenta zatukhaniya ul'trazvuka v tverdykh telakh. " *Defektoskopii*. No. 2 (1987): 57–63. Print. **27**. Lugovoy Vladimir Aleksandrovich. *Opticheskiye metody dlya metrologicheskomu obespecheniya akusticheskikh izmereniy v kondensirovaniykh sredakh*. Dis. ... d-r fiziko -matematicheskikh nauk. Khabarovsk , 2004. Print. **28**. Kondrat'yev, Aleksandr Ivanovich . *Issledovaniye beskontaktnykh metodov vozbuzhdeniya ul'trazvukovykh kolebaniy* : Dis. ... kandidata fiziko -matematicheskikh nauk. Khabarovsk , 1983. Print. **29**. Bondarenko A.N., Drobot YU.B. and Kondrat'yev A.I. " Vozbuzhdeniye uprugikh kolebaniy yemkostnym metodom. " *Defektoskopii*. No. 6 (1979): 99–100. Print. **30**. Drobot YU.B., Kondrat'yev A.I. and Lugovoy V.A. " Vozbuzhdeniye korotkikh uprugikh impul'sov yemkostnym metodom. " *Defektoskopii*. No. 3 (1983): 36–141. Print. **31**. Bondarenko A.N., Drobot YU.B. and A.I. Kondrat'yev. " Primeneniye yemkostnogo metoda dlya registratsii korotkikh akusticheskikh impul'sov. " *Defektoskopii* . No. 5 (1981): 109–111. Print. **32**. Kondrat'yev A.I. "Metod priblizheniya rascheta formy ul'trazvukovykh impul'sov defektoskopii. " *Defektoskopii*. No.1 (1985): 53–59. Print. **33**. Lugovoy V.A., Trotsenko V.P. " Vysokostabil'nyy yemkostnyy preobrazovatel' ul'trazvukovykh signalov. " *Pribory i tekhnika eksperimenta*. No. 3 (1986): 194–195. Print. **34**. Bondarenko A.N., Kondrat'yev A.I. and Lugovoy V.A. " Tonkoplenochnyye samoustanavlivayushchiysya yemkostnyy preobrazovatel' ul'trazvukovykh signalov. " *Pribory i tekhnika eksperimenta*. No. 2 (1988): 197–199. Print. **35**. Arkhipov V.I. et al. " Izmereniye skorostiprodol'nykh U.Z. volnyemkostnym preobrazovatelyami. " *Defektoskopii* . No. 2 (1988): 90–94. Print. **36**. Kondrat'yev A.I., Krivosheyeva I.A. " Issledovaniye raboty yemkostnogo preobra-

zovatelyavnizkochastotnogodiapazone. " *Defektoskopii* . No. 7 (1989): 13–17. Print. **37.**Kondrat'yev A.I. " Pretsizionnyye izmereniya skorosti zatukhanyaul'trazvukovykh tverdykh telakh. " *Akusticheskii zhurnal* . Vol. 36. No. 3 (1990): 470–476. Print. **38.**Kondrat'yev A.I., Lugovoy V.A. " Datchik akusticheskikh signalov dlya vysokotochnykh izmereniy. " *Defektoskopii* . No. 3 (1990): 30–38. Print. **39.**Kondrat'yev A.I., Lugovoy V.A. " Izmereniya skorosti zatukhanyarelyevskim volnym preobrazovatelem. " *Izmeritel'nayatekhnika*. No. 5 (1991): 43–33. Print. **40.**Gusakov S.A., Kondrat'yev A.I. " Obraztsovaya ustanovkadiya izmereniya akusticheskikh parametrov materialov. " *Izmeritel'nayatekhnika*. No. 7 (1989): 50–52. Print. **41.**Arkhipov V.I., Kondrat'yev A.I. " Okachestve obratnoy volny ul'trazvukovykh izmereniy. " *Defektoskopii*. No. 10 (1991): 41–48. Print. **42.** Kondrat'yev A.I. " *Pretsizionnyye metody i sredstva izmereniya akusticheskikh velichin tverdykh sred.* " V dvukh chastyakh. Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2006. Print. **43.** Kondrat'yev A. I. et al. " Izmereniya skorosti rasprostraneniya i koefitsiyent zatukhanyaprodol'nykh voln v tonkikh obratsakh. " *Vestnik TOGU* . No. 4 (31) (2013): 17–24. Print. 2013. **44.**Kondrat'yev A.I., Lugovoy V.A. " *Yemkostnyy širokopolosnyy datchik signalov akusticheskoy emissii.* " Akusticheskaya emissiya. Nerazrushayushchiy kontrol' : IV mezhdunar. konf. : Tezisy dokl. **Moscow**, 1998. 47. Print. **45.** Lugovoy V.A. " Shirokopolosnyy yemkostnyy priyemnik akusticheskikh signalov. " Seysmoakustika perekhodnykh zon : materialy 3-go Vserossiyskogo simpoziuma : Vladivostok , 2003. 56–58. Print. **46.** Pat. RU 2137118 , MPK G 01 N 27/22 . " Samokalibrnyushchiyya yemkostnoy preobrazovatel' . " Kondrat'yev A.I. , Rimlyand V.I. , Kazarbin A.V. ; *zayavitel' i patentoobladatel'* : Khabarovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet No 97120210/28 ; *zayavleniy.* 04.12.1997 ; opubl. 10.09.1999/ Print. **47.** Pat. RU 2140072 , MPK G 01 N 27/22 . " Sposob kontrolya i stabilizatsii chuvstvitel'nosti yemkostnogo preobrazovatelya " Kondrat'yev A.I. , Rimlyand V.I. , Kazarbin A.V. ; *zayavitel' i patentoobladatel'* : Khabarovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet. No 97120202/28 ; *zayavleniy.* 04.12.1997 ; opubl. 20.10.1999. Print. **48.** Korol' , Andrey Aleksandrovich . *Algoritmicheskoye i programmnoye obespecheniye izmeritel'nogo kompleksa dlya opredeleniya parametrov rasprostraneniya razlichnykh tipov akusticheskikh voln v tverdykh sredakh.* Dis. ... kandidata fiziko -matematicheskikh nauk. Khabarovsk , 2011. Print. **49.** Glebova L.V. et al. " Vozbuzhdeniye ul'trazvukovykh kolebaniyemkostnym preobrazovatelem. " - *Vestnik NTU "KHPI"*. No. 12. Kharkiv : NTU «KhPI» , 2010. 192–195. Print. **50.** Grigor'yev A.L., Tyupa I.V. and Glebova L.V. " Matematicheskaya model' yemkostnogo metoda vozbuzhdeniya kolebaniy v uprugikh sredakh. " *Vestnik NTU "KHPI" : Tematicheskyy vypusk : Matematicheskoye modelirovaniye v tekhnike i tekhnologiyakh.* No. 68. Kharkiv : NTU «KhPI» , 2010. - 2010. 38–51. Print. **51.**Gorkunov B.M., Tyupa I.V. and Glebova L.V. " Yemkostnoy preobrazovatel' vrezhimevozbuзhdeniya priyemaul'trazvukovykh kolebaniy. " *Metody i pribory kontrolya kachestva.* No. 25. Ivano-Frankivsk : IFNTUNG , 2010. 10–16. Print. **52.** Gorkunov B.M., Tyupa I.V. and Glebova L.V. " Teoriya vozbuзhdeniya i priyema akusticheskikh voln yemkostnym preobrazovatelem. " *TD i NK.* No. 3. Kiyv : IES im. Ye.O. Patona NAN Ukrainy , MA «Ssora» , 2011. 35-39. Print. **53.** Glebova L.V. " Vybor rezhimov raboty yemkostnogo preobrazovatelya akusticheskikh. " *Vestnik NTU "KhPI"*. No. 19. Kharkiv : NTU «KhPI» , 2011. 98–101. Print. **54.** Glebova L.V., Tyupa I.V. " Issledovaniya yemkostnogo preobrazovatelya vozbuзhdeniya ul'trazvukovykh kolebaniy. " Radioelektronika i molodezh' v XXI vozraste: 15-y yubileynyi mezhdunarodnyy molodezhnyy foru. , 18 - 20 aprelya 2011 : tezisy dop : Kharkiv , 2011. 203–204. Print. **55.** L'vov S. G., Glebova L.V. " Trebovaniya k apparature dlya nerazrushayushchego kontrolya s ispol'zovaniyem yemkostnogo sposoba. " Informatsionnyye tekhnologii: nauka , tekhnika , tekhnologiya obrazovaniye , zdorov'ye : annotatsii dokladov XX mezhdunar. nauchno-prakticheskoy. konf., 15-17 maya 2012. Vol. 2. Kharkiv : NTU " KhPI" , 2012. 151. Print. **56.** Gorkunov B.M. et al. " Capacitance method excitation and reception acoustic waves. " Defectosopia'13. Conference proceedings "NTD days 2013" : XXVIII International Conference: June 17-21, 2013. Sopol. Belgapia , 2013. 411–413. Print. **57.** Pat. 60639 (Ukraina), MPK G01N 29/34 ( 2006.01 ) . " Preobrazovatel' vozbuзhdeniya i priyema ul'trazvukovykh akusticheskikh voln avtorov " Gorkunov B.M.,

УДК 371.134

**А. Г. ПРОТАСОВ**, д-р пед. наук, доц. НТУ «ХПИ»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ**

В работе предлагается использовать метод компьютерного моделирования для исследования возможностей теплового неразрушающего контроля для диагностики состояния сотовых панелей, применяемых в конструкциях летательных аппаратов. Для моделирования был использован пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics, позволяющий моделировать технические задачи, в основе которых лежит решение дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве модели для исследования была использована трехмерная модель сотовой панели. В результате проведенных исследований были определены оптимальные параметры контроля для обнаружения дефектов типа отслоение обшивки и наличие воды в заполнителе. Л.: 5. Бібліогр.: 6 наз.

**Ключевые слова:** сотовая панель, компьютерное моделирование, трехмерная модель.

**Введение.** В современном авиастроении широко используются сотовые конструкции, которые отличаются высокой прочностью при малом удельном весе. В самолетах последнего поколения более 30% площади фюзеляжа, крыла, киля и других частей самолета изготавливаются из таких материалов. Сотовая панель состоит из двух листов обшивки, между которыми находится сотовая структура. Несущие конструкции самолета выполняются, как правило, из сплавов алюминия, а в качестве заполнителя используют алюминиевую фольгу. Основными дефектами сотовых конструкций являются отслоение обшивки от заполнителя, вследствие непрочности или смятия сот. Эти дефекты могут возникать как при эксплуатации летательного аппарата, так и вовремя изготовления сотовой панели в результате нарушения технологического процесса. Наиболее опасным дефектом считается попадание воды в сотовые структуры элементов самолета. При низких температурах вода замерзает и увеличивает свой объем, что приводит к разрушению ячеек сот и существенно снижает прочность всей конструкции панели. Проблемой является своевременное выявление этих дефектов.

© А. Г. Протасов, 2015

**Анализ последних исследований.** Для выявления упомянутых дефектов используют различные методы контроля. Наиболее применяемые – метод механического импеданса, радиационный, ультразвуковой и др. методы неразрушающего контроля. Однако большинство из указанных методов имеют ряд недостатков, которые сужают область их применения. Метод механического импеданса является трудоемким и имеет низкую производительность контроля [1]. Рентгеновский метод требует двустороннего доступа к элементам конструкции, что не всегда выполнимо и реализуется при помощи дорогостоящего оборудования. Ультразвуковой метод является контактным и имеет низкую производительность контроля. Последнее время, для диагностики сотовых конструкций стали применять и тепловой метод контроля, который имеет определенные преимущества по сравнению с традиционными [2, 3]. В первую очередь это производительность контроля и возможность автоматизации его процесса. Этот метод нашел успешное применение для контроля состояния элементов конструкций самолетов в таких компаниях, как Airbus Industry и Boeing [4, 5]. Однако возникает ряд вопросов связанных с обнаружением дефектов в сотовых конструкциях, выполненных из сплавов алюминия. Проблему создает высокая теплопроводность таких конструкций, которая является причиной быстротечности тепловых процессов в объекте, что затрудняет процедуру контроля.

**Цель статьи.** Предлагается исследовать возможности теплового метода контроля сотовых панелей, используя компьютерное моделирование, которое позволит визуализировать невидимые для исследователя процессы и определить оптимальные режимы контроля.

**Постановка проблемы.** Для реализации предложенного метода используем пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics, который является интерактивной средой для моделирования научных и технических задач, в основе которых лежит решение дифференциальных уравнений в частных производных. Система COMSOL позволяет формировать модели физических объектов с заданными параметрами и свойствами, разрабатывать систему уравнений, которая полностью описывает эту модель. COMSOL имеет несколько взаимосвязанных между собой прикладных режимов и за счет внутренних средств, для этих режимов создается возможность построения системы уравнений. Для решения системы уравнений в частных производных система использует метод конечных элементов. Программное обеспечение выполняет конечно-элементный анализ одновременно с адаптивным построением сетки, при этом используется целый ряд численных решателей. Ядро COMSOL дает пользователю возможность моделирования и

анализа во многих прикладных областях [6]. Рассмотрим возможности системы COMSOL для решения прямой задачи теплового контроля сотовых панелей на примере трехмерной модели.

В качестве модели построим сотовую конструкцию, которая имеет два вида дефектов – отслоение обшивки от сотового заполнителя и наличие воды в ячейке соты. Верхняя обшивка панели нагревается от внешнего источника тепла. Процесс нагрева модели объекта контроля описывается трехмерным нестационарным уравнением теплопроводности:

$$c_n \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_n \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right);$$

где  $T$  – температура,  $t$  – текущее время,  $x, y, z$  – пространственные координаты точек, которые анализируются в  $n$ -й области.

$$(x, y, z) \in \sum_{n=1}^3 M_n; c_n, \rho_n, \lambda_n;$$

где  $c_n, \rho_n, \lambda_n$  теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности соответственно в  $n$ -й области,  $n=1$  соответствует материалу сотовой панели,

$n=2$  –воздушный дефект,  $n=3$  – вода в заполнителе.

На границах областей М1 и М2 (объект – воздушный дефект), а также М1и М3 (объект – вода) имеет место условие термического сопряжения, т.е. граничные условия 4-го рода. Верхняя поверхность сотовой панели нагревается от внешнего источника, поэтому на этой поверхности будут действовать граничные условия в виде:

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big| = q(t);$$

$$q(t) = \begin{cases} Q & \text{при } 0 < t < t_n \\ Q & \text{при } t < 0 \text{ или } t > t_n. \end{cases}$$

Здесь  $Q$ -плотность теплового потока от источника нагрева. Остальные наружные поверхности панели участвуют в процессе теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона, что соответствует граничным условиям 3-го рода. Начальные условия могут быть заданы следующим образом:  $T|_{t=0} = T_0$ .

**Материалы исследований.** Созданная для исследования трехмерная модель сотовой панели представлена на Рис.1, где М1 соответствует области, выполненной из материала панели (алю-



миний), M2 представляет область отслоения обшивки (воздушный дефект) и M3—область, заполненная водой.

На Рис.2 схематично показано сечение созданной модели, которая имеет следующие размеры: расстояние между верхней и нижней обшивками – 10 мм, толщина обшивки – 0,5 мм, толщина заполнителя (алюминиевая фольга) – 0,2 мм, раскрытие воздушного дефекта – 0,4 мм .

В процессе компьютерного исследования трехмерная модель сотовой панели нагревалась до температуры от 303 до 353К. После окончания нагрева, с временным шагом в 0,1 сек, было получено семейство термопрофилей с верхней и нижней поверхности панели.

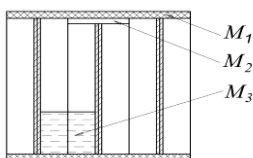
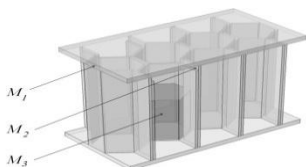


Рис. 1. Общий вид трехмерной модели      Рис. 2. Схема сечения панели

Это позволило определить оптимальное время контроля, т.е. время при котором наступает максимальная разность температур между дефектным и бездефектным участками панели, что существенно повышает чувствительность метода контроля.

**Результаты компьютерного моделирования.** На Рис. 3 показаны термограммы верхней (а) и нижней (б) обшивки сотовой панели с дефектом. В качестве дефекта рассматривалось отслоение верхней обшивки панели от одной ячейки заполнителя, а также наличие воды в той же ячейке (см. схему на Рис. 2).

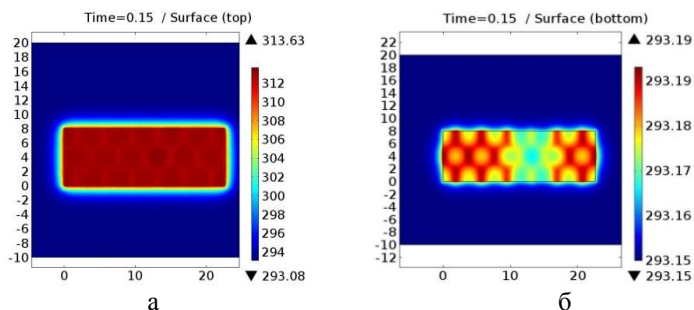


Рис. 3. Термограммы сотовой панели с дефектом: а – термограмма верхней обшивки, б – термограмма нижней обшивки панели

Нагрев производился со стороны верхней обшивки до температуры 313 К, термограммы были получены через 0,15 сек после окончания нагрева. Как видно из рисунка, термограмма верхней обшивки панели не несет информации о наличии дефекта в структуре. В тоже время на термограмме нижней обшивки отчетливо просматривается искажение температурного поля, вызванное наличием дефекта. Это объясняется высокой теплопроводностью алюминиевой конструкции.

В результате компьютерного моделирования были получены результаты, которые невозможно получить экспериментальным путем. Рис. 4. демонстрирует распределение температурного поля внутри

дефектной структуры (сечение, выполненное вдоль центральной оси панели). На термограмме видны температурные аномалии в области дефекта структуры.

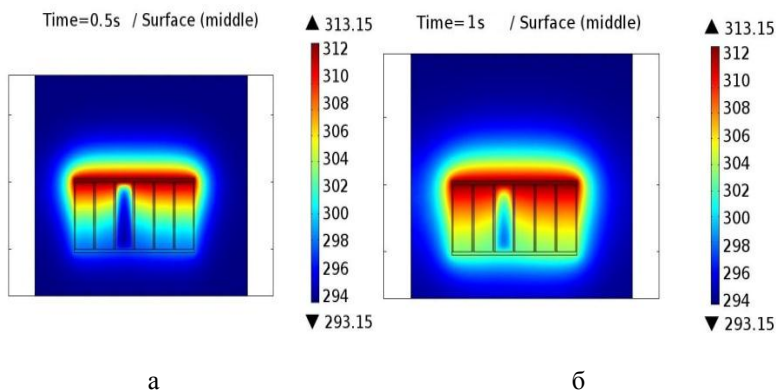


Рис. 4. Термограммы сечения сотовой панели с дефектом: а – 0, 5 сек, б – 1 сек после начала нагрева

Компьютерная реализация теплового контроля позволила получить временные зависимости температурного профиля обшивок (Рис.5а), а также временные зависимости разности температур между дефектным и бездефектным участками объекта, что и является критерием дефектности (Рис.5б).

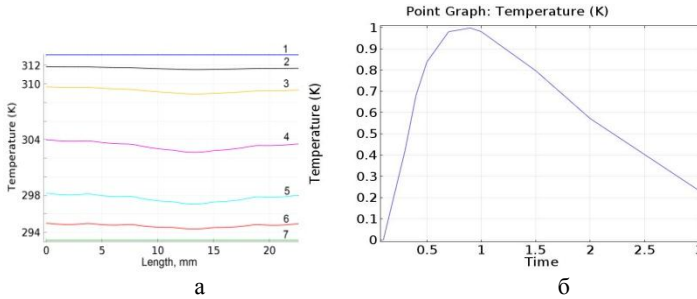


Рис. 5. Временные зависимости: а - температурного профиля верхней поверхности (1 - 0,5 сек), нижней поверхности панели (2 - 0,1 сек; 3 - 0,2 сек; 4 - 0,3 сек; 5 - 0,4 сек; 6 - 2 сек; 7 - 3 сек), б - разности температур между дефектным и бездефектным участками

На Рис. 5 а показано распределение температуры на верхней (кривая 1) и нижней (кривые 2-7) поверхности панели в различные моменты времени. В промежутке времени 0,3 – 0,4 сек (кривые 4 и 5) наблюдается искажение термопрофиля нижней поверхности, которое с течением времени исчезает. Рис. 5 б демонстрирует оптимальное время контроля для данной температуры нагрева. В данном случае оптимальная температура нагрева объекта - 313К, оптимальное время контроля – 0,6-1 сек.

**Выводы.** Полученные результаты подтверждают возможность применения пакета прикладных программ COMSOL Multiphysics для исследования процессов, протекающих при активном тепловом контроле сотовых панелей, выполненных из металлов. Компьютерное моделирование позволяет визуализировать тепловые процессы, протекающие в объекте во время контроля, определить оптимальные значения таких параметров процесса контроля как температура нагрева объекта и время проведения контроля. Пакет программ COMSOL Multiphysics дает возможность варьировать размерами и материалом объекта контроля.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение геометрических размеров воздушных дефектов в объекте, а также оценке количества влаги в сотовой структуре.

**Список литературы:** 1. Протасов А. Г. Влияние параметров сотовой конструкции на выявляемость дефектов при контроле импедансным методом / А.Г. Протасов, О.С. Юрченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, Киев, 2006. - №3.- С. 48-51. 2. Нестерук Д.А. Особенности применения теплового метода неразрушающего контроля для обнаружения и оценки массы воды в сотовых панелях авиационной тех-

ники. / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов //Известия ТПУ, 2004. - №6, том 307. - С. 62-65.3.Стороженко В.А.Обработка результатов тепловой дефектоскопии сотовых конструкций с целью понижения уровня помех/ В.А.Стороженко, О.В. Лазоренко, А. В. Мягкий// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 108–112. 4. A318/A319/A320/A321 Nondestructive testing manual, Part 10, A. 55-20-06 – Thermographic, Page block 1001.5. Boeing 777, Nondestructive testing manual, Part 9 – Thermography, 51-00-01, 51-00-02, 51-00-03.6.Егоров В.И.ПрименениеЭВМдлярешениязадачтеплопроводности. Учебное пособие / В.И. Егоров– СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77с.

**Bibliography (transliterated):**1. Protasov A. G. "Vlijanie parametrov sotovoj konstrukcii na vujavljaemost' defektov pri kontroleimpedansnym metodom". Tehnicheskajadiagnostika i nerazrushajushhij kontrol', Kiev, 2006. - No3.. 48-51. Print.2. Nesteruk D.A, Vavilov V.P. "Osobennosti primenenija teplovogo metoda nerazrushajushhego kontrolja dlja obnaruzhenija i ocenki massy vody v sotovyh paneljah aviacionnoj tehniki". Izvestija TPU, 2004. –No 6, Vol 307. 62-65.Print.3. Storozhenko V.A. Lazorenko O.V., Mjagkij A. V. "Obработка rezul'tatov teplovoj defektoskopii sotovyh konstrukcij s cel'ju poni-zhenija urovnja pomeh". Visnik NTU «KhPI». Serija: Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika. – H. : NTU «KhPI», 2013. –No 34 (1007). 108–112. Print.4. A318/A319/A320/A321 Nondestructive testing manual, Part 10, A. 55-20-06 – Thermographic, Page block 1001. Print. 5. Boeing 777, Nondestructive testing manual, Part 9 – Thermography, 51-00-01, 51-00-02, 51-00-03. Print. 6. Egorov V.I. Prime-nenie JeVM dlja reshenija zadach teploprovodnosti. Uchebnoe posobie – SPb: SPb GU ITMO, 2006. – 77. Print.

*Поступила(received)28.05.2015*

УДК 621.314

**С. Ю. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ».

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН**

Метою даної роботи є експериментальне визначення електрофізичних параметрів ОПН при різних частотах діючої напруги, що дозволить виконувати аналіз режиму їх роботи в мережах з низькою якістю електричної енергії. Проведений аналіз результатів експериментів дозволить визначити усереднені значення електрофізичних параметрів ОПН, що суттєво спрощує розрахунки параметрів схем заміщення необхідні для аналізу роботи ОПН в зоні струмів витоку вольтамперних характеристик при аналізі впливу на них вищих гармонійних складових напруги.

**Ключові слова:** обмежувачі перенапруг, схеми заміщення ОПН, електрофізичні властивості ОПН, діелектричні втрати, ємність, діелектрична проникність, варистор-на кераміка.

**Постановка проблеми.** Визначення режиму роботи обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН) при дії найбільш допустимої на-

© С. Ю. Шевченко, 2015

пруги електричної мережі має велике значення при виборі цих захисних апаратів. ОПН повинен підтримувати тепловий баланс на протязі всього строку експлуатації. Розрахунок енергії, що виділяється в ОПН при протіканні по ньому струму витоку має враховувати електричні та фізичні властивості апарату. На перший погляд, подібний розрахунок не викликає складнощів, однак детальний аналіз роботи ОПН в зоні струмів витоку вольт – амперної характеристики (ВАХ) показує, що режим роботи ОПН в цій зоні визначається не тільки діючим напругою та струмом, а й електрофізичними та конструктивними особливостями апарату. Крім того наявність гармонійних коливань в мережі може суттєво спотворити напругу, яка діє на ОПН, що може призвести до виникнення порушень його теплового режиму

**Аналіз публікацій.** У вітчизняній та зарубіжній літературі розглянута велика кількість варіантів складів оксидноцинкової кераміки, які мають дуже великий спектр електрофізичних властивостей [1-16]. Дослідники електрофізичних властивостей варисторної кераміки на основі оксиду цинку розглядають кожен свій склад кераміки та відповідно отримують властивості тільки для цього складу. Точний склад оксидноцинкової кераміки, який використовують для виготовлення варисторів ОПН, відомий тільки виробникам. Цей факт показує необхідність вивчення електрофізичних властивостей ОПН в складеному стані, які необхідно враховувати в схемах заміщення при їх виборі та аналізі роботи.

**Ціль статті.** Метою даної роботи є експериментальне визначення електрофізичних параметрів ОПН при різних частотах діючої напруги, що дозволить виконувати аналіз режиму їх роботи в мережах з низькою якістю електричної енергії.

**Метод рішення.** Для аналізу втрат потужності в ОПН необхідно визначити їх характеристики, які будуть визначати параметри схеми заміщення. Окрім того, для коректного аналізу впливу гармонійних коливань напруги на теплові режими ОПН, необхідно знати чи існують залежності від частоти параметрів схеми заміщення та тангенса кута діелектричних втрат.

Для досліджень були використані ОПН виробництва ООО «Таврида Електрик Україна» ОПН ТЕМ 6/6,9 УХЛ1 заводський номер 4811, ОПН ТЕМ 6/6,9 УХЛ2 заводський номер 4620, ОПН ТЕМ 6/6,9 УХЛ1 учебний примірник (з контактами виконаними з алюмінію), ОПН ТЕМ 6/6,9 УХЛ1 заводський номер 4810, ОПН ТЕМ 6/6,9 УХЛ1 заводський номер 4812, ОПН ТЕМ 10/12 УХЛ1 заводський номер 4731, ОПН ТЕМ 10/12 УХЛ1 заводський номер 4732, ОПН ТЕМ 10/12 УХЛ2 заводський номер 4005.

Дослідження виконані на кафедрі передача електричної енергії НТУ «ХПІ». В експериментах використовувалася вимірювач імметансу типу Е7-14 та цифровий вимірювач імметансу типу Е7-22. Були виконані три серії експериментів для визначення ємності та тангенсу кута діелектричних втрат для ОПН в зібраному стані.

Результати експериментального дослідження наведені на рис.1, рис.2 та рис.3. Вимірювання ємності та  $\operatorname{tg} \delta$  виконані для трьох значень частоти 100 Гц, 1000 Гц, 10000 Гц. Такий вибір частот обумовлений тим що в електричних мережах України враховують гармонійні коливання до частот 41 гармоніки, що дорівнює 2050 Гц.

Як можна бачити на рис. 1 залежність  $\operatorname{tg} \delta$  від частоти є суттєвою для частот суттєво більше 1000. У діапазоні частот, які потрібні для виконання аналізу впливу гармонік (до 2050 Гц)  $\operatorname{tg} \delta$  різних зразків ОПН може відрізнятися в декілька разів на низьких частотах. Однак при зростанні частоти до 1 кГц ця різниця суттєво скорочується, для більш високих частот - практично відсутня. Тому для розрахунків потужності втрат у ОПН можна використовувати граничні значення  $\operatorname{tg} \delta$  від 1,5 до 4 відсотків. Для вирішення задачі вибору ОПН, як правило слід застосовувати верхню межу інтервалу коливання  $\operatorname{tg} \delta$  для отримання більших значень потужності, що діє на нього. Таке припущення дозволить вибирати ОПН з запасом по енергетичним характеристикам. На підставі того, що всі варистори якими укомплектовані досліджувані ОПН є виробництва фірми АВВ можна стверджувати, що для аналізу вплив гармонійних коливань на ОПН цього виробника може бути використане усереднене значення  $\operatorname{tg} \delta$ , яке дорівнює 0,04.

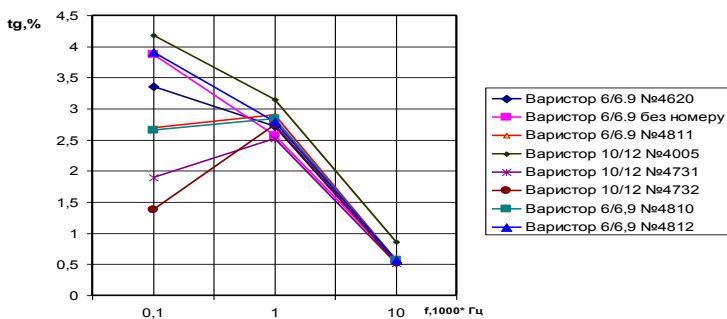


Рис. 1 Залежність тангенсу кута діелектричних втрат від частоти.

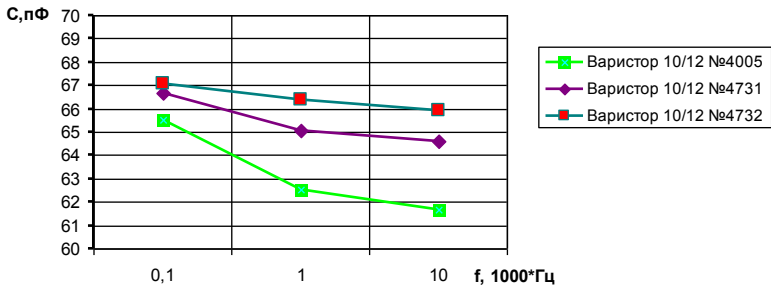


Рис. 2 Залежність ємності ОПН від частоти для ОПН 10 кВ

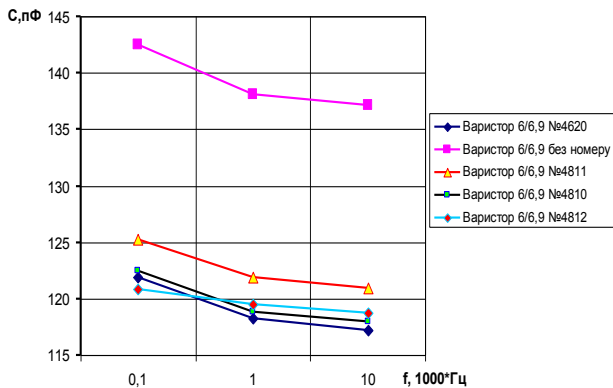


Рис. 3 Залежність ємності ОПН від частоти для ОПН 6 кВ.

Характер залежності ємності від частоти, що представлений на рис. 2. та рис. 3 свідчить, що у діапазоні частот, які потрібні для виконання аналізу впливу гармонік (до 2050 Гц) залежність ємності від частоти практично відсутня. Різниця між значеннями ємності при частотах 100 та 10000 Гц становить максимум 3,5%. Слід зазначити, що рис. 2. та рис. 3 відображають залежності ємності від частоти для двох різних

класів ОПН, які мають ємність у діапазонах 140-120 пФ та 65 пФ відповідно. Таке розташування кривих пов'язано з конструкцією досліджених ОПН. Конструктивно вони виконані з одних і тих самих варисторів, тільки ОПН TEL 6/6,9 має в своєму складі один варистор, а ОПН TEL 10/12 – два таких самих з'єднаних послідовно. Це добре корелюється зі значеннями їх ємностей, які відрізняються практично у два рази. Ємність ОПН може бути обчислена за виразом для плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\pi r^2}{h}, \quad (1)$$

де  $r$  - радіус обкладки ОПН;

$\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність ОПН;

$h$  - висота колонки варисторів ОПН;

$\varepsilon_0$  - абсолютна діелектрична проникність.

Результати отримані при вимірюванні ємностей дозволяють зробити висновок, що для розрахунків енергетичних характеристик ОПН при впливі на них гармонійних коливань наружи можна проводити при фіксованому значенні їх ємності для всього діапазону частот, що розглядаються. Для ОПН з варисторами АВВ виробленими ООО Гаврида Електрик Україна вони будуть становити Для ОПН на номінальну напругу 6 кВ 125 пФ, а для ОПН на номінальну напругу 10 кВ – 66 пФ відповідно.

Отримані результати дають можливість виконати розрахунки відносної діелектричної проникності матеріалу з якого виготовлені варистори. Визначення значення відносної діелектричної проникності для оксидноцинкової кераміки дозволить використати його для інженерних розрахунків ємності ОПН при розгляданні питання впливів на нього гармонійних коливань напруги на етапі його вибору. З виразу (1) отримаємо співвідношення, яке дасть можливість отримати значення відносної діелектричної проникності для досліджених ОПН.

$$\varepsilon = \frac{Ch}{\varepsilon_0\pi r^2} \quad (2)$$



Результати розрахунку відносної діелектричної проникності для різних частот діючої напруги наведені на малюнку 4.

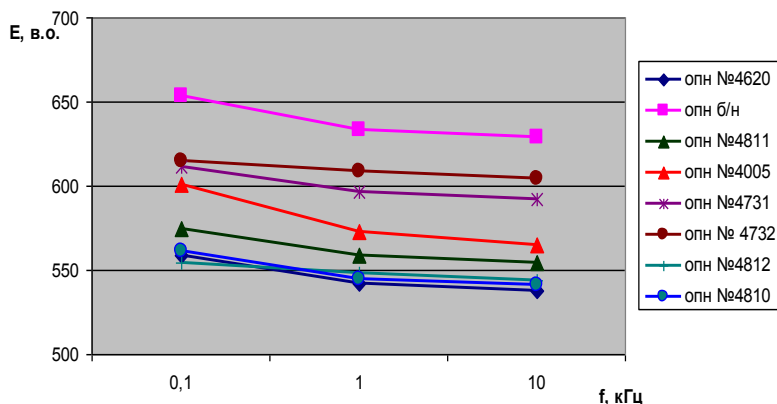


Рис. 4. Залежність відносної діелектричної проникності від частоти

Характер залежності діелектричної проникності, що представлений на рис. 4 дає можливість зробити висновок, що у дослідженому діапазоні частот значення відносної діелектричної проникності ОПН має слабку залежність від частоти. Цей факт дає можливість використовувати для інженерних розрахунків параметрів ОПН єдине усереднене значення для всіх частот, що характерні для електричних мереж, яке дорівнює 585. При цьому максимальна похибка визначення відносної діелектричної проникності становить менше 10 відсотків.

### Висновки

1. Виконані експериментальні дослідження електрофізичних властивостей ОПН при різних частотах діючої напруги.

2. Отримані результати вимірів електрофізичних властивостей ОПН дозволяють визначати параметри їх схем заміщення при виконанні розрахунків режимів роботи електричних мереж при наявності гармонійних складових напруги.

3. Проведений аналіз результатів експериментів дозволив визначити усереднені значення електрофізичних параметрів ОПН, що суттєво спрощує розрахунки параметрів схем заміщення необхідні для аналізу роботи ОПН в зоні струмів витоку вольтамперних характеристик при аналізі впливу на них вищих гармонійних складових напруги.

**Список літератури:**1.Балашиов А.В., Голубева Н.П., Скидан Б.С. Керамика оксида цинка для варисторов //Стекло и керамика, 1999, № 2, с. 21-23.2. Бойко А.А., Данилевский С.С., Дмитриев В.Л., Лубков А.Н. Сравнение характеристик варисторов, используемых для комплектации нелинейных ограничителей перенапряжений отечественными производителями // Сб. трудов ОАО НИИИТ. – СПб, 2004, № 59. –С 56-63. 3. Alternative Transient Program Rule Book (ATPRB), 1997. Can/Am EMTP User Group,USA. 4.Fernandez F., Diaz R., 2001. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations , paper 144, International Conference On Power System Transients, IPST'01, 20 -24 June 5. "Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", International standard IEC 60099-4, Ed 2.0 5. Хинрихсен Фолькер. Siemens. Металлоксидные ограничители. Основы. – АО «Сименс», 2000.– 111 с.6. IEEE Working Group 3.4.11: "Modeling of metal oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery 1992; 7(1):302-309. 7.Darveniza. M, Roby. D, Tumma. LR, "Laboratory and analytical studies of the effects of multipulse lightning current on metal oxide arresters", IEEE Transactions on Power Delivery 1994; 9:764-771. 8.Darveniza. M, Tumma. LR, Richter. B, Roby. D, "Multipulse lightning currents and metal-oxide arresters", IEEE Transactions on Power Delivery 1997; 12:1168-1175. 9. ABB MWK Surge Arrester Datasheet, Medium Voltage Products & Systems 7. Magro. MC, Giannettoni. M, Pinceti. P, "Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies", IEEE Transactions on Power Delivery 2004; 19:1692-1695. 10. Pinceti. P, Giannettoni. M.; "A simplified model for zinc oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery 1999; 14(2):393-398.11. Exlim. Технічна інформація. Руководство по выбору высоковольтных ограничителей перенапряжений производства фирмы АББ. – ЗАО АББ УЭТМ, 1996. – 24 с.12. Гриб О.Г., Шевченко С.Ю., Гапон Д.А., Иерусалимова Т.С., Жданов Р.В. Работа средств защиты от перенапряжения при наличии в электрических сетях высших гармоник Вісник НТУ «ХПІ» – Харків, 2014. – №41(1084) 13. Выбор, испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. Правила выбора. ABB High Voltage Technologies Ltd. – Швейцария, Ветинген, май, 1994. 14. Металлоксидные ограничители перенапряжений. Выбор ограничителей перенапряжений и их применение в распределительных сетях среднего напряжения: Информация Тайко Электроникс Райхем Гмбх. – Киев, 2011. – 18 с.

**Bibliography (transliterated):**1. Balashov A.V., Golubeva N.P., Skidan B.S. Keramika oksida zinka dlja varistorov /Steklo i keramika 1999 No2 21-23 2. Bojko A.A., Danilevskij S.S., Dmitriev V.L., Lubkov A.N. Sravnenie harakteristik varistorov ispolzuemih dlja komplektachii nelinejnih ogranichitelej perenaprjazenij otechestvennimi proizvoditeljami // Sb. Trudov ОАО НИИТ –2004, No 59 56-63. 3. Alternative Transient Program Rule Book (ATPRB), 1997. Can/Am EMTP User Group,USA. 4.Fernandez F., Diaz R., 2001. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations , paper 144, International Conference On Power System Transients, IPST'01, 20 -24 June 5. "Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", International standard IEC 60099-4, Ed 2.0 5. Henrehse Folkner. Siemens. Metalooksidnie ogranichiteli. Osnovi. – АО «Siemens», 2000.– 111 . 6. IEEE Working Group 3.4.11: "Modeling of metal oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery 1992; 7(1):302-309. 7.Darveniza. M, Roby. D, Tumma. LR, "Laboratory and analytical studies of the effects of multipulse lightning current on metal oxide arresters", IEEE Transactions on Power Delivery 1994; 9:764-771. 8. Darveniza. M, Tumma. LR, Richter. B, Roby. D, "Multipulse lightning currents and metal-oxide arresters", IEEE Transactions on Power Delivery 1997; 12:1168-1175 9. ABB MWK Surge Arrester Datasheet, Medium Voltage Products & Systems 8. Magro. MC, Giannettoni. M, Pinceti. P, "Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies", IEEE Transactions on Power Delivery 2004; 19:1692-1695. 10. Pinceti. P, Giannettoni. Moscow: "A simplified model for zinc oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery 1999; 14(2):393-398. 11. Exlim. Tehnicheskaja informachija. Rukovodstvo

po voboru visokovoltnih ogranicitel'ej perenaprjaztnij proizvodstva firvi АББ. – ЗАО АББ UETM, 1996. – 24 . **12.** Grib O.G., Shevchenko S.U., Gapon D.A., Ierusalimova T.S., Zdanov R.V. Rabota sredstv pfschini ot perenaprjazenij pri nalichii v tlektlicheakih setjah visshih garmonik Elektrotehnika ta elektromehanika. – Rharkiv, 2014. –No 4. **13.** Vibor ispitaniya i primenenie . Metalooksidnih ogranicitel'uj perenaprjazeniya v aetjah srednego naprjazeniya. АBB High Voltage Technologies Ltd. – 1994.**14.** Metalooksidnie ograniciteli perenaprjazeniya . Vibor i primenenie . Metalooksidnih ogranicitel'uj perenaprjazeniya v aetjah srednego naprjazeniya: Informachija Tayko electronics Rayhem GmbH. – Kyiv, 2011. – 18 .

*Надійшла (received) 21.04.2015*

УДК 681.2:623.454.836

**О. М. ГРИГОР'ЄВ**, канд. физ. мат. наук, ст. н. с. НДЛ ФВП НТУ «ХПП»;

**З. В. БЛИК**, науч. сот. НДЛ (о РХБ з), ФВП НТУ «ХПП»;

**Ю. В. ЛИТВИНОВ**, доц. Харківського Національного пед.ун-ту;

**М. Є. ПОЛЯНСЬКИЙ**, інженер I категорії каф. ФБМЕ та КІТ, ХНУ ім. В.Н. Каразіна;

**В. В. МАРУЩЕНКО**, канд. біол. наук, доц., нач. каф. БЗПВРХБз, ФВП НТУ «ХПП»

**О. Ю. ЧЕРНЯВСЬКИЙ** , начальник НДЛ (о РХБ з), ФВП НТУ «ХПП».

## **ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ ТА ШАРУ ЗАХОРОНЕННЯ ТОЧКОВИХ ДЖЕРЕЛ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІЇ**

Експериментально досліджено зміну енергії джерела гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$  при проходженні гамма-випромінювання крізь поглинач. Виявлено зменшення енергії гамма-випромінювання джерела  $^{137}\text{Cs}$  при проходженні пучка гамма-випромінювання крізь поглинач зі свинцю товщиною 22 мм, 28 мм, 35 мм та 43 мм. Зменшення енергії гамма-випромінювання спостерігали з використанням спектрометрії гамма-випромінювання телурид кадмієвим детектором розміром  $5 \times 5 \times 2$  міліметра. Отримані результати дозволяють стверджувати, що є можливість визначати місцезнаходження радіонуклідів, що захороненні під поверхнею ґрунту на глибину декількох метрів. Глибину захоронення визначають за зменшенням кількості гамма-квантів в піку повного поглинання при використанні радіонукліда цезій-137 активністю  $2,064 \cdot 10^9$  Бк, що розташований на відстані трьох метрів від блоку детектування.

**Ключові слова:** гамма-випромінювання, кадмій телур, захоронення, гамма-джерело.

**Вступ.** Використання людством ядерно-паливного циклу призвело до забруднення значних територій радіонуклідами, зокрема  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и

© О. М. Григор'єв, З. В. Білик, Ю. В. Литвинов, М. Є. Полянський, В. В. Марущенко,  
О. Ю. Чернявський, 2015

$^{239}\text{Pu}$ , що становить значну небезпеку для людства у зв'язку із розповсюдженням радіонуклідів повітрям, проникненням до ґрунту та в підземні води, а далі до організму тварин та людини.

Так, в результаті радіаційних аварій, що мали місце на об'єктах «Маяк» в 1960-х роках відбулося радіоактивне забруднення не лише територій промислової площадки, санітарно-захисної зони навколо підприємств, але частини територій Челябінської, Свердловської та Курганської областей Російської Федерації.

В результаті випробувань ядерної зброї в 60-х роках на поверхні землі північної півкулі присутня велика кількість радіоактивних речовин, що визначають глобальне фонове забруднення. К 1986 року (до Чорнобильської аварії) загальна активність  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , що знаходилися на території північної півкулі, склала десятки МКі. Аварія на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) в 1986 році за масштабами радіоактивного забруднення навколишнього середовища перевершила всі попередні радіаційні інциденти [1]. Найбільше забруднення отримала Республіка Білорусь, Брянська область Російської Федерації та країни Скандинавії.

До цього, існує імовірність аварій, що викликані природники кактаклізмами, наприклад у 2011 році в Японії у м. Фокусіма атомна електростанція була пошкоджена цунамі, що призвело до забруднення вод в океані, а також пожежа лісів біля зони відчуження ЧАЕС у 2015 році, що могла призвести до розповсюдження радіонуклідів у разі не своєчасного гасіння.

Аналіз використання енергії в світі показує зростання енергоспоживання. Найбільш доцільним є використання ядерної енергетики. Але нарощування ядерних потужностей вимагає забезпечення ядерної та радіаційної безпеки всього циклу виробництва енергії аж до захоронення радіоактивних відходів та створення необхідних систем для ліквідації наслідків можливих радіаційних аварій.

Однією із задач ліквідації радіоактивних забруднень є пошук радіоактивних джерел під шаром ґрунту або під зруйнуваннями радіаційних об'єктів. Так, для ліквідації аварії на Грозненському хімічному комбінаті в Російській Федерації було застосовано спектрометричний колімований детектор з кутом колімації  $10^\circ$  та  $5^\circ$ . Заглиблення джерела визначали за відношенням швидкістю лічби гамма-квантів в піку повного поглинання та в області комптонівського розсіювання, а отримані дані порівнювали із даними від відкритого гамма-джерела. В якості детектора було обрано  $\text{CsI(Tl)}$  об'ємом  $5\text{ см}^3$ . Недоліком даного пристрою є великий час пошуку, що обумовлено покроковим переміщен-

ням спектрометричного колімованого детектора та часом вимірювання спектру.

Метою роботи є розробка методу та пристрою для визначення шару захоронення точкових джерел гамма-випромінювання з використанням гамма-спектрометрії.

**Викладення основного матеріалу.** Метод для визначення шару захоронення точкових джерел гамма-випромінювання полягає в визначенні напрямку на гамма-джерело [3] із використанням спектрометричних телурид кадмієвих детекторів, подальшому визначенні кількості імпульсів в піці повного поглинання та порівняння його із спектром від відкрито розташованого відповідного гамма-джерела. За зменшенням кількості імпульсів у піці повного поглинання визначають глибину захоронення гамма-джерела.

Експериментальну перевірку проводили за допомогою чотириканального аналізатора імпульсів за каналом гамма-випромінювання з використанням джерела гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$  активністю  $A=2,064 \cdot 10^9$  Бк. В якості детектора використовувався спектрометричний телурид-кадмієвий детектор розміром  $5 \times 5 \times 2$  міліметра з енергетичним розрізненням до 100 кеВ для вимірювання розподілу гамма-квантів за енергією, ефективність рахунків детектора складала 0,8 %. Відстань до джерела з активністю  $A$  складала 3 метри, дискримінація встановлювалась на рівні 70-80 кеВ. Спектр гамма-випромінювання, що отриманий на відкрито розташованому детекторі від джерела з активністю  $A$  зображений на рисунку 1.

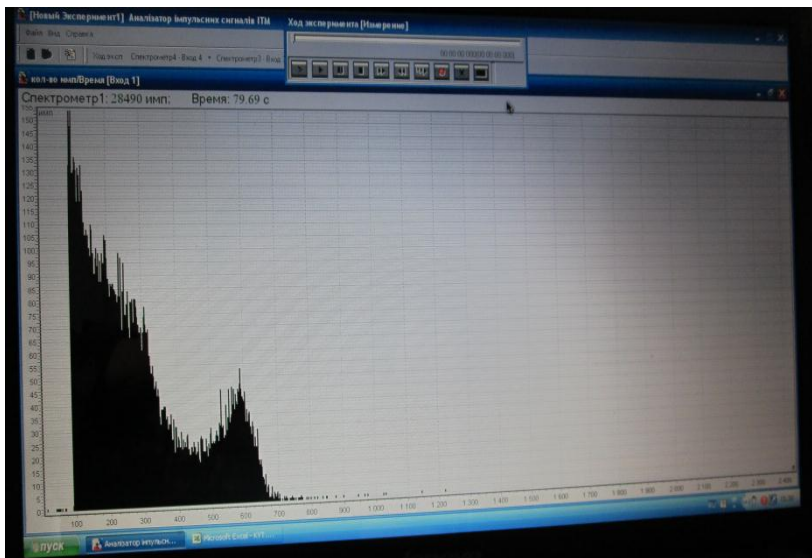


Рис. 1 – Результати виміру гамма-випромінювання від джерела гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$   $A=2,064 \cdot 10^9$  Бк без поглинач

Для дослідження можливості пошуку джерел гамма-випромінювання під поглинаючим шаром було використано поглиначі із свинцю різних товщин. Рисунки 2 – 5 демонструють відповідні енергетичні спектри від джерела гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$  активністю  $A=2,064 \cdot 10^9$  Бк, що вимірюються детектором розташованим за поглиначем із свинцю товщиною 22 мм, 28 мм, 35 мм та 43 мм відповідно.

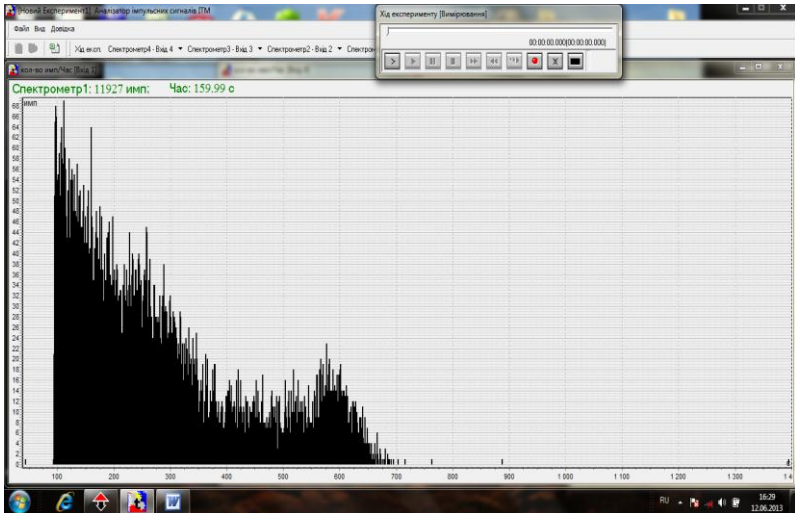


Рис. 2 – Результати виміру гамма-випромінювання від джерела гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$   $A=2,064 \cdot 10^9$  Бк, що проходить крізь поглинач зі свинцю товщиною 22 міліметри

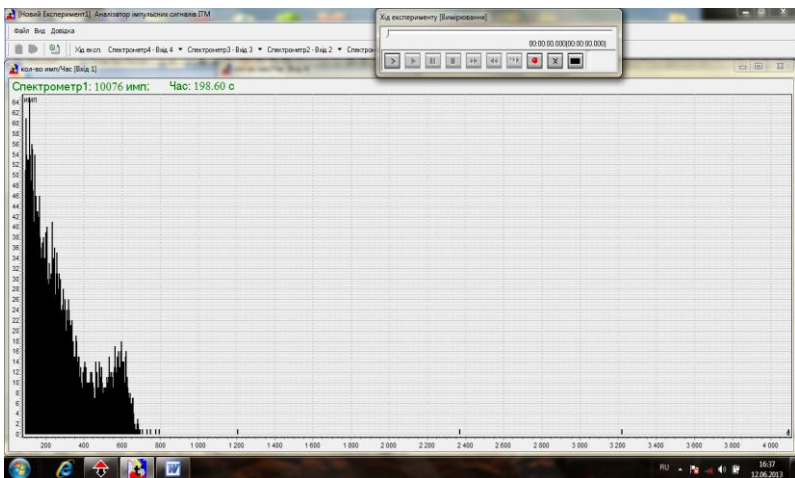


Рис. 3 – Результати виміру гамма-випромінювання від джерела гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$   $A=2,064 \cdot 10^9$  Бк, що проходить крізь поглинач зі свинцю товщиною 28 міліметри

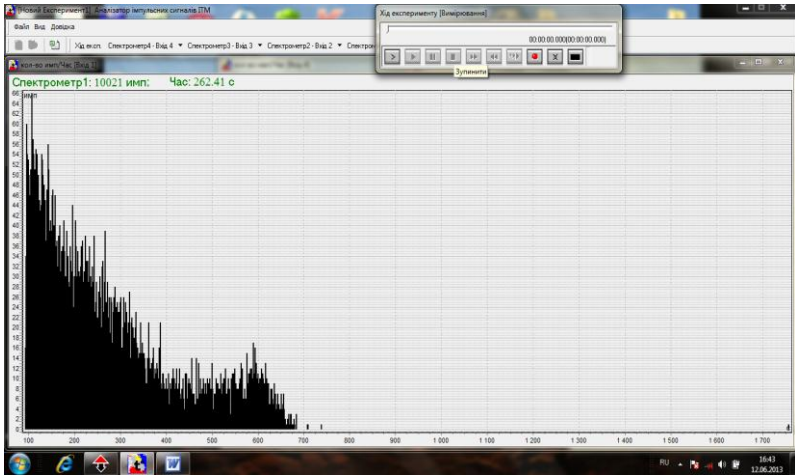


Рис. 4 – Результати виміру гамма-випромінювання від джерела гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$   $A=2,064 \cdot 10^9$  Бк, що проходить крізь поглинач зі свинцю товщиною 35 міліметрів

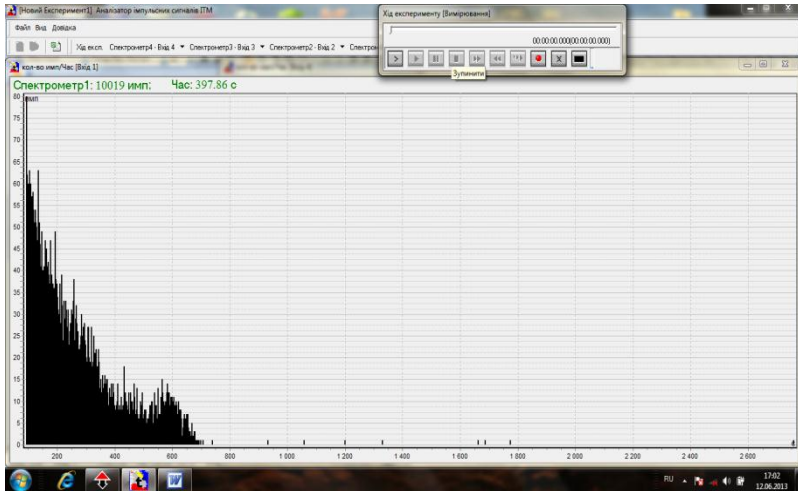


Рис. 5 – Результати виміру гамма-випромінювання від джерела гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$   $A_2=2,064 \cdot 10^9$  Бк, що проходить крізь поглинач зі свинцю товщиною 43 міліметри



Із вище наведених спектрів можна спостерігати, що для визначення товщини заглиблення гамма-джерела під шаром матеріалу необхідно визначити кількість гамма-квантів у фотопіку та порівняти отримане значення із значенням від еталонного джерела.

**Висновки.** Таким чином, розроблений метод передбачає визначення напрямку на гамма-джерело, вимірювання кількості гамма-квантів у фотопіку та порівняння отриманого значення із значенням від еталонного джерела за яким визначається товщина шару заглиблення джерела гамма-випромінювання під поверхнею матеріалів до товщини декількох метрів.

**Список літератури:** 1. *Потапов В.Н.* Разработка радиометрических систем и методов полевых и дистанционных измерений радиоактивного загрязнения: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Российский научный центр «Курчатовский институт». – Москва, 2010. – 304 с. 2. *Смирнов С.В.* Разработка экспериментальных приборных средств и методик их применения для поиска и характеристики источников ионизирующего излучения в сложной радиационной обстановке: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / МИФИ – Москва, 2010. – 104 с. 3. *Григор'єв О.М., Білик З.В., Сакун О.В., Марущенко В.В.* Визначення напрямку на точкові джерела фотонного випромінювання в площині, включаючи імпульсні // Вісник національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: збірник наукових праць. “Електроніка та перетворювальна техніка”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2012. – № 41. – с. 111-117.

**Bibliography (transliterated):** 1. Potapov, V.N. Razrabotka radiometricheskikh sistem i metodov polevyh i distancionnyh izmerenij radioaktivnogo zagrjaznenija: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepen idoktora fiziko-matematicheskikh nauk / Rossijskij nauchnyj centr “Kurchatovskij institut”. – Moscow, 2010. – 304 s. 2. *Smirnov, S.V.* Razrabotka jeksperimental'nyh pribornyh sredstv i metodik ih primenenija dlja poiska i harakterizacii istochnikov ionizirujushhego izlucheniya v slozhnoj radiacionnoj obstanovke: Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk / MIFI – Moscow, 2010. – 104 s. 3. *Grigor'ev, O.M., Z.V. Bilik, O.V. Sakun, V.V. Marušenko* Vizačenn naprâmkunatočkovi dzerela fotonnog viprominuvan-viprominuvan-na vplosini, vklucauci impul'sn // Visnik nacional'nogotehničnogouniversitetu “Harkivsk'ij politehničnij institut”: zbirnik naukovih prac'. Elektronikataperetvorival'notehnika”. Harkiv: NTU “KhPI”, No 41. 2012. 111-117. Print.

*Надійшла (received) 20.05.2015*

**О. Г. ГРИБ**, д-р тех. наук, проф., завідуючий кафедри  
Автоматизації енергосистем, НТУ «ХПІ»;  
**Д. А. ГАПОН**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ»;  
**Т. С. ІЕРУСАЛІМОВА**, асистент, НТУ «ХПІ»;  
**М. С. БЕЛОВ**, здобувач НТУ «ХПІ»;  
**О. В. ЛЕЛЕКА**, провідний інженер ДП НЕК «Укренерго», Київ

## **АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ПО ПРОЕКТУВАННЮ І ПОБУДОВІ СИСТЕМИ «SMART GRID» ЯКА БАЗУЄТЬСЯ НА ЦИФРОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ**

Поява нових міжнародних стандартів і розвиток сучасних інформаційних технологій відкриває можливості інноваційних підходів що до проектування цифрових підстанцій, яка є основним сегментом в системі «SMART GRID». Впровадження системи «SMART GRID», яка базується на цифрових підстанціях, дозволяє використовувати новітні інформаційні технології при проектуванні і експлуатації енергетичних систем.

**Ключові слова:** Електроенергія, цифрова підстанція, диспетчеризація, інформація, модель.

**Вступ.** Проектування і побудова системи «SMART GRID» яка будується на використанні цифрових підстанцій (ЦПС) на яких впроваджуються цифрові технології на рівні вимірювання, збору і обробки інформації режимів роботи підстанції і мережі базується на стандартах «SMART GRID», які були прийняті МЕК та іншими організаціями по стандартизації з якими співробітничав Україна.

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** Аналіз літератури по розробкам цифрових підстанцій показує, що до передових технологій автоматизації цього рівня можна віднести[1-11]:

- використання оптичних вимірювальних трансформаторів (струму, напруги, комбінованих);
- оснащення силового обладнання набором цифрових датчиків, що надають інформацію про технічний стан, положення комутаційного обладнання, токів та напруг;
- використання на всіх рівнях інтерфейсів передачі цифрових даних.

Впровадження цифрових підстанцій дозволяє отримати цілий ряд переваг в порівнянні з традиційними підстанціями. Для виконання різних функцій на цифровій підстанції використовуються одні й ті ж джерела інформації, що призводить до зменшення загальної кількості

обладнання на ній. Доступ до всієї інформації на цифровий підстанції здійснюється за допомогою уніфікованих типів даних і методів доступу, зведених у єдиний комунікаційний стандарт. Підсистеми захисту, вимірювання, управління, моніторингу стану обладнання, обліку та контролю якості електроенергії - всі вони при виконанні своїх функцій використовують одну і ту ж комунікаційну мережу, за якою отримують дані про значення струмів, напруг, положення комутаційних апаратів, приймають або передають керуючі команди. Немає необхідності в наявності індивідуальних пристроїв вимірювання, комунікації та обробки інформації для кожної з перерахованих підсистем.

**Мета статті.** Проаналізувати міжнародну нормативну базу по проектуванню системи «SMART GRID», яка базується на концепції побудови цифрових підстанцій[3].

**Постановка проблеми.** Вирішення проблеми проектування, побудови і експлуатації підстанції енергосистем на базі ІТ – технологій.

**Матеріали досліджень.** На даний момент можна виділити п'ять сімейств стандартів, що відносяться до SmartGrid для енергетичної галузі:

- IEC 61970 та IEC 61968 - описують Загальну Інформаційну Модель (CIM), необхідну для обміну даними між апаратурою та мережами, насамперед у передавальному секторі (IEC 61970) і розподілі (IEC 61968);
- IEC 61850 - сприяє автоматизації підстанцій і комунікацій, так само як і сумісності на основі єдиного формату даних;
- IEC 60870-6 - описує інформаційний обмін між центрами управління;
- IEC 62351 - вирішує завдання безпеки комунікаційних протоколів, визначених попередніми стандартами IEC.

Дані стандарти мають наступні переваги при впровадженні:

- зниження витрат - забезпечує здатність взаємодії технологій SmartGrid, що дозволяє вибирати і встановлювати будь-яку частину технології і не залежати від постачальника;
- оптимізація процесів - полегшує інтеграцію обладнання та систем для управління електроенергетичними процесами в комплексні системні рішення, необхідні для підтримки функціонування енергомереж;
- управління ризиками - досягнення цілей безпеки за допомогою цифрового підпису, аутентифікації доступу, запобігання підслухування і виявлення несанкціонованих вторгнень;

- зниження залежності від одного постачальника - відхід від історично сформованої проблеми в електроенергетичному секторі, коли використовуються специфічні технології та формати інформаційного обміну від одного постачальника.

**Результати досліджень.** Проаналізувавши роботу сучасної енергосистеми можна зробити висновок, що диспетчерське управління з використанням АСУ ТП і SCADA є фізично проблематичним, а управління не ефективним при нестандартних ситуаціях. В сучасних енергосистемах основним елементом управління мережевої енергетики є підстанція на яку в системі стандартів «SMART GRID» є окремий стандарт IEC 61850[6-8].

Систему «SMART GRID» можна розділити на SMART підстанції і SMART диспетчерські. Цифрова підстанція є безлюдним технологічним процесом, в якому інформація концентрується і передається на наступний рівень управління - SMART диспетчерські. SMART диспетчерські базуються на цифрових підстанціях і потребують надійний зв'язок в стандарті IEC 60870-6. Інформаційна диспетчерська мережа IDN характеризується збільшенням послуг і режимів доступу к ним. Якщо у споживачів для розрахунку за електричну енергію використовується курсова калькуляція цін, то архітектуру інформаційного обміну постачальника і споживача можна розбити на кілька мереж: інформаційна мережа споживача, мережа збору інформації з інтелектуальних датчиків, інтелектуальна мережа на рівні підстанції, комплексна інтелектуальна диспетчерська мережа. При такій архітектурі графік навантаження вирівнюється за рахунок зміни ціни на електричну енергію (кожні 10, 20, 30 хвилин) протягом доби. Одною з найбільш важливих складових при вимірюванні графіка навантаження електричної енергії є лічильники, а також вимірювальні трансформатори напруги та струму. На сьогоднішній день у лічильників клас точності 0,1 – 0,2 %, а клас точності вимірювальних трансформаторів 0,5%. Тому для системи «SMART GRID» треба використовувати вимірювальні трансформатори, які мають мінімальну похибку і заводозахищеність. Для цього підходять оптичні трансформатори струму і напруги, які забезпечують високу точність вимірювань та їх стабільність у часі і широкому діапазоні параметрів зовнішнього середовища. Трансформатори відповідають вимогам IEC Class 0.2s і IEEE 0.3 для вимірів, IEC 3P або 5P і IEEE 10% для захистів. Динамічний діапазон оптичних перетворювачів дуже широкий. Так, трансформатори струму відповідають класу точності для вимірів вже при струмі 1А і продовжують відповідати класу точності для захистів при струмі 170 кА. Така комбінація точності і динаміч-

ного діапазону дозволяє застосовувати один і той же перетворювач струму і для вимірів, і для захисту обладнання.

Оптичні трансформатори мають менші масогабаритні показники, ніж традиційні з масляною або елегазовою ізоляцією. Крім того, один гібридний трансформатор може замінювати до трьох трансформаторів в традиційному виконанні - трансформатор струму для захистів, трансформатор струму для вимірювань і трансформатор напруги. Зовнішні інтерфейси вимірювальних трансформаторів формуються зовнішніми електронними модулями, які можуть бути віддалені від оптичного датчика на значні відстані і зв'язані з ним по оптоволоконному кабелю. Для передачі даних про виміри використовують три види інтерфейсів: аналоговий інтерфейс великої потужності, аналоговий інтерфейс малої потужності, цифровий інтерфейс. Аналоговий інтерфейс великої потужності застосовують для забезпечення сумісності нових датчиків з традиційними пристроями вимірювання. Аналогові модулі інтерфейсу великої потужності являють собою прецизійні підсилювачі, на вхід яких надходить сигнал від модулів аналогового інтерфейсу малої потужності. Характеристики аналогового інтерфейсу малої потужності визначаються стандартами ІЕС 60044-7 (Інструментальні трансформатори - Частина 7: Електронні трансформатори напруги) і ІЕС 60044-8 (Інструментальні трансформатори - Частина 8: Електронні трансформатори струму).

**Висновки.** При проектуванні і експлуатації систем зв'язку для енергетичної системи необхідно використовувати вимірювальні оптичні трансформатори, а в роботі електрообладнання впровадити загальну інформаційну модель (СІМ). Ця модель побудована по єдиній методології, що дозволяє її використовувати від підстанції до диспетчерського центру в енергосистемі. Впровадження системи «SMART GRID», яка базується на цифрових підстанціях, дозволяє використовувати новітні інформаційні технології при проектуванні і експлуатації енергетичних систем.

**Список літератури:** 1. Smart Grid Leadership Report: Global Smart Grid Implementation Assessment, October 2010, EPRI Project Manager M. Wakefield 2. Smart Grid Framework 2.0 February 2012, National Institute of Standards and Technology Patrick D. Gallagher, Director 3. IEEE 2030 Smart Grid Interoperability Standards, [http://www.ccsa.org.cn/ccsa\\_ieee/9--Sciacca-2030%20Smart%20Grid%20Interoperability%20Standards.pdf](http://www.ccsa.org.cn/ccsa_ieee/9--Sciacca-2030%20Smart%20Grid%20Interoperability%20Standards.pdf) 4. IEEE Std 493-2007, IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems 5. IEEE Std 1366-2012, IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. 6. Julio Dominguez Cruz, Jose Miguel Arzuaga Canals. Article «Integration of IEC 61850 remotes in a multi-manufacturer substation». Pilot project. Spain. 7. Gerrit Dogger, Garry Tenese, Dennis Kakoske, Eric MacDonald. Manitoba Hydro. Article «Designing a new IEC 61850 substation architecture» 8. Carlos Caetano, Miguel Pernos. Article «Introducing IEC

61850 in distribution substations». ABB.**9.** Cheng, Chin Pang Ip, Sui Lun Lee, Sui Pun. Article «Development of the first digital substation in CLP Power», Spain. **10.** В.І. Васильченко, О.Г. Гриб, О.В. Лелека, Д.А. Гапон, Т.С. Іерусалімова Цифрова підстанція складова системи «SMART GRID» Науково – практичний журнал 2014/6 Електротехніка і електромеханіка. – Харків НТУ «ХПІ». – 2014. – С. 72 – 76. **11.** Васильченко В.І., Гриб О.Г., Лелека О.В., Гапон Д.А., Сапрука О.В., Т.С. Іерусалімова Цифрова підстанція як локальний рівень автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії Вісник Національного технічного університету «Харківський Політехнічний інститут». Серія: «Енергетика: надійність та енергоефективність» – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №56(1098) – С.33-37.

**Bibliography(translation):** **1.** Smart Grid Leadership Report: Global Smart Grid Implementation Assessment, October 2010, EPRI Project Manager M. Wakefield **2.** Smart Grid Framework 2.0 February 2012, National Institute of Standards and Technology Patrick D. Gallagher, Director **3.** IEEE 2030 Smart Grid Interoperability Standards, **4.** IEEE Std 493-2007, IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems **5.** IEEE Std 1366-2012, IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. **6.** Julio-Domínguez Cruz, Jose Miguel Arzuaga Canals. Article «Integration of IEC 61850 remotes in a multi-manufacturer substation». Pilot project. Spain. **7.** Gerrit Dogger, Garry Tennese. Dennis Kakoske. Eric MacDonald. Manitoba Hydro. Article «Designing a new IEC 61850 substation architecture» **8.** Carlos Caetano, Miguel Pernos. Article «Introducing IEC 61850 in distribution substations». ABB. **9.** Cheng, Chin Pang Ip, Sui Lun Lee, Sui Pun. Article «Development of the first digital substation in CLP Power», Spain. **10.** V. Vasilchenko, O. Gryb, O. Leleka, D. Gapon, T. Ierusalimova Цифрова підстанція складова системи «SMART GRID» Наукова – практичний журнал 2014/6 Електротехніка і електромеханіка. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2014. – 72 – 76. **11.** V. Vasilchenko, O. Gryb, O. Leleka, D. Gapon, T. Ierusalimova, A. Sapruka Цифрова підстанція Як локальний рівень автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії Вісник Національного технічного університету «Харківський Політехнічний інститут». Серія: «Енергетика: надійність та енергоефективність» – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 56(1098) – 33-37.

*Надійшла (received) 20.05.2015*

**О. В. ВОВНА**, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Красноармійськ;  
**А. А. ЗОПІ**, д-р. техн. наук, проф., ДонНТУ, Красноармійськ

## **ПІДСИСТЕМА КОНТРОЛЮ МЕЖ ВИБУХОВОСТІ РУДНИЧНОЇ АТМОСФЕРИ ДЛЯ СИСТЕМИ АЕРОГАЗОВОГО ЗАХИСТУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ**

Отримала подальший розвиток математична модель визначення нижньої межі вибуховості системи «метан – вугільний пил – повітря» на основі результатів досліджень вибухонебезпеки пилогазової суміші. Модель враховує зміну вмісту вологи у повітрі, вихід лепючих та зольність вугілля, що дозволяє запобігати наближенню робочої точки системи аерогазового контролю до критичних меж вибуховості. Розроблені та досліджені експериментальні зразки вимірювачів концентрації метану та пилу, які входять до складу системи аерогазового захисту вугільних шахт

**Ключові слова:** підсистема, контроль, метан, вугільний пил, вологість, вибуховість, руднична атмосфера.

**Вступ.** Розробка та вдосконалення вимірювальних систем концентрації газів і пилу, які дозволяють отримати надійну метрологічну інформацію в режимі реального часу про фактичний та прогнозований стан аерогазової обстановки промислових підприємств, є одним з пріоритетних напрямів проблеми підвищення ефективності промислових систем комплексної аерогазової безпеки. Так, вимірювальний контроль концентрації токсичних і вибухонебезпечних пило-газових компонент рудничної атмосфери вугільних шахт в режимі on-line, дозволить знизити вірогідність виникнення вибухонебезпечних ситуацій та запобігти виникненню ендегенних й екзогенних пожеж.

У теперішній час розроблені та впроваджені швидкодіючі вимірювачі метану [1], в яких, згідно вимог [2], допустиме значення часу спрацьовування метанометрів стаціонарних (МС2), які використовуються в якості швидкодіючих, складає за швидкістю наростання об'ємної частки метану не більш 2,0 с. (при швидкості 0,5 % в 1 с.). Чутливим елементом розроблених швидкодіючих датчиків метану [1] є елемент, який засновано на термокаталітичному методі контролю концентрації газу. Постійна часу цих датчиків складає більш (3 – 4) с. Для забезпечення необхідної швидкості наростання об'ємної концентрації метану в швидкодіючих датчиках (не більш 2,0 с.) використані програмні методи цифрової обробки їх вихідних сигналів. Згідно ж вимог [2] метанометри стаціонарні, які використовуються в якості швидкодію-

чих, повинні також забезпечувати час спрацювання за об'ємною часткою метану не більш 0,8 с. Для використання у теперішній час вимірювальних перетворювачів на основі термокаталітичного методу контролю це значення практично не досягне у зв'язку фізико-технічними особливостями даної групи сенсорів.

Комплексне оснащення вугледобувних підприємств системою УТАС [1] не дає достатньої безпеки умов праці робітників, оскільки існуючими аспіраційними пробовідбірниками неможливо в автоматичному режимі з достатньою швидкістю виконувати безперервний контроль концентрації та дисперсності вугільного пилу, що вітає у повітрі, немає цілісного алгоритму визначення характеристик вірогідності вибуховості вугільного пилу і метану з урахуванням вологості та швидкості повітряного потоку.

В значній мірі цю проблему можливо вирішити з використанням новітніх систем оптичного контролю концентрації метану та пилу в рудничній атмосфері вугільних шахт [3], які засновані на практичних досягненнях сучасної вимірювальної техніці. Проте, недостатній розвиток теоретичної бази вимірювачів концентрації пилогазових компонент істотно перешкоджає створенню сучасних засобів аерогазового контролю у вугільних шахтах, які задовольняють зростаючим вимогам практики.

**Постановка задачі дослідження.** Мета роботи – розробити підсистему контролю концентрації метану та пилу, що вітає у повітрі, для визначення порогу вибуховості пило-повітряної суміші в рудничній атмосфері вугільних шахт. Для досягнення мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- розробити та провести дослідження математичної моделі визначення імовірнісних характеристик критичних меж вибуховості пилоповітряної суміші рудничній атмосфері вугільних шахт;
- поставити вимоги до вимірювальних каналів підсистеми контролю порогу вибуховості атмосфери вугільних шахт;
- розробити та дослідити експериментальні зразки швидкодіючих вимірювачів концентрації метану та пилу, що вітає у повітрі, для системи аерогазового захисту вугільних шахт.

**Викладення основного матеріалу.** Для вирішення поставлених задачотримала подальший розвиток математична модель визначення імовірнісних характеристик критичних меж вибуховості пилоповітряної суміші. В основу розробки математичної моделі покладений закон Ле-Шательє, який має лінійну залежність між запиленістю повітря вугільним пилом та концентрацією метану:



$$\left( \frac{C_{CH_4(C)}}{C_{CH_4\ HMB}} \right) + \left( \frac{C_{C(CH_4)}}{C_{C\ HMB}} \right) = 1, \quad (1)$$

де  $C_{CH_4(C)}$  – фактична концентрація метану при запиленому повітрі, об.%;

$C_{CH_4\ HMB}$  – нижня межа вибухонебезпеки концентрації метану в сухому повітрі без пилу, величина якої складає 5 об.%;

$C_{C(CH_4)}$  – фактична концентрація вугільного пилу при наявності у повітрі метану, г/м<sup>3</sup>;

$C_{C\ HMB}$  – нижня межа вибухонебезпеки концентрації пилу в сухому повітрі, функціональний опис якої з достатньою практичною точністю при виході летючих речовин від 15 до 30 % дає емпірична залежність, що ґрунтується на результатах чисельних досліджень МакНДІ (м. Макіївка, Україна) [4, 5]:

$$C_{C\ HMB} (C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d) = 53,3 \cdot e^{-0,045 \cdot V_C^{daf} - 0,69 \cdot C_{CH_4(C)}} + 1,4 \cdot e^{-0,032 \cdot V_C^{daf}} \cdot A^d, \quad (2)$$

де  $V_C^{daf}$  – вихід летючих речовин і газів із вугілля, %;

$A^d$  – зольність вугільного пилу на суху вагу, %.

За результатами експериментальних досліджень, які виконані МакНДІ, встановлено залежність нижньої межі вибуховості вугільного пилу від насичення вологою повітря [6]:

$$C_{C\ HMB\ \gamma} (C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d, \gamma, P) = C_{C\ HMB} (C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d) + \xi \cdot \gamma^{\alpha(P)}, \quad (3)$$

де  $C_{C\ HMB\ \gamma}$  – НМВ пилоповітряної суміші в насиченому вологою повітрі, г/м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – вміст води в пилоповітряній суміші рудничної атмосфери, г/м<sup>3</sup>;

$\xi$  – значення коефіцієнту підвищення НМВ, який змінюється в залежності від властивостей вугілля в межах від 0,375 до 0,755;

$\alpha$  – показник ступеня, значення якого залежить від атмосферного тиску  $P$ , Па, та визначається за співвідношенням:

$$\alpha(P) = \Phi \cdot \sqrt{2} \cdot (P \cdot 10^{-5})^2, \quad (4)$$

де  $\Phi$  – число, значення якого дорівнює 1,6180399.

При нормальному атмосферному тиску значення показника ступеня (4) дорівнює  $\alpha(P=101325\text{ Па})=2,35$ . Залежність нижньої межі

вибуховості концентрації метану від насичення вологою повітря має наступний вигляд [6]:

$$C_{CH_4\ HMB\gamma}(\gamma, P) = C_{CH_4\ HMB} + \nu \cdot \gamma^{\beta(P)}, \quad (5)$$

де  $C_{CH_4\ HMB\gamma}$  – НМВ концентрації метану в насиченому вологою повітрі, об.%;

$\nu$  – коефіцієнт, який узгоджує підвищення НМВ концентрації метану з вмістом вологою в метаноповітряній суміші, значення якого дорівнює 0,009 (%/Г/м<sup>3</sup>);

$\beta$  – показник ступеня, значення якого залежить від атмосферного тиску  $P$ , Па, та визначається за співвідношенням:

$$\beta(P) = \Phi \cdot (P \cdot 10^{-5})^2. \quad (6)$$

При нормальному атмосферному тиску значення показника ступеня (6) дорівнює  $\beta(P = 101325 \text{ Па}) = 1,66$ .

В роботі [6] зазначається невідповідність лінійності закону (1) фактичному стану НМВ метано-пилі повітряної суміші. Дослідженнями [6] встановлено, що залежність (1) має вид експоненти з показником ступеня  $m$ , значення якого встановлюються експериментальним шляхом:

$$\left( \frac{C_{CH_4(C)}}{C_{CH_4\ HMB\gamma}(\gamma, P)} \right)^{m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P)} + \left( \frac{C_{C(CH_4)}}{C_{CH_4\ HMB\gamma}(C_{CH_4}, V_C^{daf}, A^d, \gamma, P)} \right)^{m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P)} = 1, \quad (7)$$

де  $m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P) = m_1 + m_2 \cdot \frac{C_{CH_4(C)}}{C_{CH_4\ HMB\gamma}(\gamma, P)}$ ;

$m_1, m_2$  – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом.

Після перетворення рівняння (7) залежність НМВ вугільного пилу від концентрації метану в рудничній атмосфері має наступний вигляд:

$$C_{C(CH_4)}(C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d, \gamma, P) = C_{CH_4\ HMB\gamma}(C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, A^d, \gamma, P) \times \left[ 1 - \left( \frac{C_{CH_4(C)}}{C_{CH_4\ HMB\gamma}(\gamma, P)} \right)^{m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P)} \right]^{\frac{1}{m(C_{CH_4(C)}, \gamma, P)}} \quad (8)$$

Для дрібнодисперсного пилу викидонебезпечного вугільного пласту  $l_1$  ПАТ «Шахта ім. О.Ф. Засядько» (марка вугілля – Ж, вихід летю-

чих  $V_C^{daf} = 34\%$ , зольність  $A^d = 7,0\%$ ) в роботі [7] наведено результати дослідження зміни НМВ метану при зміні концентрації пилу (див. рис. 1). Результати досліджень вибухонебезпеки пилегазової системи «метан – вугільний пил – повітря» апроксимовані емпіричною залежністю вигляду [7]:

$$C_{CH_4}(C_C) = \frac{5,004 - 0,3068 \cdot C_C}{1 - 0,06285 \cdot C_C + 0,02284 \cdot C_C^2}. \quad (9)$$

Для зіставлення результатів досліджень в роботі [7], які апроксимовані емпіричною залежністю (9), з результатами математичного моделювання НМВ вугільного пилу від концентрації метану, що визначені за формулою (7), авторами отримані коефіцієнти  $m_1$  та  $m_2$ , значення яких становлять 0,66512 та 0,32818. При цьому відносно значення похибки апроксимації результатів експериментальних досліджень за формулою (9) від результатів розрахунку, які отримані за залежністю (7) складає не більш 5 %, що підтверджує адекватність запропонованого математичного опису НМВ метану при зміні комплексу дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери вугільної шахти, а саме: вміст вологи у повітряній суміші, вихід летючих, зольність вугілля та тиск рудничної атмосфери.

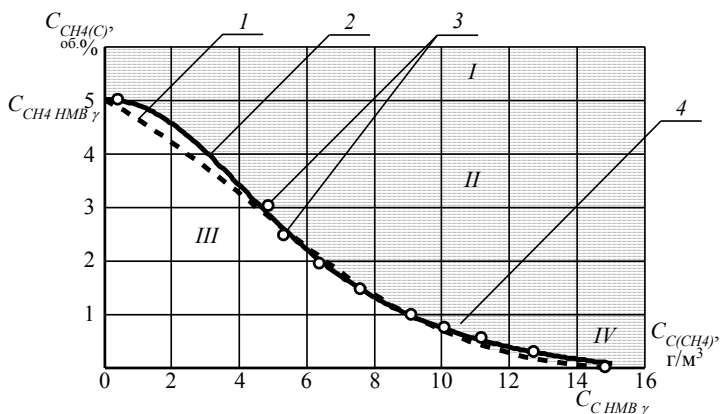


Рис. 1 – Залежність НМВ метану при зміні концентрації пилу:

1 – залежність вугільного пилу від концентрації метану, з визначеними коефіцієнтах  $m_1=0,66512$  та  $m_2=0,32818$  функції (7); 2 – функція, яка апроксимована емпіричною залежністю (9); 3 – результати досліджень НМВ метану від зміни концентрації вугільного пилу, які наведено в роботі [9]; 4 – область вибухових концентрацій системи «метан – вугільний пил – повітря»

Аналіз даних на рис. 1 показує, що виділяються чотири області, три з яких характеризуються вибуховістю метанопилоповітряної суміші: в I області концентрація метану перевищує НМВ, в цій області в займанні суміші основну роль відіграє метан; в II області займання пилогазової суміші визначається співвідношенням концентрації метану та вугільного пилу, що вітає у повітрі, III область відповідає співвідношенням концентраційних меж метану та пилу, при яких газова суміш не є вибуховою, а в IV області концентрація метану складає менш 1<sup>об.%</sup>, що повністю задовольняє вимогам аерогазового захисту шахт, а концентрація пилу наближається до НМВ, що створює передумови для виникнення на виробничих ділянках шахт пилогазового середовища у вигляді аерозолі, який має здатність до вибуху.

З аналізу результатів досліджень розробленої математичної моделі можна зробити висновок, що при зміні вмісту вологи у повітряній суміші змінюються межі IV області, тим самим змінюється поріг вибуховості метанопилоповітряної суміші. Так на рис. 2 наведено залежність НМВ метану при зміні концентрації вугільного пилу в діапазоні від 0 до 50 г/м<sup>3</sup> при фіксованих значеннях насичення вологою повітря рудничної атмосфери вугільної шахти 3; 9 та 12 г/м<sup>3</sup>.

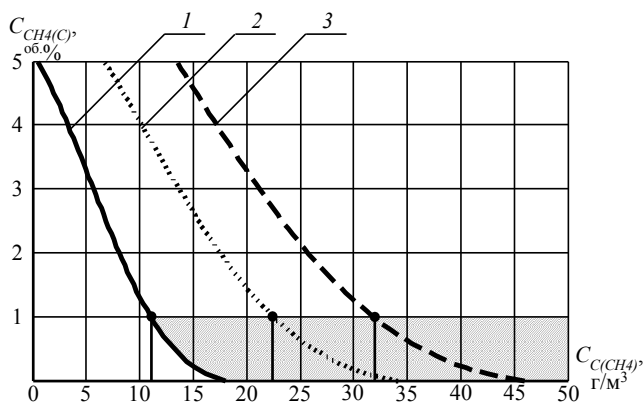


Рис. 2 – Залежність НМВ метану при зміні концентрації вугільного пилу:

1 – насиченість вологою повітря  $\gamma = 3$  г/м<sup>3</sup>; 2 –  $\gamma = 9$  г/м<sup>3</sup>; 3 –  $\gamma = 12$  г/м<sup>3</sup>

Аналіз даних на рис. 2 показує, що при підвищенні насичення вологою повітря рудничної атмосфери в 3 рази від 3 до 9 г/м<sup>3</sup> нижня межа вибуховості збільшується в 2 рази, тобто від 10,9 г/м<sup>3</sup> до 22,4 г/м<sup>3</sup>, а при збільшенні вмісту вологи у повітрі до 12 г/м<sup>3</sup> НМВ вугільного пилу

складає  $31,7 \text{ г/м}^3$ . Тому без виміривального контролю вмісту вологи у повітрі в діапазоні від  $3$  до  $9 \text{ г/м}^3$  в реальному масштабі часу не можливо врахувати вибухонебезпечність вугільного пилу, що вітає у повітрі, для запобігання виникнення вибухонебезпечного аерозолі в рудничній атмосфері вугільних шахт.

При проведенні досліджень розробленої математичної моделі виявлено, що для контролю порогу вибуховості метанопилоповітряної суміші необхідно враховувати характеристики марки вугілля, так для марки вугілля Ж при виході летючих компонент  $V_C^{daf} = 34 \%$  та зольності  $A^d = 7,0 \%$  нижня межа вибуховості вугільного пилу складає  $10,9 \text{ г/м}^3$  при насиченні вологою повітря  $3 \text{ г/м}^3$  та концентрації метану  $1^{об.}\%$ . Так при збільшенні виходу летючих компонент до  $41 \%$ , що складає не більш  $20 \%$  від номінального значення, нижня межа вибуховості вугільного пилу зменшується на  $21 \%$  та складає  $8,6 \text{ г/м}^3$ . Тобто чутливість НМВ вугільного пилу при зміні виходу летючих компонент  $V_C^{daf}$  в межах від  $34$  до  $41 \%$  становить:

$$S_{V_C^{daf}} = \frac{\Delta C_{C(CH_4)}(C_{CH_4(C)}, \Delta V_C^{daf}, A^d, \gamma, P)}{\Delta V_C^{daf}} = \frac{10,9 - 8,6}{34 - 41} = -0,329 \frac{об.\%}{\%}.$$

Чутливість НМВ вугільного пилу при зміні зольності вугільного пилу  $A^d$  від  $7$  до  $14 \%$  складає:

$$S_{A^d} = \frac{\Delta C_{C(CH_4)}(C_{CH_4(C)}, V_C^{daf}, \Delta A^d, \gamma, P)}{\Delta A^d} = \frac{12,9 - 10,9}{14 - 7} = 0,286 \frac{об.\%}{\%}.$$

З аналізу отриманих величини чутливості НМВ вугільного пилу при зміні характеристик марки вугілля можна зробити висновок, що підвищення виходу летючих компонент знижує практично пропорційно межу вибуховості метанопилоповітряної суміші, а збільшення практично в два рази зольності вугільного пилу підвищують межу вибуховості на  $18 \%$ . Тому при контролі НМВ системи «метан – вугільний пил – повітря» необхідно виконувати періодичний контроль параметрів марки вугілля, щоб запобігти наближенню робочої точки режиму роботи системи аерогазового контролю у виробленнях вугільної шахти до критичних меж вибуховості метанопилоповітряної суміші. Зміна в робочих межах тиску рудничної атмосфери практично не впливає на НМВ системи «метан – вугільний пил – повітря», тому впливом цього дестабілізуючого фактору можна знехтувати.

При виконанні дослідно-конструкторської роботи «Розробка вимірювача із застосуванням оптико-абсорбційного методу оптико-абсорбції контролю концентрації метану в рудничній атмосфері вугільних шахт» Державним вищим навчальним закладом «Донецький національний технічний університет» спільно з Приватною компанією «Дейта Експрес» розроблено та створено експериментальні зразки оптичного вимірювача концентрації метану [8, 9]. На етапі підписання договору з Державним підприємством «Петровський завод вугільного машинобудування» на виконання науково-дослідно-конструкторської роботи «Розробка оптичного вимірювача концентрації пилу в рудничній атмосфері вугільних шахт» [10].

При проведенні лабораторних досліджень експериментального зразка оптичного вимірювача концентрації метану у виробничих умовах лабораторії аерогазового захисту шахти ім. М.І. Калініна (м. Донецьк, Україна) та Держаному підприємстві «Петровський завод вугільного машинобудування» (м. Донецьк, Україна) встановлено:

– швидкодія розробленого вимірювача складає не більш 0,2 с. при необхідному значенні 0,8 с., яке визначене згідно ДСТУ ГОСТ 24032:2009 [2].

– основна абсолютна похибка вимірювання концентрації метану не більш  $\pm 0,07^{06}\%$ , яке в 3 рази менше значення, що вимагається за [2] ( $\pm 0,2^{06}\%$ ), у діапазоні вимірювань від 0 до  $4,0^{06}\%$ .

– додаткова похибка вимірювання концентрації метану в діапазоні температур від  $+5$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ , значення якої складає  $\pm 0,15^{06}\%$ , що в 2,7 рази менше необхідного значення додаткової абсолютної похибки вимірювання концентрації метану (не більш  $\pm 0,4^{06}\%$ ).

– додаткова похибка вимірювання концентрації метану від зміни концентрації пилу в діапазоні від 0 до  $3,5 \text{ г/м}^3$  складає не більш  $\pm 0,20^{06}\%$ , що в 2 рази менше необхідного значення.

При проведенні лабораторних досліджень макетного зразка вимірювача концентрації вугільного пилу в умовах лабораторії вимірювальної техніки кафедри електронної техніки ДВНЗ «ДонНТУ» встановлено:

– швидкодія розробленого макетного зразка вимірювача складає не більш 0,2 с. при максимальному значенні часу вимірювань для аспіраційних вимірювачів концентрації вугільного пилу не менше 3 хв.;

– значення основної абсолютної похибки вимірювання концентрації вугільного пилу в діапазоні від 0 до  $3 \text{ г/м}^3$  не перевищують допустимого значення похибки  $\pm 50 \text{ мг/м}^3$  та складає не більше  $\pm 14 \text{ мг/м}^3$  для двох каналів з різними довжинами хвиль оптичного випромінювання. Це значно менше величини абсолютної похибки визначення концент-

рації пилу аспіраційними вимірювачами у даному діапазоні (більш  $\pm 200 \text{ мг/м}^3$ );

– величини додаткових абсолютних похибок, які обумовлені температурним дрейфом з урахуванням компенсації дорівнюють  $\pm 2,7 \text{ мг/м}^3$  та  $\pm 3,6 \text{ мг/м}^3$ , що складає 20 % та 30 % величин основних похибок вимірювальних каналів і не перевищують вимог ДСТУ (не більше 35 % від основної).

Проведені експериментальні дослідження показують, що отримані метрологічні характеристики розроблених вимірювачів концентрації метану та вугільного пилу задовольняють поставленим вимогам до системи аерогазового контролю УТАС у виробленнях вугільних шахт.

### **Висновки.**

1. Отримала подальший розвиток математична модель визначення нижньої межі вибуховості системи «метан – вугільний пил – повітря» на основі результатів досліджень вибухонебезпеки пилогазової суміші. Модель враховує зміну вмісту вологи у повітрі, вихід летючих та зольність вугілля, що дозволяє запобігати наблизенню робочої точки системи аерогазового контролю до критичних меж вибуховості.

2. При дослідженні математичної моделі встановлено, що при підвищенні насичення вологою повітря рудничної атмосфери в 3 рази від 3 до  $9 \text{ г/м}^3$  нижня межа вибуховості збільшується в 2 рази, тобто від  $10,9 \text{ г/м}^3$  до  $22,4 \text{ г/м}^3$ , а при збільшенні вологості повітря до  $12 \text{ г/м}^3$  складає  $31,7 \text{ г/м}^3$ . Також виявлено, що для контролю порогу вибуховості метанопилоповітряної суміші необхідно враховувати характеристики марки вугілля, так підвищення виходу летючих компонент знижує практично пропорційно межу вибуховості, а збільшення практично в два рази зольності вугільного пилу підвищую її на 18 %.

3. Результати теоретичних та практичних досліджень, а також розроблені експериментальні зразки оптичних вимірювачів концентрації метану та вугільного пилу планується впровадити в комплексі аерогазового контролю УТАС (Державне підприємство «Петровській завод вугільного машинобудування») та САТ (Приватна компанія «Дейта Експрес»).

**Список літератури:** 1. Державне підприємство “Петровський завод вугільного машинобудування” “Системи комплексної безпеки”, 1897, Web. 2 April 2015 <<http://itras.com.ua>>.

2. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. – [Действующий от 2009-02-01]. – К.: Держспоживстандарт, 2009. – 24 с. 3. *Вовна А.В.* Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт / *А.В. Вовна* [идр.]. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 260 с. 4. Сборник инструкций к правилам безопасности в угольных шахтах. Том 1. – К.: Мінпаливенерго, 2003.– 480 с. 5. *Петрухин П.М.* Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / *П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жилиев* [и др.]

др./]. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 271 с. **6.** Сенкус В.В. Коэффициент взрывобезопасности угольной шахты / В.В. Сенкус, Б.М. Стефанюк, К.Д. Лукин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2010. – № 10. – С. 23–27. **7.** Калякин С.А. Взрывоопасность метанугольных аэрозолей в горных выработках и пылегазовый режим угольных шахт / С.А. Калякин // Безопасность труда в промышленности, 2013. – № 6. – С. 73–76. **8.** Вовна А.В. Разработка и исследование экспериментального образца измерителя концентрации метана для угольных шахт / А.В. Вовна, А.А. Зори // Известия ЮФУ. Технические науки. Выпуск «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». – Таганрог, 2014. – № 4 (153). – С. 171–177. **9.** Вовна А.В. Оптический измеритель концентрации метана с аппаратно-программной компенсацией температурного дрейфа / А.В. Вовна, А.А. Зори // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк, 2014. – Випуск 1 (26). – С. 178–188. **10.** Соломічев Р.І. Розробка та обґрунтування структури вимірювальної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей в шахтному виробітку / Р.І. Соломічев, О.В. Вовна, А.А. Зори // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – Харків, 2014. – № 19 (1062). – С. 154–163.

**Bibliography (transliterated):** 1. Derzhavne pidprijemstvo "Petrovs'kyj zavod vugil'nogo mashynobuduvannya". "Systemy kompleksnoi bezpeky", 1897. Web. 2 April 2015 < <http://itras.com.ua>>. 2. Ukraine Ministry of Coal Industry (2009), 24032:2009. *Pribory shahthnye gazoanaliticheskie. Obshhie trebovaniya, metody ispytaniya* [24032:2009 Minegas analysisinstruments. General requirements, test methods.], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine. 3. Vovna, A.V. et al. *Metody i sredstva analiticheskogo izmereniya koncentracii gazovyh komponent i pyli v rudnichnoj atmosfere ugol'nyh shaht.* Donetsk: GVUZ «DonNTU», 2012. 4. *Sbornik instrukcij k pravilam bezopasnosti v ugol'nyh shahtah*, Vol. 1. Kiev: Minpalivenergo, 2003. 5. Petruhin, P.M. et al. *Bor'ba s ugol'noj i porodnoj pyl'ju v shahtah.* Moscow: Nedra, 1981. 6. Senkus, V.V. Stefanjuk, B.M. and Lukin, K.D. "Koefficient vzryvobezopasnosti ugol'noj shahty." *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, No. 10. 2010. 23–27. Print. 7. Kaljakin, S.A. "Vzryvoopasnost' metanougol'nyh ajerozolej v gornyh vyrabotkah i pylegazovoj rezhim ugol'nyh shaht." *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, No. 6. 2013. 73–76. Print. 8. Vovna A.V. and Zori A.A. "Razrabotka i issledovanie jeksperimental'nogo obrazca izmeritelja koncentracii metana dlja ugol'nyh shaht." *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. Vypusk «Komp'juternye i informacionnye tehnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii»*, No. 4 (153). 2014. 171–177. Print. 9. Vovna, A.V. and Zori, A.A. "Opticheskij izmeritel' koncentracii metana s apparatno-programmnoj kompensaciej temperaturnogo drejfa." *Naukovi pracj Donetskogo nacional'nogo tehničnogo universitetu. Serija: «Obchisljuval'na tehnika ta avtomatizacija»*, No. 1 (26). 2014. 178–188. Print. 10. Solomichev, R.I., Vovna, A.V. and Zori, A.A. "Rozrobka ta obgruntuvannja struktury vymirjuval'noi systemy kontrolju vybuhonebezpečnyh pylo-gazovyh sumishej v shahtnomu vyrobтку." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac' «Elektroenergetyka ta peretvorjuval'na tehnika»*, No. 19 (1062). 2014. 154–163. Print.

Надійшла (received) 21 .05 .2015



*И. А. ШВЕДЧИКОВА*, д-р. техн. наук, проф. ВНУ им. В. Даля, Северодонецк;

*И. В. НИКИТЧЕНКО*, асп. ВНУ им. В. Даля, Северодонецк

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ШАХТНЫХ ВОД**

Определены основные загрязняющие составляющие шахтных вод. Разработана система экологического мониторинга параметров шахтных вод и предложена ее структура, основанная на модульном принципе построения, включающая в себя ряд взаимосвязанных модулей: модуль оценки параметров шахтных вод, модуль сбора, обработки и хранения данных, модуль «принятия решений». Показано, что предложенная система позволяет организовать контроль качества питьевой воды. Отмечено, что затопление шахт и химические процессы, происходящие в подземном выработанном пространстве, провоцируют выброс обедненного кислородом воздуха, представляющего опасность для живых организмов. Обоснована необходимость разработки новых приборов для контроля наиболее опасных параметров шахтных вод и рудничной атмосферы.

**Ключевые слова:** мониторинг состояния, обработка данных, анализ данных, база данных.

**Введение.** Одной из острейших глобальных проблем современности является проблема экологической безопасности. Ухудшение экологической обстановки, загрязнение окружающей среды (воды, почвы и т.д.) в немалой степени обусловлено негативным действием целого ряда техногенных факторов. Так, в Украине на протяжении последних десятилетий основным техногенным источником экологической опасности оставалась Чернобыльская атомная электростанция. Последствия аварии на этом объекте до сих пор полностью не устранены. Крайне неблагоприятная экологическая ситуация наблюдалась в последнее время и в угледобывающих районах востока Украины. К сожалению, военный конфликт, затронувший территории Донецкой и Луганской областей, только усугубил ее. Затопление шахт, обстрелы химических предприятий, влекущие выбросы химических веществ, и обострение санитарно-эпидемиологической ситуации создали реальную угрозу экологической катастрофы в этом регионе.

На сегодняшний день большинство угледобывающих предприятий находятся на неконтролируемых украинской властью территориях. Значительная часть расположенных здесь государственных шахт затоплены, многие уже не подлежат восстановлению. Особую опасность

© И. А. Шведчикова, И. В. Никитченко, 2015

представляют подземные шахтные воды, контроль уровня и параметров которых зачастую отсутствует. Под воздействием шахтных вод происходит загрязнение водоемов и рек, подтопление территорий, провалы земной поверхности [4].

**Анализ последних исследований и литературы.** В публикациях [2, 3] рассмотрены вопросы снижения загрязненности шахтных вод в подземных условиях и их использования в сельском хозяйстве. В работах [4-6] предложены принципы построения систем экологического мониторинга для горной и угледобывающей отраслей промышленности. Однако в указанных публикациях затрагиваются вопросы контроля параметров окружающей среды, а не шахтных вод.

В работе [7] отмечена важность проблемы контроля параметров шахтных вод, в частности, при закрытии угольных шахт, однако не предложены пути ее решения. В литературных источниках [8-11] затронуты вопросы автоматизации водоотлива в угольной промышленности, но конкретные схемы и пути комплексного решения проблемы шахтных вод не рассматриваются.

Таким образом, анализ информационных источников показал, что подавляющее большинство исследований посвящено решению вопросов очистки и использования шахтных вод. В то же время недостаточное внимание уделяется проблеме мониторинга экологических параметров шахтных вод.

**Цель статьи.** Настоящая статья посвящена разработке принципов построения системы экологического мониторинга для контроля параметров шахтных вод угледобывающих предприятий, пострадавших от военного конфликта.

**Постановка проблемы.** Шахтные воды относятся к сточным водам предприятий угольной промышленности. Они образуются в результате фильтрации подземных и поверхностных вод в подземные горные выработки. Шахты Донецкого бассейна являются наиболее обводненными в Украине. Водопроток большинства из них лежит в пределах от 100 до 1000 м<sup>3</sup>/ч. Для сравнения, водопроток шахт Львовско-Волынского угольного бассейна не превышает 100 м<sup>3</sup>/ч [12].

Шахтная вода подвергается различного рода загрязнениям и не может быть сброшена в водоемы без очистки и использована для технического водоснабжения без соответствующей обработки. Загрязнения шахтных вод делятся на органические, минеральные и бактериальные [12].

Органические загрязнения представлены частицами угля, продуктами жизнедеятельности живых организмов, разложением древесины и другими загрязнениями, основной составной частью которых является углерод. В условиях военного конфликта практически все шахтные воды загрязнены нефтепродуктами. Источником нефтепродуктов являются минеральные масла, применяемые для смазки машин и механизмов, автомобильный гражданский и военный транспорт. Степень органического загрязнения шахтных вод оценивается по показателям биохимической потребности в кислороде (БПК), химической потребности в кислороде (ХПК) и окисляемости.

Шахтные воды Донбасса имеют высокую минерализацию и большое количество окиси железа, что исключает их прямое использование в практической деятельности людей.

Минеральные загрязнения в шахтных водах находятся в растворенном и взвешенном состоянии. В Донбассе встречаются шахтные воды от слабосоленых (минерализация 1-3 г/л) до соленых (минерализация 10-25 г/л и выше). Наличие солей жесткости и большой минерализации шахтных вод способствует загрязнению водоёмов солями, ухудшает питьевые качества, а порой делает непригодными для использования. В шахтных водах присутствуют также загрязнения азотной группы [12].

Бактериальные загрязнения шахтных вод обусловлены наличием в них большого количества микроорганизмов, что является следствием попадания в воду продуктов гниения древесины и живых организмов. Это создаёт благоприятную среду для развития бактерий, среди которых могут быть патогенные, возбуждающие различные желудочно-кишечные заболевания.

В затопленных шахтах с течением времени может наблюдаться выделение «мертвого воздуха». Для нормальной жизнедеятельности организма в воздухе должно содержаться не менее 20,5% кислорода, а в «мертвом воздухе» доля кислорода не превышает 17%. Такой обедненный кислородом воздух может представлять опасность для всего живого и через многие годы после окончания военных действий. Следует также учитывать и тот факт, что на некоторых угольных шахтах Луганского региона скопилось более 100 тыс. м<sup>3</sup> отходов с техногенно усиленной естественной радиоактивностью, что может привести к активизации выделения радиоактивных газов (например, радона) [13].

Причиной появления «мертвого воздуха» являются химические процессы, происходящие в подземном выработанном пространстве, в результате чего выделяется и скапливается большое количество разных газов, что и приводит к уменьшению содержания кислорода. Теорети-

чески, на тех шахтах, где произошло затопление выработанного пространства полностью, «мертвый воздух» выходить не должен. Однако на практике в связи с колебаниями атмосферного давления и температуры наблюдается выделение «мертвого воздуха», которое усиливается в летнее время и замедляется – в зимнее.

С учетом вышеизложенного, актуальны исследования, направленные на решение эколого-технических задач угледобывающих предприятий, пострадавших от военного конфликта. Перспективным направлением таких исследований является разработка современных комплексных систем экологического мониторинга разнообразных параметров шахтных вод.

**Материалы исследования.** Системы экологического мониторинга разделяют на подсистемы. Системы экологического контроля бывают глобальные и региональные. Любая система экологического контроля является многоцелевой информационной системой. Ее основные задачи: наблюдение за состоянием контролируемых параметров, выявление факторов и источников воздействия, а также степени воздействия негативных факторов.

Рассмотрим схему системы экологического мониторинга, пригодную для контроля параметров шахтных вод (рис. 1). Наиболее универсальным подходом к определению структуры системы экологического контроля параметров шахтных вод является модульный принцип построения. Система состоит из ряда взаимосвязанных модулей: модулей оценки параметров шахтных вод, модуля сбора, обработки и хранения данных и модуля «принятия решений».

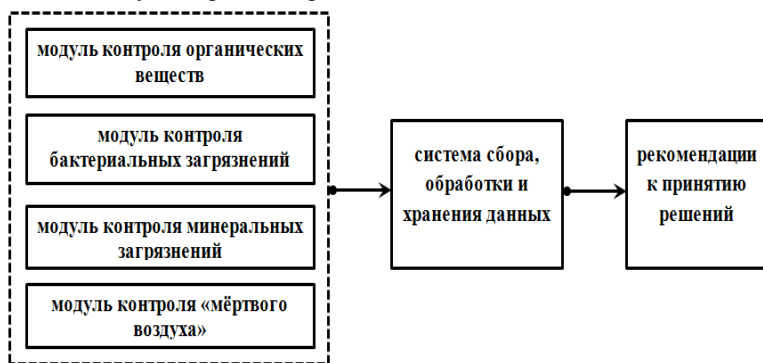


Рис. 1 – Система экологического мониторинга параметров шахтных вод

Центральным модулем является система сбора и обработки данных, в которую поступает информация от других блоков. В качестве центрального блока может выступать сервер базы данных, который с помощью специализированного программного обеспечения, например, системы управления базами данных, осуществляет сбор, накопление, первичную обработку и хранение данных. В систему сбора и обработки данных поступают данные от четырёх модулей: контроля органических веществ, контроля бактериальных загрязнений, контроля минеральных загрязнений, контроля «мертвого воздуха». Эти блоки являются основными в системе, но так как система имеет модульный тип построения, то при необходимости можно блоки контроля как добавлять, так и убирать в зависимости от поставленных задач и целей.

Модуль контроля органических веществ осуществляет контроль над частицами чистого угля, минеральными маслами, применяемыми для смазки машин и механизмов, продуктами жизнедеятельности живых организмов, разложения древесины и другими, основной составной частью которых является углерод (органический). Степень загрязнения шахтных вод органическими веществами оценивается по показателям БПК и ХПК.

БПК – биохимическая потребность в кислороде, которая определяется количеством кислорода необходимого для окисления органических веществ биологическим путем за определенный промежуток времени. Как правило, БПК находится в пределах 0,36-85,9 мгО<sub>2</sub>/л, по другим данным от 0,2 до 110 мгО<sub>2</sub>/л. Следующим показателем является ХПК – химическая потребность в кислороде, которая определяется количеством кислорода, необходимого для окисления всех загрязняющих веществ в воде с помощью различных химических веществ - окислителей. Показатели ХПК разнообразны для вод даже в пределах одного бассейна от 5 до 250 мгО<sub>2</sub>/л.

Модуль контроля бактериальных загрязнений оценивает степень бактериального загрязнения шахтных вод. Оценка производится в основном двумя микробиологическими показателями: колититром и колииндексом. Колититр – это количество воды (мл/л или см<sup>3</sup>), в котором обнаруживается одна кишечная палочка. Колииндекс – количество кишечных палочек на 1 л исследуемой воды.

Модуль контроля минеральных загрязнений осуществляет контроль за песчанистыми и глинистыми частицами, минеральными включениями углей, инертной пылью, а также содержанием в шахтных водах растворенных солей, щелочей и кислот.

Модуль контроля «мертвого воздуха», осуществляет контроль за двумя газами: N<sub>2</sub> и СО<sub>2</sub>. Контроль этих параметров необходимо произ-

водить с помощью газоанализаторов. Этот модуль является очень важным для сохранения безопасности и здоровья людей, так как мёртвый воздух может оказаться и на поверхности. Поднимаясь через многочисленные геологические трещины, пустоты над подработанной горными работами территорией земной поверхности, он попадает в подвалы жилых зданий, колодцы, погреба, откуда не может «вытечь» [14].

Накопленная информация в системе сбора и обработки данных оформляется в базу данных, которая хранится на файл-сервере базы данных. Из этой структуры можно осуществлять выборки необходимых данных по запросу, которые отвечают тем или иным критериям. Форма выдачи результата может быть любой, в зависимости от конкретного вида программного обеспечения. Например, таблица, график, диаграмма и др.

Полученные данные можно экспортировать в различные форматы в зависимости от того, где необходимо применение полученных данных и результатов (MS Word, MS Excel, MS Access и т.д.). Импорт данных даёт возможность пользователям настроить потоковый ввод данных в программу из текстовых файлов и файлов локальных баз данных.

Пользователю предоставляются развитые средства ведения баз данных, корректировки, добавления и удаления данных на различных уровнях (поле данных, запись, база данных). Программы обработки данных наблюдений позволяют получать различного рода расчетные данные, характеризующие состояние шахтных вод, выявлять динамику изменения качества вод во времени и пространстве.

Последний модуль «рекомендации к применению решений» представляет собой комплекс мер по предотвращению и устранению неблагоприятного экологического состояния в шахтных водах.

Все данные, характеризующие состояние шахтных вод, полученные в результате наблюдений или прогноза, должны оцениваться в зависимости от того, в какой области они используются. Оценка, подразумевает определение ущерба от воздействия и выбор оптимальных условий, определение существующих экологических резервов. При такого рода оценках подразумевается знание допустимых нагрузок на природную среду.

Представленная система является необходимой для правильной организации контроля качества питьевой воды. Наблюдение за изменениями параметров вод, источниками и факторами воздействия должны включать в себя: наблюдение за локальными источниками воздействия и за состоянием среды, характеризующих геофизическими и геохимическими данными.

При осуществлении контроля параметров шахтных вод необходима организация достаточно представительной сети наблюдений и измерений наиболее важных факторов воздействия.

Для слежения за состоянием и динамикой изменения параметров шахтных вод в первую очередь важно знать критерии изменения общей структурно-функциональной организации экосистем.

В связи с ограниченными на сегодняшний день возможностями оценки состояния экологических систем по количественным показателям на современном этапе развития биомониторинга перспективными являются сравнительные системы оценок.

В сложившейся на сегодняшний день обстановке, когда территорию Донбасса можно считать, как минимум, зоной напряженной экологической ситуации, для обеспечения действительного устойчивого развития и своевременного принятия решений, необходимо разрабатывать системы контроля в реальном времени.

**Выводы.** Предложена обобщенная структура комплексной системы контроля параметров шахтных вод. Установлено, что основными контролируемыми параметрами шахтных вод являются параметры, характеризующие органические, бактериальные, минеральные загрязнения, а также состав «мертвого воздуха». Модульный принцип построения системы позволяет обеспечить универсальность и легкоизменяемость системы для различных условий использования. В дальнейших исследованиях планируется разработка экологического прибора контроля «мертвого воздуха» как одного из наиболее опасных параметров шахтных вод и параметров рудничной атмосферы в целом.

**Список литературы:** 1. *Красник В. Г.* Технологические возможности и перспективы использования водного и теплового потенциалов шахтных вод Украины / В. Г. Красник, В. М. Остапенко, Н. М. Уланов. // Уголь Украины. – 2005. – №12 – С. 76. 2. *Матлак Е. С.* Снижение загрязненности шахтных вод в подземных условиях / Е. С. Матлак, В. В. Малеев. – К: Техника, 1991. – 136 с. 3. *Запольський А. К.* Водопостачання, водовідведення та якість води / А. К. Запольський. – К: Вища шк, 2005. – 671 с. 4. *Певзнер М. Е.* Горное дело и охрана окружающей среды / М. Е. Певзнер. – М: МГТУ, 2000. – 300 с. 5. *Бельдеева Л. Н.* Экологический мониторинг / Л. Н. Бельдеева. – Барнаул: АлтГТУ, 1999. – 122 с. 6. *Панарин В. М.* Современные системы контроля загрязнения атмосферного воздуха промышленными предприятиями / В. М. Панарин, Г. В. Павпертов, А. А. Зуйкова. – Москва Тула, 2004. 7. *Ярембаша И. Ф.* Технология закрытия (ликвидации) угольных шахт / И. Ф. Ярембаша. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – 238 с. 8. *Губка Ю.О., Оголобченко А.С.* Исследование способа управления автоматизированным ступенчатым водоотливом с учетом периодов максимальных нагрузок в системе электроснабжения шахты / Ю. О. Губка, А. С. Оголобченко – X Международная научно-техническая конференция аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» – Донецк, 2010 г. 9. *Бессараб В. И.* Управление шахтной водоотливной установкой в аварийных и аномальных режимах работы

[Электронный ресурс] / В. И. Бессараб, Р. В. Федюн, В. А. Попов // ДонНТУ – Режим доступу до ресурсу: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/6262/1/bessarab.pdf>. **10.** Курносое В. Г. Научные основы автоматизации в угольной промышленности: опыт и перспективы развития / В. Г. Курносое, В. И. Силаев. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2009. – 422 с. **11.** Федюн Р. В. Принципы построения цифровых систем управления многоступенчатыми водоотливными установками угольных шахт / Р. В. Федюн. – Днепропетровск: РИК НГА Украины, 2001. – 254 с. **12.** В.М. Панарин, В.Г. Павпертов. Ранжирование промышленных объектов по степени опасности. Современные проблемы экологии и рационального природопользования. Материалы 3-ей Научно-практической конференции. - Тула. – 2010. **13.** Долина Л.Ф. Сточные воды предприятий горной промышленности и методы их очистки. Справочное пособие. / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск, 2000. – 61 с. – Режим доступу до ресурсу: [Eadnurt.diiit.edu/ua/bitstream/123456789/788/1/mining.pdf](http://Eadnurt.diiit.edu/ua/bitstream/123456789/788/1/mining.pdf). **14.** Удалов И.В. Активизация выделения радона при «мокрой» консервации угольных шахт / И.В. Удалов // Вопросы атомной науки и техники: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1996. – С. 126-129.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Krasnik V. G. Tehnologicheskie vozmozhnosti i perspektivy ispol'zovaniya vodnogo i teplovogo potencialov shahitnyh vod Ukrainy / V. G. Krasnik, V. M. Ostapenko, N. M. Ulanov. // Ugol' Ukrainy. – 2005. – No12 – 76. **2.** Matlak E. S. Snizhenie zagryaznenosti shahitnyh vod v podzemnyh uslovijah / E. S. Matlak, V. V. Maleev. – Kiev Tehnika, 1991. – 136. **3.** Zapol's'kij A. K. Vodopostachannja, vodovidvedennja ta jakist' vodi / A. K. Zapol's'kij. – Kiev Vishha shk, 2005. – 671. **4.** Pevzner M. E. Gornoe delo i ohrana okruzhajushhej sredy / M. E. Pevzner. – Moscow MGTU, 2000. – 300. **5.** Bel'deeva L. N. Jekologicheskij monitoring / L. N. Bel'deeva. – Barnaul: AltGTU, 1999. – 122. **6.** Panarin V. M. Sovremennye sistemy kontrolja zagryaznenija atmosfernogo vozduha promyshlennymi predpriyatijami / V. M. Panarin, G. V. Pavpertov, A. A. Zujkova. – Moskva Tula, 2004. **7.** Jarembasha I. F. Tehnologija zakrytija (likvidacii) ugol'nyh shahit / I. F. Jarembasha. – Doneck: Nord-Press, 2004. – 238. **8.** Gubka Ju.O., Ogolobchenko A.S. Issledovanie sposoba upravlenija avto-matizirovannym stupenchatym vodootlivom s uchetom periodov maksimal'nyh nagruzok v sisteme jelektrosnabzhenija shahity / Ju. O. Gubka, A. S. Ogolobchenko – H Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija aspirantov i studentov «Avtomatizacija tehnologicheskikh ob#ektov i processov. Poisk molodyh» – Doneck, 2010. **9.** Bessarab V. I. Upravlenie shahitnoj vodootlivnoj ustanovkoj v avarijnyh i anomal'nyh rezhimah raboty [Elektronnij resurs] / V. I. Bessarab, R. V. Fedjun, V. A. Popov // DonNTU – Rezhim dostupu do resursu: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/6262/1/bessarab.pdf>. **10.** Kurnosov V. G. Nauchnye osnovy avtomatizacii v ugol'noj promyshlennosti: opyt i perspektivy razvitija / V. G. Kurnosov, V. I. Silaev. – Doneck: Veber (Doneckoe otdelenie), 2009. – 422. **11.** Fedjun R. V. Principy postroenija cifrovych sistem upravlenija mnogostupenchatymi vodootlivnymi ustanovkami ugol'nyh shahit / R. V. Fedjun. – Dnepropetrovsk: RIK NGA Ukrainy, 2001. – 254. **12.** V.M. Panarin, V.G. Pavpertov. Ranzhирование промышленных объектов по степени опасности. Современные проблемы jekologii i racional'nogo prirodopol'zovaniya. Materialy 3-ej Nauchno-prakticheskoi konferencii. - Tula. – 2010. **13.** Dolina L.F. Stochnye vody predpriyatij gornoj promyshlennosti i metody ih ochistki. Spravochnoe posobie. / L.F. Dolina. – Dnepropetrovsk, 2000. – 61. – Rezhim dostupu do resursu: [Eadnurt.diiit.edu/ua/bitstream/123456789/788/1/mining.pdf](http://Eadnurt.diiit.edu/ua/bitstream/123456789/788/1/mining.pdf). **14.** Udalov I.V. Aktivizacija vydelenija radona pri «mokraj» konservacii ugol'nyh shahit / I.V. Udalov // Voprosy atomnoj nauki i tehniki: Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie, 1996. – 126-129.



**К. А. ЛІТВИНОВ**, аспірант, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Сєверодонецьк

## РЕПЕРНИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РІВНЕМІРА З КІЛЬЦЕВИМ РУХОМ ЕЛЕКТРИЧНОГО СИГНАЛУ

Досліджується принцип формування реперного сигналу в ультразвукових рівнемірах з кільцевим рухом електричного сигналу. Показано, що відношення тривалості руху УЗС в прямому та зворотному напрямку не залежить від рівня рідини в ємності та може бути використано як реперний сигнал. Так як зворотний УЗС проходить подвійну відстань в газовому середовищі, то його зміна за рахунок відхилення впливових факторів є більшою, ніж для УЗК прямого руху, що можна використати для уведення поправки в результат вимірювального контролю рівнеміра.

**Ключові слова:** рівень, рідина, вимірювання, перетворення, ультразвук, реперний сигнал, імпульс, випромінювач, середовище.

**Вступ.** Сучасні ультразвукові рівнеміри (УЗР) рідинних середовищ (РС), як правило, засновані на вимірюванні часу проходження ультразвукового сигналу (УЗС) від випромінювача (УЗВ) до приймача (УЗП). При цьому УЗС проходить подвійну відстань в газовому середовищі (ГС) – від випромінювача ультразвукового імпульсу (УЗІ) до поверхні РС і в зворотному напрямку [1-3]. Так як в ГС може змінюватися температура, тиск, а також його склад, наприклад, за рахунок випаровування рідини, то змінюватиметься й швидкість розповсюдження УЗС, котра визначається за формулою:

$$v_c = \sqrt{k_a P / \rho_c}, \quad (1)$$

де  $k_a$  – адиабатичний коефіцієнт для газів,  $P$  – тиск ГС,  $\rho_c$  – густина ГС.

Так як згідно зі законом Менделєєва-Клапейрона [4, 5] густина газу  $\rho_c = M_c P / R_c T$ , де  $M_c$  – молекулярна вага газової суміші;  $R_c$  – універсальна газова стала,  $T$  – температура, то швидкість розповсюдження УЗС у ГС дорівнюватиме:

$$v_c = \sqrt{k_a R_c T / M_c}. \quad (2)$$

Аналізуючи рівняння (1) і (2), приходимо до такого висновку: рівняння (1) є найбільш ефективним для використання в УЗР, так як існують засоби для достатньо точного вимірювання абсолютного тиску та густини газових сумішей, що дозволяє вводити відповідні поправки до результату вимірювального контролю рівня РС [6, 7]. Рівняння (2) є більш зручним при вимірюванні рівня рідин з постійним складом ГС в резервуарах і достатньо високою температурою їх пароутворення. У сучасних УЗР, як правило, вводиться поправка на зміну температури ГС, що звичайно є недостатнім для забезпечення високої точності вимірювального контролю. Окрім того в багатьох УЗР з метою зменшення похибок вимірювального контролю використовуються реперні пристрої (репери), котрі розташовуються в ГС на деякій відстані від УЗВ. Так як у цьому випадку відстань від репера до УЗВ є сталою, то час проходження УЗІ визначатиметься тільки зміною тиску та густини ГС (рівнозначно зміною температури та складу газу). Як правило, в УЗР з реперним пристроєм використовується один і той же УЗІ, котрий спочатку відбивається від репера, а потім від поверхні РС. До основних недоліків таких УЗР є достатньо велика зона нечутливості, яка досягає до 0,6 метри, що призводить до неефективного використання ємкості та складнощів при вимірюванні рівня рідин в технологічних апаратах з малою висотою. Враховуючи, що ультразвуковий метод вимірювального контролю рівня відноситься до одних з найбільш простих і точних, то дослідження способів підвищення їх точності та розширення діапазону вимірювального контролю є важливою науково-технічною задачею.

**Мета статті і постановка досліджень.** Метою статті є теоретичне обґрунтування методу реперного сигналу для підвищення точності вимірювального контролю рівня РС, побудованого на сталості відношення товщини газового середовища при прямому та зворотному русі УЗІ. До основних задач роботи відноситься: фізичне та математичне обґрунтування принципу формування реперного сигналу, а також описання алгоритму його використання для підвищення точності вимірювального контролю.

**Фізичне обґрунтування принципу формування реперного сигналу.** Принцип роботи УЗР з реперним сигналом пояснюється схемою, приведеною на рис 1, де позначено: 1 – блок формування УЗІ; 2 – кабель; 3 – захисна металева мембрана; 4 – проміжний блок передачі УЗІ; 5 – поверхня РС; 6 – поплавок; 7 – електрод; 8 – основний приймач УЗС; 9 – УЗС прямого напрямку руху; 10 – УЗС зворотного напрямку руху; 11 – блок управління та обробки вимірювальної інфор-

мації. Блок 1 одночасно працює як випромінювач УЗК  $E_I$ , так і їх приймачем після повернення цього сигналу  $E_P$  від блоку 2. Принцип роботи рівнеміра полягає в наступному. Блок управління (БУ) 11 формує електричний збуджуючий імпульс (ЕЗІ), котрий поступає у блок 1, де він перетворюється в УЗІ. Останній по ізольованому кабелю 2 передається до проміжного передаючого блоку 4 і далі через захисну мембрану 3 до ГС товщиною  $R$ . Пройшовши це середовище, УЗІ сприймається блоком 8, перетворюється в електричний сигнал і поступає в БУ 11 для обробки. Від приймаючої мембрани блоку 8 УЗІ відбивається, знову направляється в ГС, досягає блоку 4 і по кабелю поступає до блоку 1, у котрому перетворюється в електричний сигнал. Останній поступає в блок 11 для подальшої обробки. Таким чином, УЗР має два напрямки проходження УЗІ. Один (прямий) від блоку 1 до блоку 8 через ГС і другий (зворотний) – від блоку 8 до блоку 1. Різниця між основним і зворотним сигналами полягає в тому, що прямий УЗІ проходить ГС товщиною  $R$  один раз (від блоку 4 до приймача 8), а зворотний - два рази. Ці сигнали є послідовними, формуються одним і тим же ЕЗІ і не накладаються один на інший, як це має місце у відомих рівнемірах з реперними пристроями.

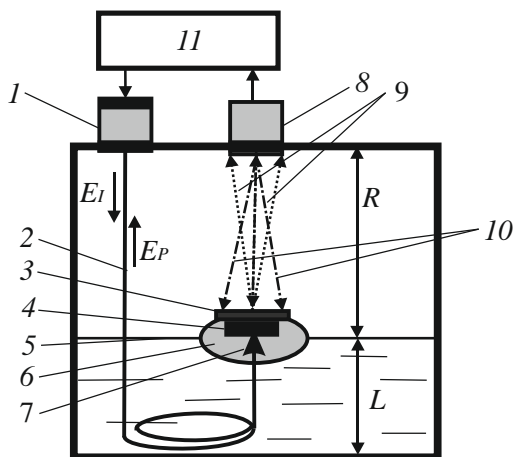


Рис. 1 - Схема ультразвукового УЗР зі зворотним напрямком руху УЗІ

Час проходження УЗІ вимірюється як для прямого ( $t_1$ ), так і для зворотного ( $t_2$ ) напрямку, починаючи з моменту подачі ЕЗІ в блок 1 до моменту появи відповідних напруг на вході в БУ 11. Тривалості часу  $t_1$  і  $t_2$  запам'ятовуються у відповідному пристрої і використовуються для розрахунку рівня  $L$  РС та уведення поправки у результат вимірювального контролю.

**Математичні моделі УЗР.** Як показано в [8] час проходження УЗІ у ГС при деякому спрощенні описується наступним рівнянням

$$t_1 = R_L \left\{ \frac{u_0}{U_E \sqrt[3]{U_E}} \left[ \frac{2k_\zeta m_c (v_{\Pi} \rho_{\Pi})^2 D_M D_i^2 \sqrt[3]{D_i \rho_{\Pi} \omega - 1}}{2K_0 v_c (1 + k_\zeta v_M) k_1 S_{\Pi}^5 D_{\Pi}^3 \sqrt[3]{D_{\Pi}} [\sin(\omega t_k)]^2} \right] \right\}, \quad (3)$$

де  $R_L$  - відстань від поверхні РС до приймача УЗІ;  $U_E$  - напруга електричного збуджуючого сигналу;  $u_0$  - опорна напруга;  $K_0$  - коефіцієнт передачі вимірювальної схеми;  $k_\zeta$  - стала;  $m_c$  - маса коливальної системи приймача УЗІ;  $v_{\Pi}$  - лінійна швидкість руху пластини п'єзокерамічного елемента (ПКЕ);  $D_{\Pi}$  - жорсткість пластини;  $k_1$  - коефіцієнт демпфірування її руху (приймається, що пластини ПКЕ жорстко кріпляться до металевої захисної мембрани і створює коливальну систему);  $S_{\Pi}$  - активна площа пластини ПКЕ;  $\rho_{\Pi}$  - щільність керамічного матеріалу ПКЕ;  $D_i$  - коефіцієнт перетворення  $i$ -го реологічного переходу;  $D_M$  - ефективний коефіцієнт перетворення коливальної системи;  $\omega$  - частота вільних коливань системи;  $v_c$  - швидкість руху коливальної системи;  $v_M$  - швидкість перенесення електромагнітної енергії;  $t_k$  - час вільних коливань.

У рівнянні (3) позначимо коефіцієнт перетворення

$$N_1 = \frac{u_0}{U_E \sqrt[3]{U_E}} \left[ \frac{2k_\zeta m_c (v_{\Pi} \rho_{\Pi})^2 D_M D_i^2 \sqrt[3]{D_i \rho_{\Pi} \omega - 1}}{2K_0 v_c (1 + k_\zeta v_M) k_1 S_{\Pi}^5 D_{\Pi}^3 \sqrt[3]{D_{\Pi}} [\sin(\omega t_k)]^2} \right]. \quad (4)$$

Тоді, приймаючи до уваги, що залежність  $t_1 = f(R)$  є лінійною, з (3) отримуємо:

- для прямого ходу УЗІ поточне значення часу:

$$t_1 = N_1 R_1; \quad (5)$$

- для зворотного ходу УЗІ поточне значення часу:

$$t_2 = N_1 R_1 + N_2 R_2 = t_1 (1 + N_2 R_2 / N_1 R_1). \quad (6)$$

Так як вимірювальна відстань при прямому та зворотному ході УЗІ є сталою, то  $R_1 = R_2$ . Тоді рівняння (6) набуває такої форми:

$$t_2 = N_1 R_1 + N_2 R_2 = t_1 (1 + N_2 / N_1), \quad (7)$$

або

$$t_2 / t_1 = (1 + N_2 / N_1). \quad (8)$$

Так як параметр  $N_1$  визначається тільки прямим ходом УЗІ, а  $N_2$  - прямим і зворотним його ходом, то рівняння (8) можна записати таким чином:

$$\frac{t_2}{t_1} = 1 + \left( \frac{N_1 \pm \Delta N}{N_1} \right) = 2 \pm \frac{\Delta N}{N_1}, \quad (9)$$

де  $\Delta N = N_2 - N_1$ .

Якщо зміна параметрів перетворення УЗР є відсутньою, то для лінійної статичної характеристики за зворотним напрямом руху УЗІ  $\Delta N = 0$  і  $t_2 = 2t_1 = const$ . Якщо є зміна параметрів перетворення, наприклад, за рахунок відхилення температури ГС, тиску чи складу газу від їх номінальних значень, то це приводить до відповідної зміни відношення  $t_2 / t_1 = 2 \pm \Delta t / t_1$ , де  $\Delta t$  - абсолютна похибка вимірювального контролю. Враховуючи сказане, рівняння (9) приводиться до такого вигляду:

$$\pm \Delta N = N_{10} \left( \frac{t_2}{t_1} - 2 \right), \quad (10)$$

де  $N_{10}$  - номінальне значення параметра.

З рівняння (10) видно, що абсолютна похибка вимірювального контролю рівня запропонованого рівнеміра повністю визначається відношенням часу зворотного та прямого ходу УЗІ. Якщо номінальне (реперне) значення співвідношення часу  $k_{r0} = 2$ , а поточне  $k_r = t_2 / t_1$ , то рівняння (10) приводиться до такої форми:

$$\Delta N = N_{10} (k_r - k_{r0}). \quad (11)$$

Так як  $N_1 = t_1 / R_1$ , то розклавши цю рівність у ряд Тейлора та обмежившись його лінійною складовою, отримуємо:  $\Delta N = t_1 \Delta R_1$ . Підставивши цей вираз у (11) маємо:

$$\delta_L = \Delta k_t / (1 \pm \delta_{t_1}), \quad (12)$$

де  $\delta_L = \Delta L / L$  - відносна похибка вимірювального контролю рівня РС;  $\Delta k_t = k_t - k_{t_0} = k_t - 2$  - абсолютна зміна коефіцієнта співвідношення часу зворотного та прямого ходу УЗІ;  $\delta_{t_1} = \Delta t_1 / t_1$  - відносна похибка вимірювального контролю часу прямого ходу УЗІ.

Так як реальний коефіцієнт співвідношення часу  $k_t$  визначається при кожному вимірюванні, то він є відомим і запам'ятовується вимірювальною схемою рівнеміра. Враховуючи, що номінальне значення цього коефіцієнта теж є відомим і рівним 2, то розраховується приріст коефіцієнта співвідношення, який обумовлений відхиленням впливових факторів від їх номінальних значень. Рівняння для зміни коефіцієнта співвідношення  $\Delta k_t$  запишемо таким чином:

$$\Delta k_t = k_t - 2 = (\Delta t_2 - 2\Delta t_1) / t_1 = \Delta t / t_1. \quad (13)$$

З (13) можна визначити час  $\Delta t$ , який потрібно додати до вимірюваного часу  $t_1$  (або відняти від нього), щоби зменшити вплив зміни зовнішнього чи внутрішнього фактора:

$$\Delta t = \Delta k_t t_1 = t_2 - 2t_1. \quad (14)$$

Блок-схема роботи вимірювальної схеми рівнеміра приведена на рис. 2, на якому позначено: 1 - блок формування ЕЗІ; 2 - приймач УЗІ зворотного ходу; 3 - захисна металева мембрана; 4 - перетворювач; 5 - рівень РС; 6 - поплавок; 7 - електрод; 8 - приймач УЗІ прямого ходу; 9 - УЗІ прямого ходу; 10 - УЗІ зворотного ходу; 11 - підсилювач електро-рушійної сили (ЕРС) прямого ходу УЗІ; 12 - підсилювач ЕРС зворотного ходу УЗІ; 13 - блок живлення; 14 - блок визначення амплітуди сигналу; 15 - мікропроцесорний контролер блоку управління (БУ); 16 - компаратор; 17 - блок нормалізації; 18 - мікропроцесорний контролер блоку обробки інформації (БОІ); 19 - блок пам'яті; 20 - блок індикації.

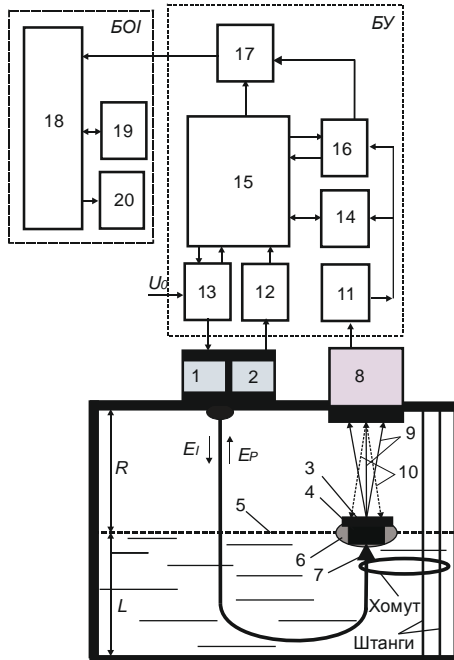


Рис. 2 - Блок-схема процесу вимірювання рівня

**Принцип роботи вимірювальної схеми УЗР.** Блок 13, який призначений для живлення електричної вимірювальної схеми рівнеміра, формує ЕЗІ заданою амплітудою  $E_I$  і подає його по кабелю до перетворювача 1, який перетворює цей електричний сигнал в УЗІ за допомогою ПКЕ 4. Так як ПКЕ жорстко зв'язаний з металевою мембраною 3, то УЗІ випромінюються в ГС товщиною  $R$ . Після проходження цього середовища УЗІ сприймаються приймачем 8, у котрому перетворюються в ЕРС з частотою УЗІ, формуючи таким чином електричний сигнал прямого ходу. Далі цей сигнал поступає на підсилювач 11, блок 14 визначення амплітуди та компаратор 16. Одночасно ці УЗІ відбиваються від поверхні приймача 8 і повертаються до перетворювача 4 і далі по кабелю до приймача 2, формуючи таким чином сигнал зворотного ходу  $E_p$ . Останній поступає в підсилювач 12 і далі направляється в контролер БУ 15. В останній поступає також сигнал прямого ходу. У БУ запам'ятовуються сигнали прямого та зворотного ходу УЗІ, визначається час прямого  $t_1$  та зворотного  $t_2$  ходу, розраховується коефіцієнт їх

співвідношення, порівнюється цей коефіцієнт з опорним і визначається різниця  $\Delta t = t_2 - 2t_1$ . Якщо  $\Delta t \neq 0$ , то включається генератор тактових імпульсів, який послідовно генерує імпульси відповідної тривалості і подає їх на компаратор 16. Одночасно з генератором тактових імпульсів включається лічильник, котрий відраховує їх кількість до тих пір, поки не виконуватиметься наступна рівність:  $t_i N = \Delta t$ , де  $t_i$  - тривалість тактового імпульсу,  $N$  - їх кількість, відрахованих лічильником. У блоці 16 уводиться відповідна поправка і корегований сигнал поступає в підсилювач 17, а далі подається в контролер 18 БОІ.

**Висновки.** Дослідження УЗР рідинних середовищ з кільцевим рухом електричного сигналу показали, що для підвищення точності вимірювального контролю можна використати принцип зворотного напрямку руху УЗІ в ГС. Так як зворотний УЗІ проходить подвійну відстань в ГС, то при нормованих його параметрах відношення часу, за який УЗІ проходить цю відстань, до часу проходження УЗІ прямого напрямку руху є сталою величиною і не залежить від вимірювального рівня. У цьому випадку коефіцієнт співвідношення часу зворотного та прямого напрямку руху УЗІ дорівнює відношенню відповідної товщини ГС і дорівнює двом. Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що коефіцієнт співвідношення часу змінюється тільки в разі відхилення впливових зовнішніх чи внутрішніх факторів від їх номінальних значень. Таким чином відхилення коефіцієнта співвідношення від його нормованого значення можна використати для формування поправки до результату вимірювального контролю. Реалізація такого принципу формування реперного сигналу є достатньо простою і не вимагає наявності механічних реперних пристроїв. Особливо ефективними є такі рівнеміри при вимірювальному контролі рівня в трубопроводах та ємностях малої висоти.

**Список літератури:** 1. *Бабиков О. И.* Контроль уровня с помощью ультразвука / *О. И. Бабиков.* – Л. : Энергия, 1971. – 98 с. 2. *ФрайденДж.* Современные датчики. Справочник / *Дж. Фрайден.* – М. : Техносфера, 2006. – 592 с. 3. *Жданкин В. К.* Приборы для измерения уровня / *В. К. Жданкин* // Современные технологии автоматизации. – М. : СТА-ПРЕСС, 2002. – № 2. – С. 6 – 19. 4. *Кузьмичев В. Е.* Законы и формулы физики / *В. Е. Кузьмичев.* – К. : Наук. думка, 1989. – 864 с. 5. *Кухлинг Х.* Справочник по физике / *Х. Кухлинг.* – М. : Мир, 1982. – 520 с. 6. *Стенцель Й. І.* Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин / *Й. І. Стенцель, А. В. Томсон, А. В. Рябіченко* // МНТЖ «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2006. – № 2 (28). – С. 55-58. 7. *Стенцель Й. І.* Аналіз похибок вимірювання ультразвукових рівнемірів / *Й. І. Стенцель, А. В. Томсон, А. В. Рябіченко* // Вісник національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХП» - № 48. – 2008. – С. 55-60. 8. *Літвінов К. А.* Математичні моделі випромінювача ультразвукових рівнемірів / *К. А. Літвінов* //



**Bibliography (transliterated):** 1. Babikov, O. I. *Kontrol' urovnja s pomoshh'ju ul'trazvuka*. Leningrad: Jenergija, 1971. Print. 2. Frajden, Dzh. *Sovremennye datchiki. Spravochnik*. Moscow: Tehnosfera, 2006. Print. 3. Zhdankin, V. K. "Pribory dlja izmerenija urovnja." *Sovremennye tehnologii avtomatizacii*. No.2. Moscow: STA-PRESS, 2002. 6-19. Print. 4. Kuz'michev, V. E. *Zakony i formuly fiziki*. Kyiv: Nauk. dumka, 1989. Print. 5. Kuhling, H. *Spravochnik po fizike*. Moscow: Mir, 1982. Print. 6. Stencil', J. I., A. V. Tomson and A. V. Rjabichenko "Matematichni modeli ul'trazvukovih rivnemiriv ridin." *MNTZh "Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah"*. No. 2. Hmel'nic'kij, 2006. 55-58. Print. 7. Stencil', J. I., A. V. Tomson and A. V. Rjabichenko. "Analiz pohibok vimirjuvannja ul'trazvukovih rivnemiriv." *Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu "KhPI"*. *Zbirk naukovih prac'. Tematicnij vipusk: Priladi ta metodi nerujnivnogo kontrolju*. No. 48. Harkiv: NTU "HP", 2008. 55-60. Print. 8. Litvinov, K. A. "Matematichni modeli viprominjuvacha ul'trazvukovih rivnemiriv." *Visnik Shidnoukrains'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja*. No. 9(216). 2014. 108-113. Print.

Надійшла (received) 29.04.2015

УДК 681.586.773

**Й. І. СТЕНЦЕЛЬ**, докт. техн. наук, проф. СЧУ ім. В. Даля,  
Северодонецьк;  
**О. І. ПРОКАЗА**, канд. техн. наук, доцент СЧУ ім. В. Даля,  
Северодонецьк

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДІАГНОСТИКИ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ ЗА СТАНОМ МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

Досліджуються біохімічні процеси (БХП) в шлунку людини на основі теорії реологічних незворотних фазових перетворень. Показано, що в шлунку проходять масо- тепло- та енергообмінні процеси, котрі супроводжуються біохімічними реакціями. Запропонована фізична модель реологічного переходу, при котрому шлунок являє собою зону реологічного перетворення (ЗРП) зі стоком маси та енергії. У ЗРП проходять БХП з відповідною швидкістю та їх розподіленням за координатами й часом. Співвідношення сталих часу динамічних процесів в ЗРП та швидкості стоку маси та енергії є одним з основних показників для діагностування стану здоров'я людини.

**Ключові слова:** людина, процес, метод, масообмін, енергообмін, реологія, перетворення, рівняння, теплота, концентрація.

**Вступ.** Дослідження процесів перенесення маси в біологічному організмі привело до подальшого, більш чіткого розуміння багатьох аспектів явищ, котрі виникають при різноманітних процесах їх захво-

рювання. Але причини зміни біохімічних процесів (БХП), пов'язаних з рухом матеріальних, теплових та енергетичних потоків у таких організмах, котрі викликають відхилення від нормованого стану здоров'я людини, а фактично появу захворювання до цього часу ще залишаються не вивченими як теоретично, так й експериментально. Явища перенесення кількості маси й теплової енергії в людському організмі відносяться до складних і взаємопов'язаних, що можуть проявлятися в різних аспектах, наприклад, зміні температури, кольорового забарвлення продуктів переробки матеріальних потоків, надмірного відкладання високомолекулярних жирів, появи побічних біохімічних процесів, котрі викликають такі негативні явища, як зараження окремих елементів та організму в цілому, відхилення складу крові тощо.

Як відомо [1-5], з метою функціональної діяльності людина періодично споживає харчові продукти, воду та повітря, котрі складають відповідні матеріальні потоки.

Для приймання та первинної переробки твердих і рідинних матеріальних потоків використовується шлунок, котрий фактично являє собою біохімічний реактор, а для повітря – легені, котрі являють собою абсорбер. Шлунок біологічного організму відноситься до складної біохімічної системи, яка містить в собі змішувач речовин, екстрактор, теплообмінник, дозатори, хімічний реактор, елементи попередньої ректифікації речовин тощо. У шлунку проходить деяка відгонка й абсорбція цінних продуктів екстракторного та біохімічного процесу, а створений залишок періодично відводиться в кишкову систему, яка призначена для вилучення потрібних організму речовин. Кубовий залишок з кишкової системи періодично виводиться з організму. Окрім того, шлунок являє собою універсальну електролітичну комірку, в якій проходить розділення солей, кислот і лугів на йони металів або гідрогену та молекулярний залишок. Наприклад, харчова сіль  $NaCl$  розділяється на йон натрію  $Na$  (катіон) та йон хлору  $Cl_2$  (аніон), вуглекислоти  $H_2CO_3$  – на йон гідрогену  $H_2$  та кисню  $O_2$  (з  $CO_2$ ) [6]. У свою чергу  $Cl_2$  і  $H_2$  створюють в шлунку соляну кислоту  $HCl$ , а кисень  $O_2$  використовується для біохімічного окислення речовин органічного та неорганічного походження продуктів живлення [7, 8].

Легенева система виконує роль нагнітальної помпи, абсорбера кисню з повітря та концентратора кисню в потоці крові, який використовується для роботи синусового вузла серцево-судинної системи, живлення мозкової системи, створення різноманітних ферментів в життезабезпечуючих елементах організму (наприклад, підшлунковій системі, печінці та інших елементах), а також для БХП шлунку. Таким чином,

існує певний зв'язок між основними матеріальними потоками людського організму – матеріальним потоком у формі суспензії, котрий поступає в шлунок, і потоком газу, який видихається з легенів [9]. Задача полягає в тому, щоби показати, яке співвідношення цих потоків є найбільш оптимальним для людського організму. У статті досліджуються БХП, котрі протікають у шлунку людського організму.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Біохімічні процеси, котрі протікають в людському організмі проходять в рідинно-твердій фазі, котра являє собою суспензію відповідної густини. Остання постійно перемішується, що сприяє практично рівномірному її перетравлюванню. При підвищенні густини цієї суспензії у людини виникає потреба у вживанні води. Так як вода практично не дисоціюється в шлунку, то можна прийняти, що вона використовується в організмі людини як розчинник і для перенесення теплової енергії та розчинених в ній речовин від шлунку до інших частин організму. З метою ефективного перетравлювання органічних речовин у шлунок уводяться різноманітні ферменти, котрі створюють відповідний потік активних реагентів і каталізаторів. Таким чином, у шлунку проходять БХП, котрі пов'язані з теорією дифузії [10-11], теплопередачі, гідродинамікою [12-18]. Таке представлення біохімічної кінетики в шлунку людини дозволило отримати низку теоретично важливих результатів, розробити нові методи діагностики стану здоров'я людини та підвести науковий фундамент під теорією важливих біохімічних технологій при діагностуванні та лікуванні захворювань. Класична біохімічна кінетика [1, 3, 5] вивчає протікання БХП в ідеалізованих умовах: за сталою (як в часі, так і в просторі) температурою тіла та сталих концентраціях речовин. Найважливішими з фізичних процесів є дифузія початкових речовин, котрі уводяться в організм людини, і продуктів біохімічних реакцій, а також виділення та розповсюдження їх результату за рахунок перенесення теплових потоків та кількості маси від шлунку до інших біоструктурних елементів організму. На такі процеси сильно впливає характер руху потоків, що приводить до конвекційного перенесення кількості маси й теплової енергії. У науковій літературі процеси масо- та теплоперенесення описуються спрощеними нелінійними диференціальними рівняннями, в основу котрих покладені основні закони масоперенесення Фіка, теплоперенесення Фур'є та кількості руху Ньютона. Загальними рівняннями перенесення для потоків, викликаних виштовхуючою силою, служать звичайні рівняння гідромеханіки. Рухомим механізмом у вимушених потоках є градієнт тиску або початкова швидкість. У такому разі рівняння руху, викликаного перенесенням маси, мають вигляд [10, 11, 13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\rho \nabla v + v \cdot \nabla \rho); \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla p + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla v); \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T, \quad (3)$$

де  $\rho$  - густина (або щільність) потоку перенесення;  $t$  - час перенесення;  $v = v(x, y, z)$  - швидкість за координатами  $x, y, z$ ;  $\nabla v$  - градієнт зміни швидкості;  $\nabla \rho$  - градієнт зміни густини;  $\nabla p$  - градієнт статичного тиску;  $\mu$  - динамічна в'язкість речовини;  $c_p$  - питома теплоємність;  $\nabla T$  - градієнт зміни температури;  $k$  - коефіцієнт теплопровідності.

Аналізуючи рівняння (1) – (3), не трудно бачити, що вони описують швидкість зміни того чи іншого інформативного параметра: густини  $\rho$ , швидкості руху маси речовини  $v$  і температури БХП  $T$  в деякому замкненому об'ємі, яким є шлунок людини. Такий об'єм, в якому проходить тільки перенесення маси, тепла та кількості руху у подальшому називатимемо зоною реологічного переходу (ЗРП). Такі процеси супроводжуються відповідними перетвореннями, у результаті котрих утворюється нова маса, виділяється тепла енергія, змінюються швидкості матеріальних і теплових потоків [19, 20]. Створені в результаті фазових перетворень нові масові й теплові потоки виводяться з ЗРП (у даному разі зі шлунку) з відповідною швидкістю і накопичуються (стікають) в інших об'ємах чи середовищах людського організму. Задача полягає у математичному описанні БХП на основі теорії реологічних фазових незворотних перетворень, котрі мають місце в шлунку, з метою діагностування різного роду захворювань і розробки неінвазивних методів їх визначення.

#### **Математичні моделі БХП у шлунку біологічного організму.**

Аналіз процесів, котрі протікають в шлунку людини формально можна описати системою нелінійних диференціальних рівнянь (1) – (3), якщо рахувати, що ЗРП являє собою безмежно малий одиничний імпульс, який створює безмежно малий стік маси, теплової енергії та кількості руху з нульовою швидкістю перенесення. Так як шлунок характеризується об'ємом  $V$ , який є функцією кількості маси  $M$ , котра поступила в нього за час  $\xi$ , то його можна формалізувати деякою інтегральною імпульсною дельта-функцією Дірака, ядром котрої є рівняння перенесення маси, тепла та кількості руху [21-22]. Таку імпульсну функцію у загальному випадку можна описати наступним рівнянням:

$$\delta_i(\theta) = \frac{d}{dt} f_i(\theta), \quad (4)$$

де  $\delta_i(\theta)$  - дельта-функція Дірака  $i$ -го реологічного переходу;  $f_i(\theta)$  - деяка довільна функція.

Формально в шлунку мають місце основні три реологічні перетворення: перетворення поступаючого в шлунок потоку речовин (первинні матеріальні потоки - ПМП) за рахунок БХП у вторинні матеріальні потоки (ВМП); перетворення ПМП за рахунок БХП у теплову енергію; перетворення ВМП за рахунок електролітичного розкладання (електролізу) в концентрацію іонів (аніони та катіони). Для першого реологічного перетворення, позначивши  $f_i(\theta) = f_1(\theta_1)$ , де  $\theta_1$  - час першого реологічного перетворення, а також прийнявши, що процес перенесення кількості маси є незворотним, функція Дірака приводиться до наступної інтегральної форми:

$$\int_{\theta_{11}+0}^{\theta_{12}} f_1(\xi) \delta_1(\xi - \theta_{10}) d\xi = \begin{cases} 0 & \theta_{10} < \theta_{11}, \quad \theta_{10} \geq \theta_{12}; \\ f_1(\theta_{10} + 0) & \theta_{11} < \theta_{10} < \theta_{12}, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\xi$  - деяка змінна;  $\delta_1(\xi - \theta_{10})$  - ядро лінійного інтегрального перетворення;  $\theta_{10}$  - середнє значення часу першого реологічного переходу.

Такий фазовий реологічний перехід описується рівнянням у вигляді:

$$f_1(\xi) = \frac{\partial \rho}{\partial \theta_1} = \text{div}(D_\rho \nabla \rho) + \bar{v}_\rho(\bar{r}_\rho, \theta_1), \quad (6)$$

де  $D_\rho$  - коефіцієнт перетворення реакційної маси в шлунку за рахунок БХП;  $\bar{v}_\rho$  - середня швидкість БХП;  $\bar{r}_\rho$  - вектор напрямку зміни БХП,  $\nabla$  - лінійний оператор Лапласа.

Для другого реологічного перетворення, позначивши  $f_i(\theta) = f_2(\theta_2)$ , де  $\theta_2$  - час другого реологічного перетворення а також прийнявши, що процес перенесення кількості тепла є незворотним, функція Дірака приводиться до наступної інтегральної форми:

$$\int_{\theta_{21}+0}^{\theta_{22}} f_2(\xi) \delta_2(\xi - \theta_{20}) d\xi = \begin{cases} 0 & \theta_{20} < \theta_{21}, \quad \theta_{20} \geq \theta_{22}; \\ f_2(\theta_{20} + 0) & \theta_{21} < \theta_{20} < \theta_{22}, \end{cases} \quad (7)$$

де  $\xi$  - деяка змінна;  $\delta_2(\xi - \theta_0)$  - ядро лінійного інтегрального перетворення;  $\theta_{20}$  - середнє значення часу другого фазового переходу.

Такий фазовий реологічний перехід можна описати наступним рівнянням:

$$f_2(\xi) = \frac{\partial T}{\partial \theta_2} = \text{div}(D_T \nabla T) + \bar{v}_k(\bar{r}_k, \theta_1), \quad (8)$$

де  $D_T$  - коефіцієнт перенесення кількості тепла;  $\bar{v}_k$  - середня швидкість конвекційної складової теплового потоку;  $\bar{r}_k$  - вектор напрямку зміни температури шлунку.

Для третього реологічного перетворення, позначивши  $f_i(\theta) = f_3(\theta_3)$ , де  $\theta_3$  - час третього реологічного перетворення а також прийнявши, що процес перенесення кількості маси є незворотним, функція Дірака приводиться до наступної інтегральної форми:

$$\int_{\theta_{31}+0}^{\theta_{32}} f_3(\xi) \delta_3(\xi - \theta_{30}) d\xi = \begin{cases} 0 & \theta_{30} < \theta_{31}, \quad \theta_{30} \geq \theta_{32}; \\ f_3(\theta_{30} + 0) & \theta_{31} < \theta_{30} < \theta_{32}, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\xi$  - деяка змінна;  $\delta_3(\xi - \theta_{30})$  - ядро лінійного інтегрального перетворення;  $\theta_{30}$  - середнє значення часу першого фазового переходу.

Такий фазовий реологічний перехід описується рівнянням у вигляді:

$$f_3(\xi) = \frac{\partial Q}{\partial \theta_3} = \text{div}(D_Q \nabla Q) + \bar{v}_Q(\bar{r}_Q, \theta_3), \quad (10)$$

де  $D_Q$  - коефіцієнт перенесення йонів в електроліті;  $\bar{v}_Q$  - середня швидкість конвекційного перенесення концентрації йонів;  $\bar{r}_Q$  - вектор напрямку зміни концентрації йонів електроліту.

З метою формалізації БХП, які проходять в шлунку людського організму, приймемо, що всі три процеси проходять одночасно, тобто  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$ , а швидкість конвекційного перенесення речовин є рівномірною у всіх напрямках. Тоді, позначивши, що  $\bar{r}_\rho = \bar{r}_k = \bar{r}_Q = x$ , з (6)–(10) отримуємо систему наступних взаємопов'язаних диференціальних рівнянь для реологічних фазових переходів:

Для першого реологічного перетворення:

$$\frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_\rho \frac{\partial^2 \rho(\theta, x)}{\partial x^2} - v_\rho \frac{V_{II}}{S_{II}} \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial x}, \quad (11)$$

де  $V_{\Pi}$  - об'єм шлунку;  $S_{\Pi}$  - його внутрішня поверхня;  $v_{\rho} = k_{\rho 0} \exp(-E_{\rho} / RT_p)$  - швидкість біохімічної реакції (БХР) [1/с];  $k_{\rho 0}$  - множник, який характеризує деяку нормовану швидкість БХР;  $E_a$  - енергія активації БХР;  $R$  - універсальна газова стала;  $T_p$  - температура БХР.

Так як температура БХР є розподілена за координатою  $x$  і часом  $\theta$ , то, враховуючи сказане, рівняння (11) приймає такий вигляд:

$$\frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_{\rho} \frac{\partial^2 \rho(\theta, x)}{\partial x^2} - v_{\rho} \exp[-E_{\rho} / RT_p(\theta, x)] \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial x}, \quad (12)$$

де  $v_{\rho} = k_{\rho 0} V_{\Pi} / S_{\Pi}$  - деяка нормована лінійна швидкість конвекційного БХП.

Для другого реологічного переходу рівняння фазового незворотного перетворення приймає таку форму:

$$\frac{\partial T(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_T \frac{\partial^2 T(\theta, x)}{\partial x^2} - v_T \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial x}, \quad (13)$$

де  $v_{kT} = V_{\Pi} / S_{\Pi} \tau_k$  - деяка нормована лінійна швидкість конвекційного перенесення тепла;  $\tau_k$  - стала часу конвекційного перенесення тепла.

За аналогією попередніх фазових незворотних перетворень для третього реологічного переходу маємо:

$$\frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_Q \frac{\partial^2 Q(\theta, x)}{\partial x^2} - \frac{1}{\tau_Q} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x}, \quad (14)$$

де  $\tau_Q$  - стала часу електролітичного перетворення, яка є функцією як нових створюваних речовин в об'ємі шлунка, так і температури.

Для електролітичного процесу необхідна наявність початкових потенціалів між біореакційною масою  $U_M$  та стінкою шлунка  $U_C$ . Якщо рахувати, що потенціал стінки шлунка є сталим, тобто  $U_C = const$ , а початковий потенціал  $U_M$  маси зростає від нуля до  $U_C$ , то з достатньою точністю можна прийняти що процес зміни в часі потенціалу маси є аперіодичним і описується таким рівнянням:

$$\tau_Q \frac{dU_M}{d\theta} + U_M = U_C, \quad (15)$$

де  $\tau_Q = D_U / \Delta U_C j$  - стала часу;  $D_U$  - жорсткість стінки шлунка;  $\Delta U_C$  - максимальна різниця потенціалів;  $j$  - щільність струму, яку створюють йони при переході через стінку шлунка.

Враховуючи, що шлунок являє собою своєрідну електролітичну систему, то різницю потенціалів можна розрахувати за формулою Нернста [23]:

$$\Delta U_C = \frac{RT}{nF} f \ln Q_M / Q_C, \quad (16)$$

де  $R$  - універсальна газова стала;  $T$  - абсолютна температура;  $n$  - валентність йонів;  $F$  - стала Фарадея;  $f$  - коефіцієнт активності біомаси в шлунку.

У більшості випадків відношення  $Q_M / Q_C$  змінюється в невеликих межах, тому з достатньою точністю можна прийняти, що  $\ln Q_M / Q_C = k_Q$ .

З врахуванням сказаного (16) рівняння для сталої часу приводиться до такого вигляду:

$$\tau_Q = D_U nF / jRTfk_Q. \quad (17)$$

Підставивши (17) у рівняння (14), отримуємо:

$$\frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_Q \frac{\partial Q^2(\theta, x)}{\partial x^2} - \frac{jRTfk_Q}{D_U nF} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x}. \quad (18)$$

З [23] відомо, що електрохімічний еквівалент  $k_{ex} = M / nF = m / q$ , де  $M$  - молярна маса (кг/кмоль);  $n$  - валентність;  $q$  - перенесений заряд;  $m$  - маса виділених речовин. Визначивши множник  $nF = qM / m$ , а також приймаючи до уваги, що  $q = C \Delta U_C = CE \bar{r}_\Pi$  - де  $C$  - електрична ємність тіла;  $E$  - напруженість електричного поля людини;  $\bar{r}_\Pi$  - приведений до кулі радіус шлунка. З врахуванням цього рівняння (18) приймає нас тупну форму:

$$\frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} = -D_Q \frac{\partial Q^2(\theta, x)}{\partial x^2} - fk_Q \frac{j m R T}{D_U C E \bar{r}_\Pi} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x}. \quad (19)$$

Як показано в [20-22], в зоні фазових незворотних перетворень створюються нові речовини, енергія (наприклад, теплова), змінюється кількість руху, котрі являють собою відповідний стік, який виводиться з цієї зони з певною швидкістю  $v_c$ . Таким чином, якщо шлунок є склад-



ною зоною реологічних фазових незворотних перетворень, то структурно його можна показати, як показано на рис. 1.

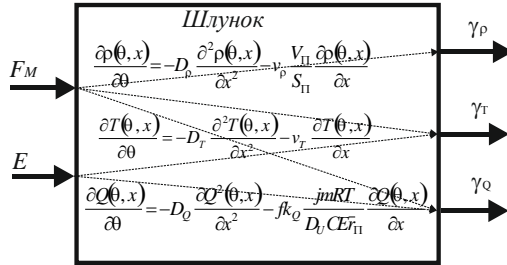


Рис. 1 – Структурна схема реологічних фазових незворотних перетворень в шлунку людини

На вхід шлунку поступає матеріальний потік масовою витратою  $F_M$ , який характеризується густиною  $\rho$  і температурою  $T$ , створюючи в ньому три основні вихідні потоки: матеріальний потік, котрий виводиться з шлунку з швидкістю стоку  $\gamma_\rho$ , тепловий потік, котрий виводиться з швидкістю стоку  $\gamma_T$  і потік іонів, котрий стікає зі швидкістю  $\gamma_Q$ . Напруженість електричного поля  $E$  шлунка тісно пов'язана з кількістю електричних зарядів  $q$  на його поверхні, котрі приймають участь в дисоціації кислото-лужних елементів. Окрім того, напруженість  $E$  разом з електричними зарядами створюють вектор зусилля  $\vec{N} = \vec{E}q$ , котре, по-перше, діє на заряд  $q$ , а відповідним чином, на стінки шлунка, заставляючи його стискуватися чи розширюватися при БХП. Так як шлунок являє собою біохімічний реактор з гнучкою жорсткою стінкою, то стік матеріального потоку зі швидкістю  $\gamma_\rho$  визначається як реакційним процесом, так і механічним переміщенням стінок шлунку, яку обумовлене силою  $\vec{N}$ . Так як рухомою силою вихідного матеріального потоку є зусилля  $\vec{N}$ , то стік цього потоку можна описати таким диференціальним рівнянням:

$$\tau_{2\rho}^2 \frac{d^2 \bar{\rho}_c(t)}{dt^2} + \tau_{1\rho} \frac{d\bar{\rho}_c(t)}{dt} + \bar{\rho}_c(t) = k_1 N(t), \quad (20)$$

де  $\tau_{1\rho} = k_D / D_U$ ,  $\tau_{2\rho} = \sqrt{M / D_U}$  - сталі часу стоку;  $M$  - реакційна маса шлунка;  $\bar{\rho}_c(t)$  - зміна густини переробленого продукту в шлунку за напрямком руху стінок шлунку за час  $t$ ;  $k_D$  - коефіцієнт демпфірування;  $D_U$  - жорсткість стінки шлунку;  $k_1$  - коефіцієнт перетворення.

Якщо прийняти, що зусилля  $N(t) = const$ , то рівняння для швидкості стоку вихідного матеріального потоку матиме вигляд:

$$\gamma_\rho = \tau_{2\rho}^2 \frac{d^3 \rho_c(t)}{dt^3} + \tau_{1\rho} \frac{d^2 \rho_c(t)}{dt^2} + \frac{d\rho_c(t)}{dt}. \quad (21)$$

Термодинамічний режим шлунку залежить від багатьох факторів і стабілізується за рахунок відведення тепла кровоносною системою. Усталене значення температури шлунка для нормального стану людини дорівнює  $36,6^\circ\text{C}$ . Прийmemo, що відведення теплової енергії від біореакційної маси до стінки шлунка здійснюється конвекційним потоком, а далі через стінку до потоку крові, який протікає по його судинах. Таким чином, процес стоку тепла є двостадійними, а швидкість зміни температури стоку  $T_c$  можна описати наступним диференціальним рівнянням:

$$\gamma_T = \tau_{2Tc}^2 \frac{d^3 T_c(t)}{dt^3} + \tau_{1Tc} \frac{d^2 T_c(t)}{dt^2} + \frac{dT_c(t)}{dt}, \quad (22)$$

$$\text{де } \tau_{1Tc} = k_\tau \frac{m_p c_p}{\alpha_p S_T} \left[ \frac{m_c c_c}{m_p c_p} + \frac{\alpha_p S_T}{F_k c'_p + \alpha_p S_T} \right], \quad \tau_{2Tc} = \sqrt{k_\tau \frac{m_p c_p}{m_p c_p} \frac{m_c c_c}{(F_k c'_p + \alpha_p S_T)}}$$

- сталі часу;  $m_c, m_p$  - маса стінки шлунка та переробленого продукту в ньому відповідно;  $c_c, c_p$  - питома теплоємність стінки шлунка та продукту відповідно;  $\alpha_p$  - коефіцієнт тепловіддачі продукту до стінки шлунка;  $S_T$  - поверхня тепловіддачі;  $F_k$  - масова витрати крові, яка проходить через стінки шлунка;  $c'_p$  - питома теплоємність крові.

Частина йонів, яка створюється в шлунку за рахунок електролізу, використовується для проведення вторинних БЗР, а частина – переходить через стінку і поглинається потоком крові. Для спрощення прийmemo, що стік йонів є одностадійним, а швидкість їх стоку описується наступним рівнянням:

$$\gamma_Q = \tau_{Qc} \frac{d^2 Q_c(t)}{dt^2} + \frac{dQ_c(t)}{dt}, \quad (23)$$

де  $\tau_{Qc} = 1/k_{E0} \exp(-E_E / RT_p)$  - стала часу стоку;  $k_{E0}$  - стехіометрична швидкість стоку йонів;  $E_E$  - енергія активації реакції стоку йонів;  $R$  - універсальна стала;  $T_p$  - температура реакції йонів.

Рівняння (12), (13) і (18) з врахуванням стоку створених нових потоків приведемо до такої форми:

$$\tau_\rho \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial \theta} = -\frac{D_\rho}{v_\rho} \frac{\partial^2 \rho(\theta, x)}{\partial x^2} - L_{\Pi} \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial x} + \gamma_\rho, \quad (24)$$

де  $\tau_\rho = \tau_{\rho 0} \exp(E_p / RT_p)$  - стала часу біохімічного незворотного перетворення;  $L_{\Pi} = V_{\Pi} / S_{\Pi} = \text{const}$  - характерний лінійний розмір шлунку;  $\tau_{\rho 0} = 1 / k_{\rho 0}$  - стехіометрична стала часу БХП;

$$\tau_T \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial \theta} = -\frac{D_T L_{\Pi}}{v_T} \frac{\partial^2 T(\theta, x)}{\partial x^2} - L_{\Pi} \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial x} + \gamma_T, \quad (25)$$

де  $\tau_T = L_{\Pi} / v_T$  - стала часу конвекційного перенесення тепла;

$$\tau_Q \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} = -\frac{D_Q L_{\Pi} \cdot D_U C E \bar{r}_{\Pi}}{f k_Q j m R T} \frac{\partial Q^2(\theta, x)}{\partial x^2} - L_{\Pi} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x} + \gamma_Q, \quad (26)$$

де  $\tau_Q = \frac{L_{\Pi} D_U C E \bar{r}_{\Pi}}{f k_Q j m R T}$  - стала часу.

Підставивши в (24)-(26) рівняння (21)-(23), отримуємо наступну систему взаємопов'язаних нелінійних диференціальних рівнянь незворотних реологічних перетворень:

$$\begin{aligned} \tau_\rho \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial \theta} + \frac{D_\rho}{v_\rho} \frac{\partial^2 \rho(\theta, x)}{\partial x^2} + L_{\Pi} \frac{\partial \rho(\theta, x)}{\partial x} = \\ = \tau_{2,\rho c}^2 \frac{d^3 \bar{\rho}_c(t)}{dt^3} + \tau_{1,\rho c} \frac{d^2 \bar{\rho}_c(t)}{dt^2} + \frac{d\bar{\rho}_c(t)}{dt}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tau_T \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial \theta} + \frac{D_T L_{\Pi}}{v_T} \frac{\partial^2 T(\theta, x)}{\partial x^2} + L_{\Pi} \frac{\partial T(\theta, x)}{\partial x} = \\ = \tau_{2Tc}^2 \frac{d^3 T_c(t)}{dt^3} + \tau_{1Tc} \frac{d^2 T_c(t)}{dt^2} + \frac{dT_c(t)}{dt}; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \tau_Q \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial \theta} + \frac{D_Q L_{\Pi} \cdot D_U C E \bar{r}_{\Pi}}{fk_Q jmRT} \frac{\partial Q^2(\theta, x)}{\partial x^2} + L_{\Pi} \frac{\partial Q(\theta, x)}{\partial x} = \\ = \tau_{Qc} \frac{d^2 Q_c(t)}{dt^2} + \frac{dQ_c(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (29)$$

Як видно з рівнянь (27)-(29), реологічні перетворення (ліва частина рівнянь) містять сталі часу  $\tau_{\rho}$ ,  $\tau_T$  і  $\tau_Q$ . Останні характеризують швидкість зміни відповідно густини, температури та концентрації йонів при біохімічному перетворюванні речовин у шлунок. Так як між лівою та правою частинами диференціальних рівнянь існує рівність, то для здорового стану людини повинно зберігатися сталим співвідношення між сталими часу, котрі визначають швидкість реологічного перетворення та стоку, тобто відношення:  $\tau_{\rho} / \tau_{\rho c} = k_{\rho 0} = const$ ,  $\tau_T / \tau_{Tc} = k_{T0} = const$  і  $\tau_Q / \tau_{Qc} = k_{Q0} = const$ , де  $k_{\rho 0}, k_{T0}, k_{Q0}$  - номінальні коефіцієнти співвідношення густини, температури та концентрації йонів відповідно. Відхилення цих коефіцієнтів від їх номінальних значень свідчить про стан здоров'я людини, тобто про наявність того чи іншого захворювання.

**Висновок.** Показано, що шлунок людини являє собою зону реологічного переходу, в котрій відбуваються незворотні фазові перетворення вхідного матеріального потоку у вигляді суспензії відповідної густини в основні три види вихідних потоків, до яких відноситься матеріальний потік біохімічного процесу, потік електролітичного процесу і потік теплової енергії. Ці потоки є взаємопов'язаними та описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Кожний реологічний перехід характеризується швидкістю фазового перетворення, розподіленням основних визначальних параметрів (густина  $\rho(\theta, x)$  маси біохімічного процесу, його температура  $T(\theta, x)$  і концентрація йонів  $Q(\theta, x)$  електролітичного процесу) та швидкістю стоку продуктів перетворення. Вказується, що для нормального стану здоров'я людини повинна зберігатися рівність між швидкістю фазового реологічного перетворення та швидкістю стоку, котрі визначаються відповідними сталими

часу. У здоровому людському організмі зберігається відповідний баланс матеріальних, теплових та енергетичних потоків для котрих співвідношення сталих часу є сталими величинами. Відхилення цих коефіцієнтів від їх нормованого значенняоднозначно свідчить про процес захворювання людини. Так як сталі часу реологічного перетворення є функціями біохімічних параметрів, котрі можна визначати як лабораторними методами, так і технічними засобами, то вони можуть бути покладені в основу побудови нових неінвазивних методів діагностики стану здоров'я людини. Якщо  $k_p > k_{p0}$ , то це свідчить про збільшення ваги людини, яке може проявлятися за рахунок порушення обміну речовин, що призводить до так званого «ожиріння». При  $k_p < k_{p0}$  настає процес зменшення ваги, котре може бути як за рахунок зменшення кількості поступаючої в шлунок поживної речовини, так і її калорійності або захворювання. Відхилення коефіцієнта співвідношення концентрацій йонів від його нормованого значення може призводити до появи захворювання підшлункової залози, печінки, почек та інших важливих внутрішніх органів, робота котрих пов'язана з виробництвом різноманітних гормональних речовин. Дослідження показують, що на роботу електролітичної комірки великий вплив чинить напруженість електричного поля шлунка, котра тісно пов'язана з напруженістю електричного поля тіла людини (аури електромагнітного поля). Тому вимірювальний контроль напруженості цього поля може стати одним з першочерговим процесом при діагностиці стану здоров'я людини. Окрім того, доцільно при діагностуванні стану здоров'я контролювати електричну ємність людського організму, а також швидкість руху електричних зарядів при вимірювальному контролі ємкості. Подальша робота полягає в розробці методів розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь масо- тепло- та енергоперенесення з метою визначення оптимальних параметрів при діагностуванні стану здоров'я людини та розробці методики для його виконання.

**Список літератури:** 1. *Герд Г.* Гастроэнтерология /Г. Герд. – Тюмень:Сибирский изд. дом, 1997. – 202 с.2. *Афанасьев Ю. И.* Гистология, цитология и эмбриология: Учебник /Ю. И. Афанасьев, С. Л. Кузнецова, Н.А. Юрина. – М.: Медицина, 2004. – 724 с. 3. *Адо А. Д.* Патологическая физиология: Учебник /А. Д. Адо, М.А. Адо, В.И. Пыцкий – М.: Тринад-Х, 2000. – 686 с.4. *Судаков К. В.* Физиология. Основы и функциональные системы/К.В. Судакова. – М.: Медицина, 1995.– 784 с.5. *Рысс Е. С.* Заболевания органов пищеварения / Е. С. Рысс, Ц. Г. Малевич, Ю. И. Фишзон-Рысс. – СПб : Мининформагентство, 1995. – 399 с. 6. *Кривцов А. Г.* Оценка достоверности и эффективности современных методов неинвазивной диагностики / А. Г. Кривцов, Н. К. Ходарева, А. Е. Кудавев. – Ростов на Дону: Артемида, 2010. – 130 с.7. *Сотников В. Н.* Значение эндоскопической рН-метрии в определении кислотопродуцируемой функции желудка. Пособие для врачей / В. Н. Сотников, Т. К. Дубинская, А. В. Волова [и др.]. – М.: Российская медицинская академия

последипломного образования, 2005. – 35 с. **8. Григорьев П.Я.** Диагностика и лечение хронических болезней органов пищеварения / П. Я. Григорьев, П. Э. Яковенко. – М.: Медицина, 1990. – 384 с. **9. Франк-Каменецкий Д.А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с. **10. Рамм В.М.** Абсорбционные процессы в химической промышленности / В. М. Рамм. – М.: Госхимиздат, 1951. – 386 с. **11. Берд Р.** Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. – М.: Химия, 1974. – 688 с. **12. Баррер Р.** Диффузия в твердых телах / Р. Баррер. – М.: Издательство, 1948. – 504 с. **13. Таганов И.Н.** Моделирование процессов массо- и энергопереноса / И. Н. Таганов. – Л.: Химия, 1979. – 203 с. **14. Темпел Б.** Хемосорбция / Б. Темпел. – М.: Наука, 1958. – 382 с. **15. Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М.: Mashgiz, 1962. – 368 с. **16. Лыков А.В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с. **17. Лыков А. В.** Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 389 с. **18. Эккерт Э.Р.** Теория тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт., Р. М. Дрейк. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 562 с. **19. Гораздовский Т.Я.** Домены реологических полей / Т. Я. Гораздовский. // ДАН СССР. – 1986. – Т. 287, №5. – С.1118-1122. **20. Стенцель Й.И.** Фотоколориметричні газоаналізатори. Монографія / Й. І. Стенцель. – К.: ІСДО, 1995. – 126 с. **21. Стенцель Й. І.** Принцип реологічних переходів при діагностуванні роботи серцевої системи електрокардіографічним методом / Й. І. Стенцель., А. В. Рябиченко, Л. І. Петросян [та ін.] // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – 2013. – № 34(1007). – С. 24-31. **22. Стенцель Й. І.** Вимірювання в хімічній технології. Підручник / Й. І. Стенцель, О. Б. Целіцев, М. Г. Лорія. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – 480 с. **23. Кухлинг Х.** Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gerd, G. *Gastrojenterologija*. – Tjumen': Sibirskij izd. dom, 1997. 2. Afanas'ev, Ju. I., S. L. Kuznecova and N. A. Jurina. *Gistologija, citologija i jembiriologija: Uchebnik*. Moscow.: Medicina, 2004. 3. Ado, A. D., M. A. Ado and V. I. Pyckij. *Patologicheskaja fiziologija: Uchebnik*. Moscow: Triada-H, 2000. 4. Sudakov, K. V. *Fiziologija. Osnovy i funkcional'nye sistemy*. Moscow: Medicina, 1995. 5. Ryss, E. S., C. G. Malevich and Ju. I. Fishzon-Ryss. *Zabolevanija organov pishhevarenija*. SaintPetersburg: Mininformagenstvo, 1995. 6. Krivcov, A. G., N. K. Hodareva and A. E. Kudaev. *Ocenka dostovernosti i jeffektivnosti sovremennyh metodov neinvazivnoj diagnostiki*. Rostov-on-Don: Artemida, 2010. 7. Sotnikov, V. N. etal. *Znachenie jendoskopicheskoy rN-metrii v oppredelenii kislotoproduciruemoj funkcii zheludka. Posobie dlja vrachej*. Moscow: Rossijskaja medicinskaja akademija poslediplomnogo obrazovanija, 2005. 8. Grigor'ev, P. Ja., P. Je. Jakovenko. *Diagnostika i lechenie hronicheskikh boleznej organov pishhevarenija*. Moscow: Medicina, 1990. 9. Frank-Kameneckij, D. A. *Diffuzija i teploperedacha v himicheskoj kinetike*. – Moscow: Nauka, 1987. 10. Ramm, V. M. *Absorbcionye processy v himicheskoj promyshlennosti*. Moscow: Goshimizdat, 1951. 11. Berd, R., V. St'juart and E. Lajtfut. *Javlenija perenosa*. Moscow: Himija, 1974. 12. Barrer, R. *Diffuzija v tverdyh telah*. Moscow: Izdatinlit., 1948. 13. Taganov, I. N. *Modelirovanie processov masso- i jenergoperenosa*. Leningrad: Himija, 1979. 14. Tempel, B. *Hemosorbcija*. Moscow: Nauka, 1958. 15. Kutateladze, S. S. *Osnovy teorii teploobmena*. Moscow: Mashgiz, 1962. 16. Lykov, A. V. *Teorija teploprovodnosti*. Moscow: Vyssh. shk., 1967. 17. Lykov, A. V., Ju. A. Mihajlov. *Teorija teplo- i massoperenosa*. Moscow: Gosjenergoizdat, 1963.-389 18. Jekkert, Je. R., R. M. Drejk. *Teorija teplo- i massoobmena*. Moscow: Gosjenergoizdat, 1962. 19. Gorazdovskij, T. Ja. "Domeny reologicheskikh polej." *DAN SSSR*. No 287. 5. 1986. 1118-1122. 20. Stentsel', Y. I. *Fotokolorymetrychni hazoanalizatory. Monografija*. Kiev: ISDO, 1995.-126 21. Stentsel', Y. I., etal. "Pryntsyp reolohichnykh perekhodiv pry diahnostuvanni roboty sertsevoyi systemy elektrokardiohrafichnym metodom." *Visnyk NTU «KhPI»*. *Zbirnyk naukovykh prats'*. Seriya: *Elektroenerhetyka ta peretvoryval'na tekhnika*. No. 34 (1007). 2013. 24-31. 22. Stentsel', Y. I.,

УДК 620.179.16

**Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ**, д-р техн. наук, зав. отд.,

ІПМ НАН України, Київ;

**Е. А. КОЗИРАЦКИЙ**, соискатель, м.н.с., ІПМ НАН України,

Київ;

**Н. П. БРОДНИКОВСКИЙ**, канд. физ.-мат. наук, зав. отд.,

ІПМ НАН України, Київ;

**О. В. ТАЛЬКО**, м.н.с., ІПМ НАН України, Київ

## **АКУСТИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИОБИЯ**

Для отработки технологии создания нового многокомпонентного жаропрочного сплава на основе ниобия по результатам акустического неразрушающего контроля проведено моделирование материала в соответствие трем задачам исследования: определение характеристик упругости, пористости и ликваций. По результатам моделирования проведена адаптация акустических методов контроля и оптимизация их параметров для эффективного решения каждой задачи. Адаптированные методы использованы для экспериментального определения указанных характеристик материала.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, акустические методы, сплав на основе ниобия, ликвации, поры, характеристики упругости.

**Введение.** При изготовлении опытной партии изделий из нового многокомпонентного жаропрочного сплава на основе ниобия как наиболее экономичный был выбран метод аргонодуговой плавки для получения материала. Необходимые размеры слитков достигались путем сплавления заготовок при неполном их расплавлении. В местах сплавления заготовок в слиток могут быть поры и непролавы. Кроме того, для многокомпонентных сплавов характерна ликвация по химическому составу. Возможность появления нестандартных дефектов требует использования нетрадиционных методов контроля их наличия.

**Цель исследования.** Контроль технологии получения материала с помощью неразрушающих акустических методов исследования

свойств и неоднородности структуры слитка для определения дальнейшей его пригодности при изготовлении изделий.

**Постановка проблемы.** Необходимо учитывать, что получение интегральных характеристик (в нашем случае упругости) неоднородного материала акустическими методами предполагает использование упругих волн длиной на порядок больших, чем неоднородности структуры, обнаружение отдельных дефектов – длин волн одного порядка с размерами возможных дефектов или менее, тогда как для обнаружения ликваций необходима оценка объёмной неоднородности изделия. Для эффективного выполнения каждой из этих задач необходима соответствующая адаптация к ней используемых методов контроля и оптимизация их параметров.

**Объект исследования.** В ИПМ НАН Украины разработан многокомпонентный жаростойкий сплав на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al. Для получения большого слитка использовался метод сплавления отдельных заготовок аргонодуговой плавкой. Исследование микроструктуры одного из первых неудачных образцов свидетельствует о наличии непроплава, образования пор литья и ликваций (рис. 1).

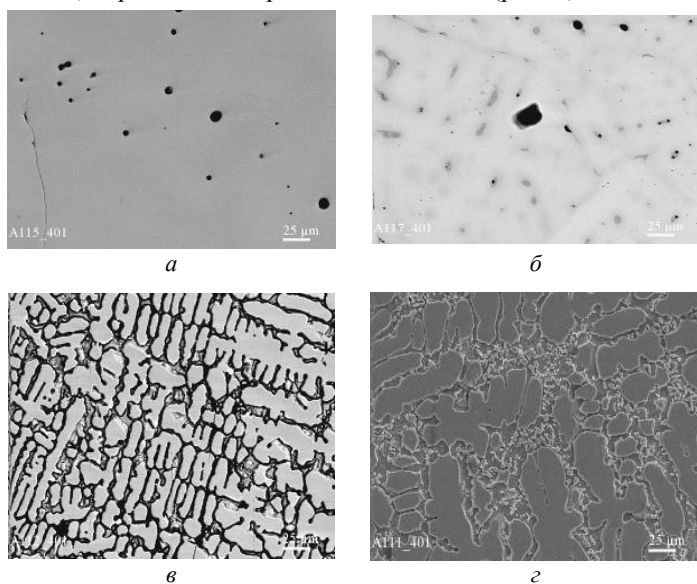


Рис. 1 – Микроструктура сплава на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al:  
*а, б* – нетравленая поверхность;  
*в, г* – травленные шлифы



Технология изготовления сплава была усовершенствована. Из нового слитка был вырезан образец для проведения исследований, который имел форму параллелепипеда (рис. 2). Результаты исследования свойств и дефектности этого образца с помощью ультразвука представлены ниже.

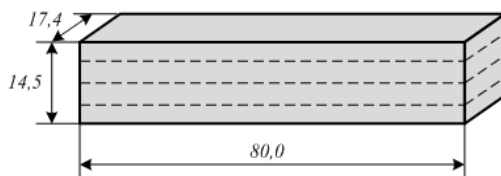


Рис. 2 – Исследуемый образец

В табл. 1 приведены характеристики компонентов материала. Учитывая процентное содержание каждого элемента, получили расчетные свойства смеси.

Таблица 1 – Характеристики компонентов сплава на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al

Элемент	Процентное содержание		Плотность, гр/см <sup>3</sup>	СР УВ, м/с		Модули упругости, ГПа	
	Массовая доля	Объемная доля		$C_l$	$C_t$	$E$	$G$
Ниобий	48,94	36,57	8,55	4 920	2 100	110	37
Хром	12,17	10,56	7,19	6 850	3 980	294	115
Титан	11,21	15,98	4,54	4 900	2 830	112	41
Цирконий	21,36	20,83	6,51	4 900	2 357	97	36
Алюминий	6,32	16,06	2,70	6 260	3 080	70	26
Смесь			6,45	5 333	2 627	121	44

**Моделирование эксперимента.** Решение поставленной задачи производилось в несколько этапов. Для каждого этапа следует выделить характерные свойства образца, которые могут влиять на результаты измерений. Эти свойства заложены в моделях, показанных на рис. 3.

**Модель 1 – Однородный изотропный материал.** Для определения характеристик упругости нужно проверить является ли образец

изотропным и однородным (рис. 3, *a*). При этом необходимо выбрать такую частоту прозвучивания, чтобы длина волны была на порядок больше чем предполагаемые размеры дефектов.

**Модель 2 – Материал с дефектами.** Для обнаружения дефектов необходимо использовать упругие волны длиной одного порядка с размерами возможных дефектов или менее (рис. 3, *б*). Форму и размеры дефектов можно оценить по снимкам поперечного сечения (рис. 1).

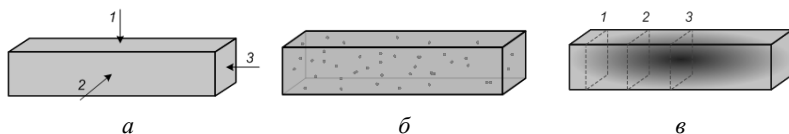


Рис. 3 – Модели материала: *a* – однородный изотропный; *б* – с дефектами; *в* – с ликвациями

**Модель 3 – Материал с ликвациями.** На рис. 3, *в* показана неоднородность по химическому составу. Пунктиром выделены три разные области, для которых сделаны снимки микроструктуры (рис. 1, *б*, *в*, *г*). Рис. 1, *б* получен при съемке нетравленной поверхности. Рельеф на поверхности образца, который виден на нем, образовался при приготовлении шлифа и свидетельствует о неоднородности истирания в результате ликваций. Рис. 1, *в*, *г* получены на травленых шлифах. При одинаковом увеличении на них видно различие в размере дендритов и около дендритных зон, в которых имеет место ликвация.

**Методика измерений.** Прозвучивание образца проводили во всех направлениях (рис. 4), с возбуждением продольных, поперечных и стержневых упругих волн. Для этого применяли импульсный и резонансный метод.

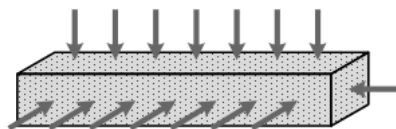


Рис. 4– Направления прозвучивания образца

При использовании радиопульса частотой 5 МГц в разных точках в одном направлении получили одинаковые значения скорости

распространения упругих волн (СР УВ). А при изменении направления прозвучивания значение изменилось незначительно (в пределах погрешности).

В импульсном методе СР УВ определяли по времени сквозного прохождения упругого импульса через исследуемый образец. Измерение времени прохождения проводили на частоте 5 МГц методом радиоимпульса с дискретной задержкой [1].

СР УВ (продольной или поперечной) определяли по формуле:

$$c = \frac{h}{t_{изм} - t_o}, \quad (1)$$

где  $t_{изм}$  – измеряемое время;  $t_o$  – систематическая погрешность измерений.

В резонансном методе возбуждали в образце вынужденные ультразвуковые колебания и определяли первую резонансную частоту. По резонансной частоте  $f$ , рассчитывали СР УВ в стержне [2], по формуле:

$$c_{cm} = \frac{f}{2l}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина стержня.

**Оценка характеристик упругости.** По результатам измерения СР УВ в разных точках имеем квазиизотропный и квазигомогенный материал. Таким образом, в рамках модели 1 (рис. 3, а) можно характеризовать материал двумя характеристиками упругости, например, модулем Юнга и модулем сдвига. Три наиболее широко используемые характеристики упругости определяют по известным [3] формулам:

$$E = \frac{c_t^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}; \quad G = c_t^2 \rho; \quad \nu = \frac{1 - 2(c_t / c_l)^2}{2(1 - (c_t / c_l)^2)}, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $G$  – модуль сдвига;  $c_l$ ,  $c_t$  – СР продольной и поперечной УВ, соответственно;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность.

В соответствие резонансному методу в заданном направлении связь модуля упругости материала со СР УВ определяется известной [4] формулой:

$$E = c_{cm}^2 \rho, \quad (4)$$

$c_{cm}$  – СР УВ в стержне.

Сопоставляя эти два метода, следует отметить, что в изотропном теле резонансный метод позволяет определять только модуль Юнга по результатам измерения одной СР УВ, тогда как импульсный метод по измерению одной СР УВ позволяет определить только модуль сдвига, а для определения модуля Юнга необходимо измерение двух СР УВ.

При этом мы получаем полный набор характеристик упругости для изотропного тела.

Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты измерений упругих волн и характеристик упругости в образце сплава на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al

Скорость продольных волн, м/с	$5\,480 \pm 27$
Скорость поперечных волн, м/с	$2\,630 \pm 13$
Скорость в стержне, м/с	$4\,220 \pm 21$
Коэффициент Пуассона	0,35
Модуль Юнга (импульсный метод), ГПа	$122 \pm 1$
Модуль Юнга (резонансный метод), ГПа	$116 \pm 1$
Модуль Сдвига, ГПа	$45 \pm 0,5$

Погрешность определения СР УВ в исследуемых образцах для обоих методов не превышала 0,5 %, а модулей упругости – 1 %. Значения модулей упругости полученные импульсным методом практически не отличаются от расчетных (табл. 1). Модуль Юнга, полученный резонансным методом, имеет заниженное значение. Это можно объяснить тем, что форма образца отличается от классической стержневой.

**Дефектоскопия.** В рамках модели 2 (рис. 3, б) предполагается наличие дефектов разных размеров. Для их обнаружения перешли на максимально доступную частоту 10 МГц.

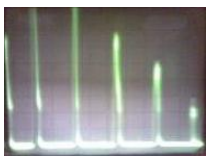
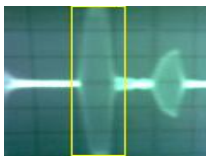
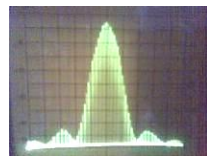
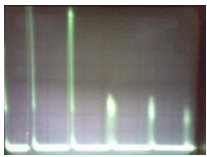
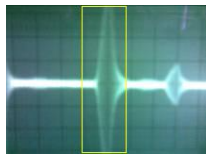
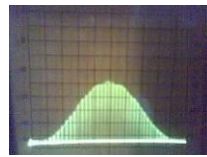
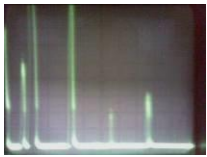
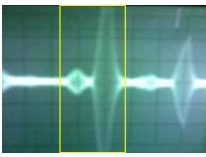
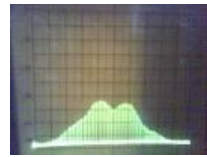
Прозвучивание образца проводили двумя методами: с помощью стандартного дефектоскопа и с использованием радиоимпульсного возбуждения по схеме, описанной в работе [5]. С помощью анализатора спектра получили характерные спектрограммы. В табл. 3 показаны выборочные сигналы для трех случаев:

1. При отсутствии дефектов происходит равномерное затухание донного сигнала. Спектр первого принятого сигнала (радиоимпульс в рамке) имеет правильную форму.

2. При скоплении мелких дефектов увеличивается затухание сигнала и изменяется форма спектра.

3. В случае, когда попадаются дефекты более 0,2 мм, удается обнаружить сигнал, отраженный от дефекта. А на спектре появляется дополнительная составляющая.

Таблица 3 – Дефектоскопия образца сплава на основе системы Nb-Cr-Ti-Zr-Al

	Сигнал с выходадефектоскопа	Радиоимпульс 10 МГц	Спектр
1. Нет дефектов			
2. Дефекты меньше 0,2 мм			
3. Дефекты больше 0,2 мм			

**Ликвации.** В соответствии с третьей моделью (рис. 3, в) в образце могут образоваться неоднородности по химическому составу. Обнаружить их с помощью дефектоскопа невозможно, так как они не имеют четких границ. Измерения СР УВ в разных областях также не дали результата: во всех случаях при разных частотах получили одинаковые значения. Это можно объяснить тем, что все компоненты материала имеют близкие акустические свойства (табл. 1).

#### **Выводы.**

1. Разработаны и экспериментально проверены три акустические модели нового многокомпонентного жаропрочного сплава на основе ниобия, отражающие его свойства, актуальные для отработки технологии создания материала (характеристик упругости, пористости и ликваций), и позволяющие адаптировать неразрушающие акустические методы контроля для эффективного исследования этих свойств.

2. Показано, что материал исследуемой плавки в макроскопическом рассмотрении можно считать квазиизотропным и квазиоднородным, поэтому состояние его упругости полностью описывается двумя характеристиками упругости, например модулями Юнга и сдвига, полученными по результатам измерений двух скоростей распространения упругих волн: продольной и поперечной или волны в стержне. Эти скорости могут быть измерены импульсным или импульсным и резонансным методами на частотах не более 5 МГц.

3. На частотах 10 МГц при эхо-импульсном прозвучивании исследуемого образца во всех направлениях с использованием ударного или радиоимпульсного возбуждения были обнаружены скопления неоднородностей размером менее 0,2 мм и одиночные дефекты размером 0,2..0,5 мм, которые давали характерные осциллограммы и спектрограммы.

4. Ликвации в исследуемом образце не выявлены, что можно объяснить близкими значениями акустических свойств материала или маскировкой ликваций пористостью. Поэтому дальнейшее развитие исследований может быть связано с усовершенствованием измерительной модели эксперимента для обеспечения более эффективного выявления ликваций.

**Список литературы:** 1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 302 с. 2. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав.ред. И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с. 3. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория упругости. – М., 1965. 4. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник – К.: Наукова думка, 1982. – 285 с. 5. Безимьяний Ю. Г., Єпіфанцева Т. О., Козирацький Є. О. Дослідження впливу структури композита на основі мідного порошку із вольфрамовими вкрапленнями на швидкість поширення пружної хвилі. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб.наук.праць. Тематичний випуск "Електроенергетика і преобразовательная техника". – Харків: НТУ "ХПІ" – № 12. – 2010. С. 148-155.

**Bibliography (transliterated):** 1. Trujell R., Jel'baum Ch., Chik B. *Ul'trazvukovyemetodyfiziketverdogotela*. Moscow.: Mir, 1972. 2. *Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija*. Ed. Goljamina. I. P. Moscow.: Sovetskaja jenciklopedija, 1979. 3. Landau L. D., Livshic E. M. *Teorijauprugosti*. Moscow., 1965. 4. Francevich I. N., Voronov F. F., Bakuta S. A. *Uprugie postojannye i moduli uprugosti metallov i nemetallov. Spravochnik*. Kiev.: Naukova dumka, 1982. 5. Bezimyanniy Y. G., Yepifanceva T. O., Kozyracz'kyj E. O. *Doslidzhennyavply' vustrukturny` kompozy`tanaosnovimidnogoporoshkuizvol` framovy`my` vkraplennyamy` nashvy`dkist` poshy`rennyapruzhnoyixvy`li*. // Kharkiv: NTU "KhPI" – 2010. 148-155. Print.

*Поступила (received) 02.06.2015*

*Л. В. ГОЛОВКИНА*, канд. техн. наук, доц. ХНУРЭ, Харьков;  
*А. С. БОРИСЕНКО*, асп. ХНУРЭ, Харьков

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КАНАЛА СВЯЗИ И ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ЖИВУЧЕСТИ

Предложено определение обобщенного критерия живучести в беспроводной сенсорной ZigBee сети с ячеистой топологией при разрушающих действиях и учетом состояния реального канала связи, условной надежности узлов. Задача определения живучести сети сведена к задаче связности графа. Изменения структуры сети в результате разрушающих действий учтены в виде изменения графовой модели. Сделаны выводы о методах маршрутизации, которые используются в оценке состояния канала связи в сети. **Ключевые слова:** обобщенный критерий живучести, вероятность состояния канала связи, условная надежность узлов, граф, разрушающие действия.

**Введение.** ZigBee сети в условиях разрушающих действий различного характера не могут в полной мере сохранять свою работоспособность. Свойство устойчивости к этим разрушениям характеризуется живучестью как способностью системы сохранять в приемлемых пределах качество и объемы предоставляемого сервиса при выходе из строя ее компонентов или при наличии других разрушающих воздействий. Анализ структурной живучести сводится к задаче связности топологических структур в зависимости от введения понятия «разрушение» [1]. Разрушения приводят к поражению части вершин и ребер графа, и он распадется на неизвестное число компонентов. Задача определения живучести сети является задачей связности графа.

Если сеть представлена в виде модели связным графом, имеет множество путей между двумя произвольными вершинами, то качество каждого канала связи в этом пути и собственно маршрутизация с наличием запасных обходных путей обеспечит повышение живучести. Комплексная оценка состояния канала связи для определения обобщенного критерия живучести становится крайне необходимой.

**Анализ основных достижений и литературы.** Были получены решения лишь для ограниченного числа графов [2], в некоторых случаях граф сети заменялся бесконечным, асимптотические свойства которого оказывались близкими к точному решению [3]. Для некоторых случаев использовался метод Монте-Карло [4]. Если граф имеет форму решетки, в которой каждая вершина соединена с ближайшими соседними [5], то можно получить приемлемые значения критерия живучести.

Значительный вклад в разработку математических основ анализа живучести систем различного назначения внесли работы И. Ю. Стекольников, А. Г. Додонова, Д. В. Ландэ, В. Ф. Крапивина, И. А. Рябинина, Ю. М. Парфенова, Б. С. Флейшмана, Ю. Ю. Громова, О. П. Васильева, К. Е. Юрченко, В. А. Мясникова, Ю. Е. Мельникова, М. Г. Кузнецова, В. М. Вишневого и других.

Проблемами совершенствования методов и алгоритмов маршрутизации в вычислительных сетях занимались такие ученые, как Д. Бертсекас, Д. Гарсиа-Диас, П. Гупта, А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн, Д. Кантор, О.Я. Кравец, Д.В. Куракин, И.П. Норенков, А. Филипс, С. Флloyd и другие. Анализ методов адаптивной маршрутизации [6] позволяет заключить, что современные методы и алгоритмы построения маршрута для mesh сетей даже с простой топологией не оптимальны, и никак не учитывают состояния реального канала связи и качества самих модулей (узлов), поэтому такая задача остается открытой.

**Цель и задачи исследования.** Целью данной работы является определение обобщенного критерия живучести ZigBee сети с ячеистой топологией при разрушающих действиях и учетом состояния реального канала связи, условной надежности узлов.

Задача анализа связности графа для ZigBee сети с ячеистой топологией должна учитывать: изменения структуры сети, вероятность состояния канала связи, условную надежность узлов.

Вероятность того, что некоторая вершина  $k_s$  и некоторое ребро  $k_l$  не будут разрушены, равна соответственно  $\sum_{k=0}^{k_s-1} g_k^b(\eta)$  и  $\sum_{k=0}^{k_l-1} g_k^p(\eta)$ ,  $g_k^b(\eta)$  и  $g_k^p(\eta)$  обозначают ожидаемые части вершин и ребер, которые подверглись разрушающим действиям с частотой  $\eta$ .

Согласно распределению Пуассона для вероятностей:

$$g_k^b(\eta) = e^{-p^b \eta} \frac{(p^b \eta)^k}{k!}, \quad (1)$$

$$g_k^p(\eta) = e^{-p^p \eta} \frac{(p^p \eta)^k}{k!}. \quad (2)$$

Поскольку сеть имеет распределенную структуру, в некоторых случаях разнесенную на большой территории ее физическую структуру представляет простой неориентированный граф.

Для того, чтобы информация о разрушениях и стойкости элементов сети – вершин  $\zeta_b$  и ребер  $\zeta_p$  была полной, необходимо ввести понятия



вероятности состояния каналов связи (ребер графа) и учесть условную надежность вершин – Zigbee сенсорных модулей графовой модели в виде

$$\zeta_b = 1 - p^b \nu, \quad (3)$$

$$\zeta_p = 1 - p^p \omega, \quad (4)$$

где  $\nu$  – условная надежность узлов;

$\omega$  – вероятность состояния канала связи, т.к. предполагается учитывать обходные пути, обеспечиваемые методом маршрутизации.

Тогда ожидаемые части вершин и ребер, которые подверглись разрушающим действиям, представим в виде

$$g_k^b(\eta) = e^{-p^b \nu \eta} \frac{(p^b \nu \eta)^k}{k!}, \quad (5)$$

$$g_k^p(\eta) = e^{-p^p \omega \eta} \frac{(p^p \omega \eta)^k}{k!}. \quad (6)$$

Необходимость определения, как условной надежности узлов, так и вероятности состояния каналов связи, приводит к трем основным задачам:

- оценке узлов сети для фирм производителей Zigbee модулей;
- оценке вероятности состояния канала связи при решении задачи оценки качества канала в виде математической простой оптимизационной функции как упорядоченного набора (вектора) из трех обобщенных параметров: надежности, производительности, интеграционной способности;
- учету изменения структуры сети в результате разрушающих действий в виде изменения графовой модели.

**Методы решения задач.** Для определения количественных характеристик параметра: условной надежности узлов, – данные по модулям фирм–производителей были приведены к безразмерным относительным величинам.

Для значения чувствительности и скорости: чем большее значение, тем лучше показатель качества, поэтому применим формулу для расчета, считая среднее значение параметра,  $p_{cp}$  и учтем, что максимальный параметр,  $p_{mak}$  (для чувствительности максимальное значение определим в минус 100 дБ, для скорости 250 кбит/с). Определим относительные параметры по формуле

$$p_{отн} = p_{cp} \cdot \left( \frac{1}{p_{mak}} \right). \quad (7)$$

Для мощности, напряжения питания, тока потребления в спящем режиме – относительный показатель рассчитаем с учетом минимальной величины, поэтому мощность передатчика в 1мВт, напряжение питания в 1,5 В, ток потребления в 0,1 мкА примем как наиболее лучшие варианты для модулей и относительные показатели получим относительно этих величин (формула приведена для тока потребления):

$$I_{\text{отн}} = \left( \frac{I_{\text{мин}}}{I} \right). \quad (8)$$

Для определения качества канала связи было предложено использовать весовой метод, и было получено Парето-оптимальное решение [7]. Для определения весовых коэффициентов совокупности показателей качества был использован метод полного факторного эксперимента и определен вектор качества. Тогда взвешенная сумма показателей качества будет записана в виде [8].

$$k_p = 0,34 k_1 + 0,33 k_2 + 0,33 k_3. \quad (9)$$

Показатели качества имеют неодинаковые размерности, поэтому составляющими вектора  $k_p$  являются не сами величины  $k_i$ , а их нормированные значения.

Единичный показатель «надежность работы»  $k_1$ , который можно обобщить, рассмотрим как усредненную сумму относительных показателей мощности сигнала при передаче и уровня сигнала на входе приемного узла сети как

$$k_1 = \left( \frac{P_p + P_q}{2} \right) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $P_p = \left( \frac{P_{\text{реал}}}{P_{\text{мак}}} \right) \rightarrow \min$  и  $P_{\text{реал}}, P_{\text{мак}}$  – реальная и максимальная мощности,

$P_q = \left( 1 - \frac{P_{\text{ч реал}}}{P_{\text{ч мак}}} \right) \rightarrow \min$  и  $P_{\text{ч реал}}, P_{\text{ч мак}}$  – реальная и максимальная чув-

ствительность.

Для сетей с ячеистой топологией возможна оценка канала связи по производительности с учетом пропускной способности. Соотношение между пропускной способностью сети  $Y(p)$  и функционирующей нагрузкой  $Y_\phi$  описывается неравенством

$$Y(p) \leq Y_\phi. \quad (11)$$

Неравенство основано на том, что в состав направления связи может входить несколько каналов связи (ребер графа), и если учитывать, что в общем случае

$$Y(p) = \frac{Y_\phi}{n_m - 1}, \quad (12)$$

где  $n_m$  – количество узлов-разветвлений в маршруте.

Поэтому параметр производительности сети с учетом маршрутизации, когда  $n_m \rightarrow \min$  рассмотрим в виде

$$k_2 = \frac{1}{Y(p)} \rightarrow \min \quad (13)$$

Количественная оценка интеграционной способности определяется наличием работоспособных каналов связи.

Интеграционная способность  $k_3$  оценивается как

$$k_3 = \frac{\min(M_{ij})}{\sum M_{ij}} \rightarrow \min. \quad (14)$$

где  $\min(M_{ij})$  – минимальное количество ребер, соединяющих  $x_i, x_j$  вершины, возможен прямой путь из одного ребра;

$\sum M_{ij}$  – суммарное количество ребер графа (всех каналов связи –

«масштаб» развертывания сети).

Вероятность состояния канала связи для одного пути с учетом максимального показателя вектора качества  $k_{pmax}$  (наихудший вариант):

$$\omega_p = \sum_{i=1}^{M_{ij}} \frac{\left(1 - \frac{k_{pi}}{k_{pmax}}\right)}{M_{ij}}, \quad (15)$$

где  $M_{ij}$  – количество ветвей (ребер), соединяющих  $x_i, x_j$  вершины для одного пути.

Вероятность состояния каналов связи при наличии  $M$  путей (маршрутов), которые определяются методом маршрутизации

$$\omega = \sum_{i=1}^M \frac{\omega_p}{M}. \quad (16)$$

При решении задачи распада исходного графа на  $p$  компонентов и отыскания вероятности того, что граф связан  $P$  ( $p = 1$ ) с учетом степени вершин  $z(i)$  для  $x_i$  и ребер  $n$  критерий живучести определяется как [2]

$$P(\rho = 1) \leq 1 - np^z \left[ 1 - \frac{n-1}{2} p^{z(1-\frac{1}{n})} \right]. \quad (17)$$

Принимая значения  $P(\rho = 1) \geq \frac{3}{4}$ , выражение (17) можно упростить:

$$P(\rho = 1) \leq 1 - \frac{n}{2} p^z, \quad z \ll n. \quad (18)$$

Для графов, удовлетворяющих условию (18), существует соотношение:

$$\beta = 1 - e^{-\alpha\beta} \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{-\ln(1-\beta)}{\beta}. \quad (19)$$

$$\beta = 1 - \exp \left\{ -z \left[ \sum_{k=0}^{k_1-1} g_k^b(\eta) \right] \left[ \sum_{k=0}^{k_1-1} g_k^p(\eta) \right] \beta \right\}. \quad (20)$$

Таким образом, выражение (20) определяет среднее количество неразрушенных вершин. Компонента  $\alpha$ , учитывая (20), будет иметь в общем случае вид

$$\alpha = z \left[ \sum_{k=0}^{k_1-1} g_k^b(\eta) \right] \left[ \sum_{k=0}^{k_1-1} g_k^p(\eta) \right] = \frac{-\ln(1-\beta)}{\beta}. \quad (21)$$

Задав  $\beta \geq \beta_0$  как коэффициент живучести [2], получим:

$$z \left[ \sum_k \frac{(p^b \nu \eta)^k}{k!} \right] \left[ \sum_k \frac{(p^p \omega \eta)^k}{k!} \right] \geq \exp^{(p^b \nu + p^p \omega) \eta} \left( \frac{-\ln(1-\beta_0)}{\beta_0} \right). \quad (22)$$

Выражение (22) определяет обобщенный критерий живучести.

В случае разрушения ребер при сохранении вершин (22) приводится к виду

$$z \left[ \sum_k \frac{(p^p \omega \eta)^k}{k!} \right] \geq \exp^{p^p \omega \eta} \left( \frac{-\ln(1-\beta_0)}{\beta_0} \right). \quad (23)$$

**Результаты исследований.** Чтобы подтвердить выкладки, проведем оценку узлов сети для фирм производителей Zigbee модулей.

Результаты усредним по четырем относительным параметрам, определяя условную надежность узлов, см. табл. 1.

Особое внимание уделим модулям XBee-PRO от компании Digi, составляющим сеть, с условной надежностью, равной 0,63.

Основные режимы работы модулей и их параметры, такие как максимальная выходная мощность, 1 мВт (реальная рабочая 0,8 мВт), реальная чувствительность -92 дБ (максимальная -100 дБ) будем исполь-

зовать для определения единичного показателя «надежность работы»

$$k_1 \text{ по формуле (10): } k_1 = \left( \frac{0,8 + 0,08}{2} \right) = 0,44.$$

Таблица 1 – Условная надежность Zigbee модулей

Производители/ общее название модулей	Относительное значение чувстви- тельности	Относительное значение мощно- сти передатчика	Относительное значение для напряжения питания	Относительное значение тока ре- жима энергосбе- режения	Условная надежность
Texas Instruments и Chipcon / CC2420ZRTC+ MSP430xx или eZ430-RF2500	0,89	0,25	0,51	0,25	0,475
Freescale/MaxStream XBee	0,83	1	0,48	0,01	0,58
Atmel и Ember/ ETRX	0,89	0,31	0,55	0,1	0,462
Atmel/AVR Z-Link	0,91	0,33	0,55	0,01	0,45
Jennic/JN5139	0,88	0,33	0,51	0,25	0,492
MaxStreamи Ember / XBee Series 2	0,89	0,5	0,52	0,1	0,502
Digiи Ember/ XBee ZNet 2.5	0,87	0,5	0,52	0,1	0,497
Digiи Ember / XBee-PRO ZB	0,9	1	0,52	0,1	0,63
Radiocraft иChipcon / RC2400(HP)ZNM	0,85	0,25	0,47	0,16	0,432
Ember/модули Embee	0,83	0,5	0,51	0,0006	0,46

Параметр «производительность сети» нельзя определить без учета маршрутизации. В работе[9] представлен анализ ячеистой сети. Некоторые результаты данной работы используем для определения марш-

рутизации различными методами. Для этого представим первоначальную сеть в виде графа, см. рис. 1.

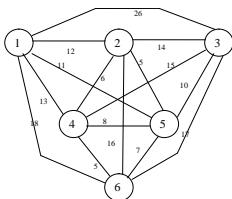


Рис. 1 – Полносвязный граф

Разрушения будем рассматривать в виде разрушения ребер при неузязвимости узлов. Действия разрушений представим в виде графа на рис.2.

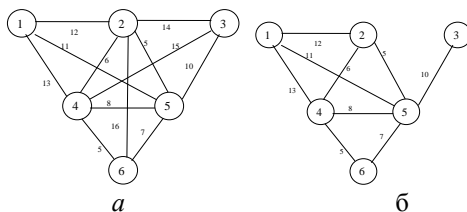


Рис. 2 – Модели сети с последствиями разрушений:  
а – разрушение 3-х ребер; б – разрушение 6-ти ребер

Определим передачу данных от 1-й вершины к 6-й. Так как маршрута 1-го порядка не существует (нет прямой связи между вершинами), определим маршруты 2-го порядка. Воспользуемся для определения пути методами Беллмана-Форда, Дейкстры и матричным [9]. Сведем результаты (являющиеся промежуточными по методам Беллмана-Форда, Дейкстры, так как они предполагают связь всех вершин) в таблицу 2.

Таблица 2 – Маршрут от 1 до 6-й вершин графа

Метод определения маршрута (пути)	Разрушение 3-х ребер, последовательность соединения узлов	Разрушение 6-ти ребер, последовательность соединения узлов
Беллмана-Форда	1-5-6	1-5-6
Дейкстры	1-5-6	1-5-6
Матричный $\delta_{i,j} = \min \{(\infty+18); (12+11); (\infty+17); (13+5); (11+7); (\infty+0)\} = 18$	1-4-6 1-5-6 3-го порядка: 1-2-4-6	1-4-6 1-5-6 3-го порядка: 1-2-4-6

Даже для простого сравнения выясняется наличие двух путей 2-го порядка по матричному методу маршрутизации в отличие от только одного возможного варианта для других методов.

Параметр производительности сети с учетом маршрутизации и реальной нагрузки в сети оценим по проведенным экспериментам при осуществлении связи между XBee-PRO Digi модулями с передачей 100 пакетов по 32 байт в течение 10000 мс и, аналогично 100 пакетов по 2 байта. Поэтому  $k_2 = 0,003125$  и при меньшем размере пакетов  $k_2 = 0,05$ .

Количественная оценка интеграционной способности определяется наличием работоспособных каналов связи. При рассмотрении случаев разрушений ребер из 15 ребер для полносвязного графа для случая разрушения 3-х ребер остается только 12, для 6-ти только 9. Поэтому параметр  $k_3$  оценивается как  $k_3 = \frac{2}{12} = 0,166 \cdot k_3 = \frac{2}{9} = 0,222$  согласно (14).

Составим взвешенные суммы показателей качества каналов связи для различных условий:

- $k_p = 0,34 \cdot 0,44 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,05 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,166 = 0,1809632$ ,
- $k_p = 0,34 \cdot 0,44 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,05 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,222 = 0,1890944$ ,
- $k_p = 0,34 \cdot 0,44 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,00312 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,166 = 0,17415695$ ,
- $k_p = 0,34 \cdot 0,44 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,003125 + 0,33 \cdot 0,44 \cdot 0,222 = 0,1823719$ .

Анализ показателей качества на этапе оценки каналов связи определяет одну из главных тенденций: при минимальном значении в 3-м случае, следующим приоритетом, определяемый методом маршрутизации, при разрушении 3-х ребер является 1-й, затем 4-й (что подтверждает важность наличия маршрута передачи данных, а не пропускной способности канала даже при разрушении 6-ти ребер), и затем только 2-й случай.

Вероятность состояния канала связи для пути с учетом максимального показателя вектора качества  $k_{p_{\max}}$  (наихудший вариант) и весовых значений ребер графа, см. рис. 2, определим для случаев соединения узлов-вершин графовой модели сети для 1-4-6, 1-5-6 :

$$\omega_{p_{1-4-6}} = \frac{\left(1 - \frac{k_{pi}}{k_{p_{\max}}} \frac{V_{1-4}}{V_{\max}}\right) \left(1 - \frac{k_{pi}}{k_{p_{\max}}} \frac{V_{4-6}}{V_{\max}}\right)}{2}, \quad (24)$$

где  $V_{4-6}, V_{\max}$  – вес ребра, максимальный вес ребра соответственно, см. рис. 2. Для сети с разрушением 3-х ребер (матричный метод маршрутизации):

$$\omega_{p_{1-4-6}} = \frac{\left(1 - \frac{0,17415695}{0,1809632} \cdot \frac{13}{16}\right) + \left(1 - \frac{0,17415695}{0,1809632} \cdot \frac{5}{16}\right)}{2} = 0,45868$$

Для сети с разрушением 6-ти ребер (матричный метод маршрутизации):

$$\omega_{p_{1-4-6}} = \frac{\left(1 - \frac{0,1823719}{0,1890944} \cdot \frac{13}{13}\right) + \left(1 - \frac{0,1823719}{0,1890944} \cdot \frac{5}{13}\right)}{2} = 0,33231$$

Для сети с разрушением 3-х ребер (матричный метод, метод Беллмана-Форда, Дейкстры ) аналогично рассчитаем:  $\omega_{p_{1-5-6}} = 0,45866$ , с разрушением 6-ти ребер  $\omega_{p_{1-5-6}} = 0,332408$ . Полученные значения для одинаковых разрушений практически совпадают, так как и в первом случае обнаружения маршрута (1-4-6) и во втором (1-5-6), общий вес ребер одинаковый, равный 18. Но для матричного метода существует два возможных пути, поэтому определим вероятность состояния каналов связи при наличии двух путей как

$$\omega = \frac{\omega_{p_{1-4-6}} + \omega_{p_{1-5-6}}}{2}, \quad \text{равной для разрушения 3-х ребер}$$

$\omega = 0,45867$ , при разрушении 6-ти ребер  $\omega = 0,332359$ .

Для определения обобщенного критерия живучести необходимо учесть характер разрушений, учитывая, что  $p^p \eta$  можно считать вместе как



результат разрушения 3-х ребер из 15-ти полностью связного графа, т.е.  $p^p\eta=12/15=0,8$ , и для разрушения 6-ти ребер считать  $p^p\eta=9/15=0,6$ . На основании полученных значений выполним оценку обобщенного критерия живучести. Результаты сведем в таблицу 3.

Таблица 3 – Обобщенный критерий живучести с учетом комплексной оценки состояния каналов связи

$\beta_0$	$p^p\eta$	$\omega$	$\exp^{p^p\omega\eta} \left( \frac{-\ln(1-\beta_0)}{\beta_0} \right)$	$\exp^{-p^p\omega\eta} \frac{(p^p\omega\eta)^k}{k!}$
0,7	0,8	0,45867	2,4824294629092801571	0,25423307030985052538
0,7	0,8	0,45866	2,4824096035530144138	0,25422956130631540701
0,7	0,6	0,332359	2,0995375428787069098	0,16336299471425933240
0,7	0,6	0,332408	2,0995992701898545714	0,16338227596471113303
0,8	0,8	0,45867	2,9036383283907752728	0,25423307030985052538
0,8	0,8	0,45866	2,9036150993770643253	0,25422956130631540701
0,8	0,6	0,332359	2,4557788136519519156	0,16336299471425933240
0,8	0,6	0,332408	2,4558510146104221718	0,16338227596471113303
0,9	0,8	0,45867	3,6925931462685288187	0,25423307030985052538
0,9	0,8	0,45866	3,6925636056415213360	0,25422956130631540701
0,9	0,6	0,332359	3,1230446048934534003	0,16336299471425933240
0,9	0,6	0,332408	3,1231364237545679123	0,16338227596471113303

Если учесть возможность разрушения и узлов сети, то значение обобщенного показателя будет изменяться. Результаты сведем в табл. 4.

Таблица 4 – Обобщенный критерий живучести

$\beta_0$	$p^b \eta$	$p^r \eta$	$\nu$	$\omega$	$\exp^{(p^b \nu + p^r \omega) \eta} \left( \frac{-\ln(1 - \beta_0)}{\beta_0} \right)$
0,7	0,8	0,8	0,63	0,45867	4,1092383819199286097
0,7	0,6	0,6	0,63	0,332359	3,0639872872536887728
0,8	0,8	0,8	0,63	0,45867	4,8064777849735175325
0,8	0,6	0,6	0,63	0,332359	3,5838725965431451243
0,9	0,8	0,8	0,63	0,45867	6,1124578612107895572
0,9	0,6	0,6	0,63	0,332359	4,5576555653296896958

**Выводы.** Полученные результаты подтверждают необходимость оценки узлов сети – Zigbee модулей по их условной надежности. Комплексная оценка вероятности состояния канала связи при решении задачи оценки качества канала в виде математической простой оптимизационной функции показала интересный результат, связанный с нахождением маршрута разными методами и отсутствие альтернативных маршрутов в методах Беллмана-Форда, Дейкстры, наличием двух маршрутов 2-го порядка для матричного метода, и возможность прокладки маршрута третьего порядка. Подтверждается важность наличия маршрута передачи данных, а не пропускной способности в оценке качества канала связи как в случае разрушения 3-х, так и 6-ти ребер на основании расчетов и измерений, проведенных с реальными модулями XBee-PRO.

Учет изменения структуры сети в результате разрушающих действий в виде изменения графовой модели позволило определить обобщенный критерий живучести, количественные и качественные параметры сети. Состояние повышения живучести определяет необходимость хотя бы частичной работоспособности элементов сети в зависимости от маршрутизации. Для оценки последствий использовались вероятности разрушений вершин и ребер.

**Список литературы:** 1. Додонов, А. Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с. 2. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография / Ю. Ю. Громов, В. О. Драчев, К. А. Набатов, О. Г. Иванова. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2007. – 152 с. 3. Bellmore, M. Optimal defense of multicommodity networks / M. Bellmore, H. D. Ratliff // Management Science. – 1971. – vol. 18, № 4. – pp. 174–185. 4. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир 1976. – 165 с. 5. Додонов, А. Г. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А. Г. Додонов, М. Г. Кузнецова, Е. С. Горбачик. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с. 6. Бестугин, А. Р. Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей / А. Р. Бестугин, А. Ф. Богданова, Г. В. Стогов. – С.-Пб.: Политехника, 2003. – 174 с. 7. Борисенко, А. С. Показатели

КАЧЕСТВА СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ Zigbee / А.С. Борисенко, Л.В. Головкина 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-6). (Україна, Одеса, 29 вересня-3 жовтня 2014 р.): Тези доповідей / ред кол.: В.А. Сминтина (гол.ред.); члени редколегії: О.С.Беляев, І.В. Блонський, Я.І. Лепіх [та ін.]. – Одеса: Астропринт, 2014. – 268 с. – С.116. **8.** Борисенко, А.С. Оценка каналов связи сетей Zigbee/ А.С. Борисенко, Л.В. Головкина // А.С. Борисенко, Л.В. Головкина. Сборник научных трудов SWorld. – Выпуск №3 (36). Том 5. Технические науки. – Иваново: Маркова АД, 2014 – 96 с. – С 48–54. **9.** Борисенко, А.С. Методы оптимизации для MESH сети Zigbee / А.С. Борисенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – 1/9(61). – С. 24–29.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Dodonov, A.G. and D.V. Lande. *Vitality of informative systems*. Kiev: Nauk. dumka, 2011. Print. **2.** *Synthesis and analysis of vitality of the networks systems: monografiya* / Y. Y. Gromov, V. O. Drachev, K. A. Nabatov, O.G. Ivanova. Moscow: «Mashynostroenye-1», 2007. Print. **3.** Bellmore, M. and H. D. Ratliff Optimal defense of multicommodity networks // Management Science, 1971. vol. 18, No 4. 174–185. Print. **4.** Zade, L. A. *Concept linguistic variable and his application to the decision-making close*. Moscow: Myr, 1976. Print. **5.** Dodonov, A.G., M.G. Kuznetcova, E.S. Gorbachik. *Introduction in the theory of vitality of the computer systems*. Kiev: Nauk. dumka, 1990. Print. **6.** Bestugyn, A.R., A.F. Bogdanova, G.V. Stogov. *Control and diagnosing of telecommunications networks*. Canktpeterburg: Polytekhnyka, 2003. Print. **7.** Borisenko A., Golovkina L. Indexes of quality of sensory networks ZigBee Trudy 6-th mezhdunar.Scientific-technical konf. «Sensor electronics and microsystem technologies» (СЕМСТ-6). Odesa: Astroprynt, 2014. 116. Print. **8.** Borisenko A.S., Golovkina L.V. Estimation of communication channels of networks zigbee. *Collection of scientific papers SWorld*. Issue No 3 (36). Vol. 5. Engineering sciences. Ivanovo: Markova AD, 2014. 48–54. Print. **9.** A. Borisenko Methods of optimization for mesh network in Zigbee // *East Europe Journal of front-rank technologies*, 2013. 1/9(61). 24–29. Print.

*Поступила (received) 26.03.2015*

УДК 621.331

**Д. О. БОСИЙ**, канд. техн. наук, доцент, докторант ДНУЗТ,  
Дніпропетровськ

## **ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

В статті розглянуто питання виконання розрахунків систем тягового електропостачання в якості складної системи, в якій вимагається враховувати багато різноманітних факторів. Запропоновано методику просторово-часового розрахунку систем тягового електропостачання, яка представляє собою аналітичне описання основних електричних процесів кусочно-заданими функціями двох змінних. Запропоновану методику можна використати до оптимізаційних розрахунків та визначення керуючого впливу при посиленні систем тягового електропостачання або застосуванні підходів керованого електропостачання.

**Ключові слова:** електрична тяга, система електропостачання, розрахунок, модель, простір, час, графік руху, схема живлення, контактна мережа.

© Д. О. Босий, 2015

**Вступ.** Система тягового електропостачання електрифікованих залізниць є складною системою, для розрахунку якої в залежності від поставленої задачі вимагається враховувати багато різноманітних факторів, від яких будуть залежати обрані методи і способи розрахунку та які, в свою чергу, будуть впливати на об'єми та швидкість розрахунку.

Зазвичай моделі системи тягового електропостачання застосовуються або для отримання числових характеристик електричних величин при проектуванні ділянки електрифікованої залізниці або для оптимізації режимів роботи існуючих ділянок, чи при впровадженні нових пристроїв електропостачання чи для аналізу ефективності, а в окремих випадках, і при виникненні ненормальних режимів експлуатації.

Таким чином, на етапі проектування ділянок необхідні моделі для розрахунку проектних показників систем тягового електропостачання стосовно режимів напруги, втрат потужності, ККД, пропускнуєї спроможності ділянки, тощо. За наявності резервів чи невизначеностей на цьому етапі можливе використання оптимізаційних розрахунків стосовно вибору чи коригування параметрів системи тягового електропостачання з метою покращення показників роботи.

На етапі експлуатації моделі можуть застосовуватись для оптимізації режимів напруги з врахуванням особливостей систем зовнішнього електропостачання, розрахунку наявних показників систем тягового електропостачання з подальшим вибором варіантів підсилення чи коригування обраних на етапі проектування параметрів, аналізу ефективності роботи ділянок електрифікованих залізниць на підставі обробки великих масивів експериментальних даних, проведення повнофакторних експериментів та узагальнення результатів.

Широкого розповсюдження набули спеціалізовані розробки засобів моделювання систем тягового електропостачання:

Nord, Fazonord, Flow3, Fazonord-Расчеты, Fazonord-Качество (Крюков А. В., Закарюкін В. П.), Іркутського державного університету шляхів сполучення [1];

КОРТЕС (Марський В. Є.), Науково-дослідний інститут залізничного транспорту (ВНДІЗТ) [2];

ведуться також і розробки Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту, зокрема

PrEns (Савіч Я. Ю.) з подальшим розвитком в роботах [3-5];

Матрікс (Мицко Р.С.) [6] з подальшим розвитком в систему Поток (Калашников К. О) [7].

Деякі науковці при моделюванні окремих режимів роботи систем тягового та зовнішнього електропостачання використовують універсальні засоби моделювання OrCAD, TCAD, MatLAB, LabView, які мають

потужні бібліотеки моделювання пристроїв загальної енергетики, та в яких нажалі проблемно врахувати повністю специфіку систем тягового електропостачання.

З аналізу слідує, що найбільш узагальнюючим є отримання результатів в просторово-часових координатах, без яких неможливе виконання оптимізаційних розрахунків системи тягового електропостачання. Саме просторово-часове уявлення всіх електричних величин, які необхідні для розрахунків систем тягового електропостачання, дозволяє побудувати інтелектуальні системи керування режимами систем тягового електропостачання.

**Постановка задачі.** Необхідно розробити модель, яка на підставі вихідних даних у вигляді графіку руху, тягових розрахунків або режимних карт, схеми живлення та секціонування ділянки, даних режимів напруги системи зовнішнього електропостачання дозволить виконувати електричні розрахунки системи тягового електропостачання в просторово-часових координатах, які включають в себе функції розподілу струму, спаду напруги та втрат потужності в контактній мережі, оптимізаційні розрахунки, які складаються з пошуку оптимального рівня напруги на кожній тяговій підстанції, пошук кількості та місця встановлення підсилюючих пунктів, пошук закону управління керованими підсилюючими пунктами, закони управління пристроями компенсації реактивної потужності на змінному струмі, розрахунки параметрів режиму системи електропостачання, а саме показники якості електричної енергії, величини напруги, струму, кутів зсуву фаз на тягових підстанціях, втрати в елементах системи електропостачання.

Розроблена модель повинна реалізовуватись у вигляді програмного комплексу, який виконуватиме розрахунок режимних показників системи тягового електропостачання для залізниць постійного та змінного струму, а саме значень фідерних і первинних струмів, розподілу струмів в контактній мережі, втрат напруги, потужності, витрат електричної енергії та основних показників якості електроенергії в системі тягового електропостачання з врахуванням технічних засобів поліпшення якості електричної енергії; виконання оптимізаційних розрахунків оптимальних параметрів системи тягового електропостачання та визначення законів управління технічними засобами з метою підвищення ефективності режиму роботи системи тягового електропостачання.

**Основна частина.** Просторово-часова модель системи тягового електропостачання ґрунтується на аналітичному описі основних електричних процесів функціями двох змінних, взаємозв'язок між якими визначається графіком руху поїздів  $x_T(n, t)$  (рис. 1), що визначає графікову координату кожного окремого поїзду з номер  $n$  у будь-який момент

часу  $t$ . Використовуючи інші вихідні у вигляді профілю потужності електрозову, параметрів системи зовнішнього та тягового електропостачання визначаються кусочно-задані функції двох змінних, які являють собою залежності розподілу струмів та втрат напруги в контактній мережі у часі та просторі.

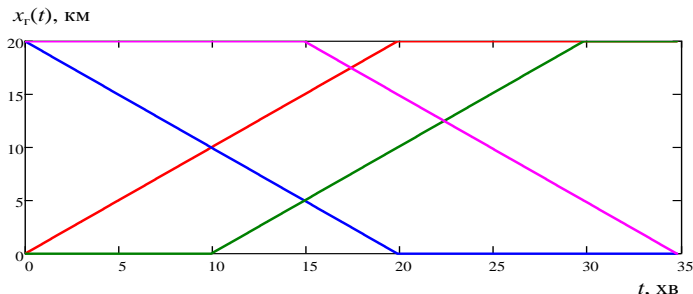


Рис. 1 – Розрахунковий графік руху поїздів

Струм фідера без врахування вирівнювального струму визначається як добуток відповідної функції струморозподілу на струм поїзду в поточній координаті  $x$ . Для двосторонньої схеми

$$I_{\Phi 1}(x) = I \frac{L-x}{L}; \quad I_{\Phi 2}(x) = I \frac{x}{L}.$$

де  $L$  – довжина ділянки, км.

Вузлова схема живлення характеризується струморозподілом

$$I_{\Phi 1}(x) = I \times \begin{cases} 1 - \frac{L+l_c}{2Ll_c} x, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_c \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 2}(x) = I \times \begin{cases} \frac{L-l_c}{2Ll_c} x, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_c \leq x \leq L; \end{cases}$$

$$I_{\Phi 3}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_c; \\ 1 - \frac{(2L-l_c)(L-x)}{2L(L-l_c)}, & l_c \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 4}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{l_c(L-x)}{2L(L-l_c)}, & l_c \leq x \leq L; \end{cases}$$

де  $l_c$  – розташування поста секціонування, починаючи від першої підстанції, км.

Струми фідерів у часі (рис. 2) визначаються суперпозицією окремих часток від кожного поїзду відповідно до графіку руху з врахуванням вирівнювального струму. Для скорочення в подальшому приводяться викладки для непарного фідера першої підстанції та для парного наступної, тобто

$$I_{\Phi 1}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \varphi_1(x_T(2i-1, t)) I_{\Pi}(2i-1, t) + \sum_{i=1}^{n_2} \varphi_2(x_T(2i, t)) I_{\Pi}(2i, t) + I_{\text{вир}}(t);$$

$$I_{\Phi 4}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \varphi_4(x_T(2i-1, t)) I_{\Pi}(2i-1, t) + \sum_{i=1}^{n_2} \varphi_3(x_T(2i, t)) I_{\Pi}(2i, t) - I_{\text{вир}}(t),$$

де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – функції струморозподілу відповідно до номеру фідера першої (1, 2) та наступної (3, 4) тягової підстанції;

$I_{\Pi}(n, t)$  – функція результатів тягових розрахунків для поїзду з номером  $n$  у момент часу  $t$ ;

$2i-1, 2i$  – визначають номери непарного та парного поїзду;

$n_1, n_2$  – кількість поїздів відповідно на першій та другій колії.

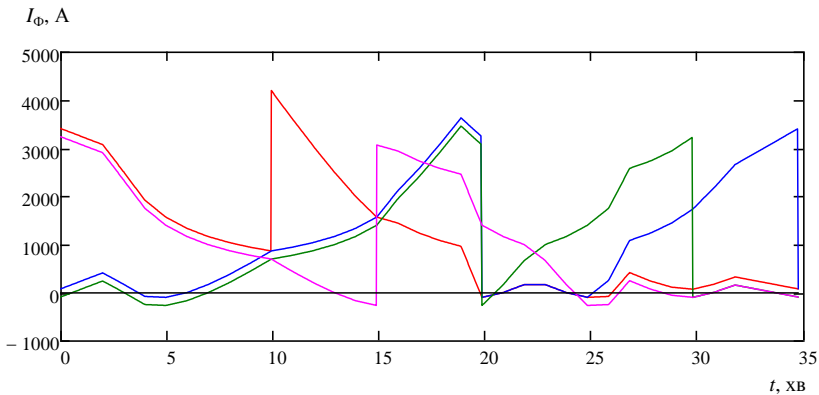


Рис. 2 – Результати розрахунку струмів фідерів

За допомогою отриманих струмів фідерів та графіку руху поїздів визначається функція розподілу струмів в контактній мережі. Для цього спочатку визначається струморозподіл у заданій схемі живлення від одного навантаження, наприклад для першої колії вузлової схеми живлення

$$I_{KI}(n, t, x) = \begin{cases} \begin{cases} I_{\Phi_1}(n, t), x \in [0; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ -[I_{\Phi_2}(n, t) + I_{\Phi_3}(n, t) + I_{\Phi_4}(n, t)], x \in (x_{\Gamma}(n, t); l_C]; \\ -I_{\Phi_3}(n, t), x \in (l_C; L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in [0; l_C]; \end{cases} \\ \\ \begin{cases} I_{\Phi_1}(n, t), x \in [0; l_C]; \\ I_{\Phi_1}(n, t) + I_{\Phi_2}(n, t) + I_{\Phi_4}(n, t), x \in (l_C; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ -I_{\Phi_3}(n, t), x \in (x_{\Gamma}(n, t); L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in (l_C; L]; \\ n = 2i - 1; \end{cases} \\ \\ \begin{cases} I_{\Phi_1}(n, t), x \in [0; l_C]; \\ -I_{\Phi_3}(n, t), x \in (l_C; L]; \\ n = 2i. \end{cases} \end{cases},$$

Тут  $I_{\Phi_1}(n, t) \dots I_{\Phi_4}(n, t)$  – струм кожного фідера (1.4) від поїзда з номером  $n$  у момент часу  $t$ .

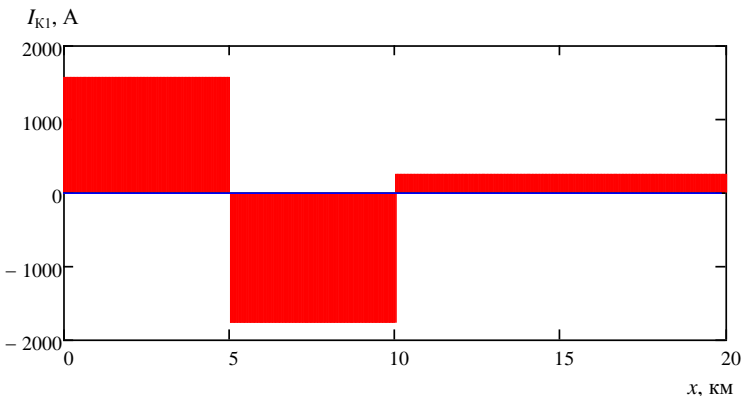


Рис. 3 – Розподіл струмів в контактній мережі в момент часу  $t = 5$  хв



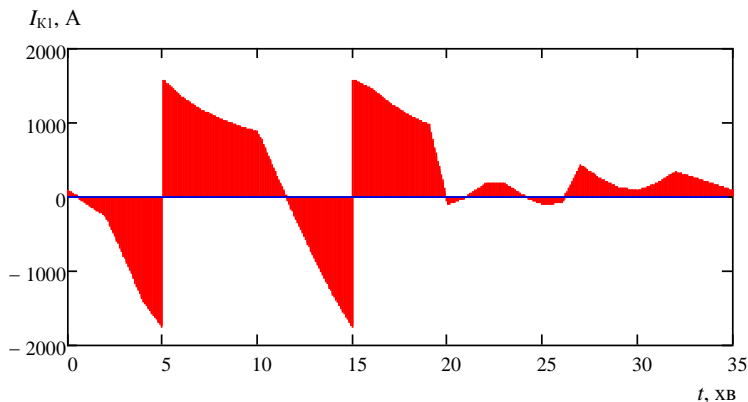


Рис. 4 – Часова залежність струму в контактній мережі для координати  $x = 5$  км

Далі за допомогою принципу суперпозиції визначається розподіл струмів в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням вирівнювальних струмів. Наприклад, для контактної мережі першої колії

$$I_{K1}(t, x) = \sum_{i=1}^{n_1} I_{K1}(2i-1, t, x) + \sum_{i=1}^{n_2} I_{K1}(2i, t, x) + I_{\text{вир}}(t).$$

Визначення функції розподілу втрат напруги передбачає використання функції розподілу струмів в контактній мережі з накопичуючим домноженням на відповідну відстань та питомий опір мережі. При накопиченні використовується рекурсивний підхід, тобто визначення розподілу втрат напруги наступного інтервалу використовує втрату напруги попереднього. Формалізований запис функції розподілу втрат напруги в контактній мережі першої колії матиме вигляд

$$\Delta U_{K1}(n, t, x) =$$

$$= r_0 \times \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, x_{\Gamma}(n, t)) + I_{K1}(n, t, x)(x - x_{\Gamma}(n, t)), x \in (x_{\Gamma}(n, t); l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in [0; l_C]; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, x_{\Gamma}(n, t)) + I_{K1}(n, t, x)(x - x_{\Gamma}(n, t)), x \in (x_{\Gamma}(n, t); L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in (l_C; L]; \end{array} \right. \\ n = 2i - 1; \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; L]; \end{array} \right. \\ n = 2i. \end{array} \right. ,$$

За аналогією з функцією розподілу струмів в контактній мережі визначається розподіл втрат напруги в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням впливу вирівнювальних струмів, а саме

$$\Delta U_{K1}(t, x) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{K1}(2i-1, t, x) + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{K1}(2i, t, x) + I_{\text{вир}}(t) \cdot r_0 \cdot x.$$

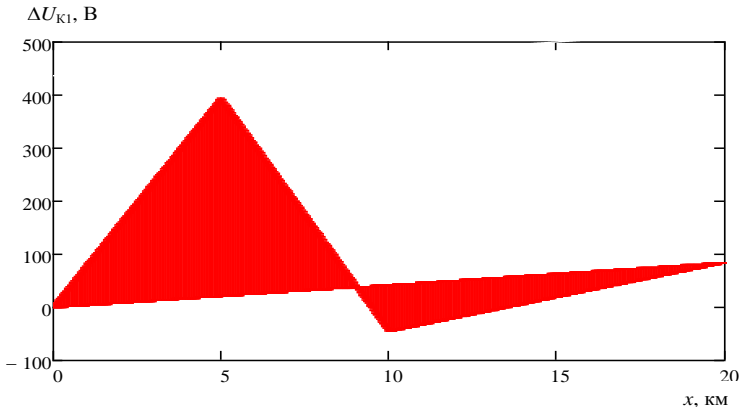


Рис. 5 – Розподіл втрат напруги в контактній мережі в момент часу  $t=5x$

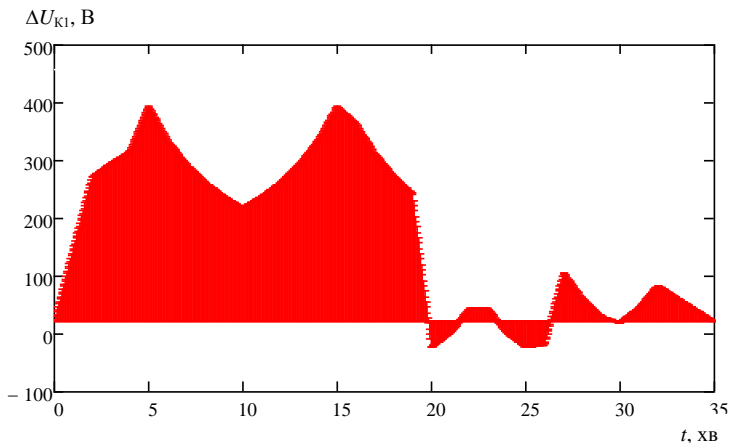


Рис. 6 – Часова залежність  $x$  = втрати напруги в контактній мережі для координати 5 км

Добуток за модулем просторово-часових функцій розподілу втрат напруги та струмів в контактній мережі визначає розподіл втрат потужності

$$\Delta P_K(t, x) = |I_{K1}(t, x) \cdot \Delta U_{K1}(t, x)| + |I_{K2}(t, x) \cdot \Delta U_{K2}(t, x)|.$$

Інтегрування функції розподілу втрат потужності за координатою простору визначає миттєві значення втрат потужностей в системі електропостачання, а за координатою часу – розподіл втрат електроенергії уздовж розрахункової ділянки. Подвійне інтегрування функції розподілу втрат потужності визначає втрати електроенергії на розрахунковий ділянку за період розрахунку.

$$\Delta P_K(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx; \quad \Delta P_K(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_K(t, x) dt;$$

$$\Delta W = \frac{1}{L \cdot T} \int_0^T \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx dt.$$

**Реалізація та робота алгоритму.** Приведені математичні викладки реалізовані у вигляді алгоритму в середовищі MathCAD та в окремій системі розрахунків *iSET*, написаної в середовищі Delphi.

Перед початком роботи створиться схема живлення ділянки тягової мережі, для якої необхідно виконати розрахунки, а також задаються вихідні дані, а саме: рід струму яким електрифікована ділянка, схема живлення, графік руху поїздів на підставі часу ходу ділянкою та моме-

нту відправлення, довжина у кілометрах обраної ділянки, тип тягової мережі, рівень напруги на підстанціях, струмові навантаження, що споживаються електровозами та їх кількість для кожної колії.

Програма передбачає три режими роботи:

- 1) загальний розрахунок системи тягового електропостачання;
- 2) параметричної оптимізації;
- 3) оптимізації керуванням.

Користувачу доступне проведення загального розрахунку (рис. 7), після чого можливе виконання оптимізаційних розрахунків. Результати розрахунків відображаються у вигляді графіків струмів фідерів тягових підстанцій, напруги на струмоприймачах електровозів та втрат потужності в тяговій мережі, епюр струму, втрат напруги та потужності в тяговій мережі.

При оптимізації користувач, після проведення загального розрахунку, задає граничні умови, наприклад, за рівнем напруги. Система перевіряє відповідність отриманих результатів заданим умовам, і, якщо розрахункові дані відповідають їм, то система приймає рішення, що оптимізація не потрібна і завершує розрахунок. Якщо отримані результати не відповідають поставленим умовам, то система переходить до вибору одного з варіантів оптимізації.

При параметричній оптимізації коригуються параметри системи електропостачання, тобто вихідна потужність тягових підстанцій, площа поперечного перерізу контактної мережі, довжина міжпідстанційних зон, розташування постів секціонування та пунктів паралельно-го з'єднання.

В режимі оптимізації керуванням проводиться розрахунок для двох варіантів: підсилення системи тягового електропостачання встановленим підсилюючих пунктів та стабілізації напруги в контактній мережі.

При підсиленні системи тягового електропостачання шляхом встановлення на міжпідстанційній зоні пунктів підсилення спочатку проводиться визначення місця на розрахунковій ділянці з мінімальним значенням напруги на струмоприймачі електровозу для підключення підсилюючого пункту. Після чого визначається різниця напруги між встановленим і отриманим значенням та струм підсилення необхідний для компенсації цієї різниці. Далі проводиться розрахунок аналогічний загальному, але з урахуванням струму підсилюючого пункту в тяговій мережі. В результатах розрахунку додатково відображається струм підсилюючого пункту.

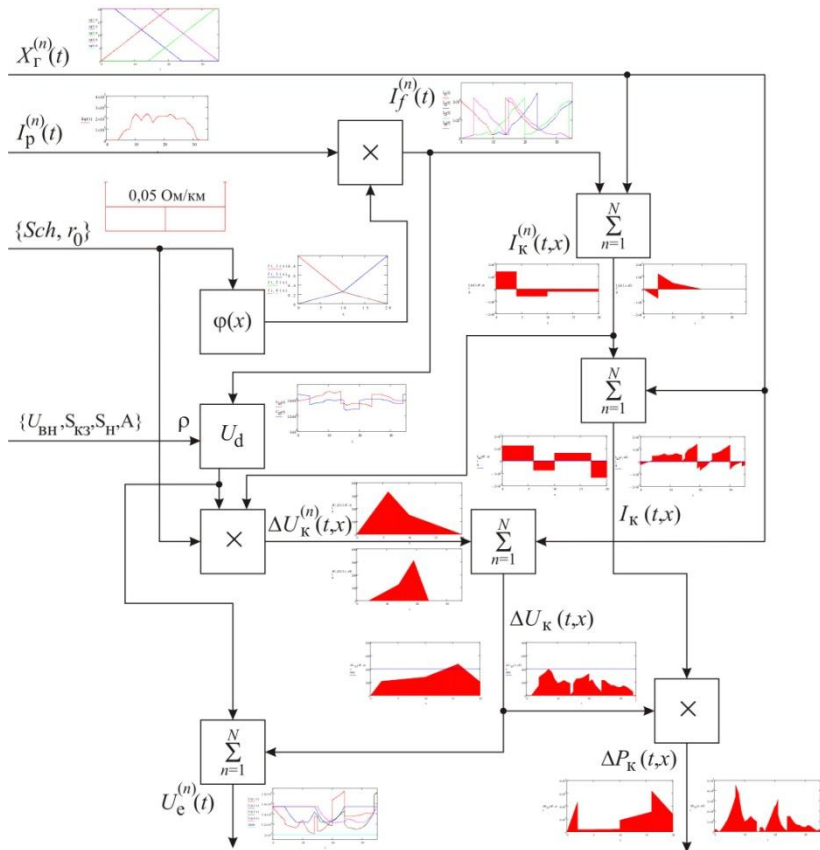


Рис. 7 – Узагальнена структура просторово-часової моделі

В результаті роботи в режимі оптимізації користувач може отримати відповідь у вигляді оптимальних варіантів підсилення системи тягового електропостачання: потужності тягових підстанцій, типу контактної мережі, відстані між тяговими підстанціями, місць установки і струмів пунктів підсилення, струму керування системою стабілізації напруги. Також програма будує графіки фідерних струмів, напруг на струмоприймачах електровозів, втрати потужності, епюри струмів та втрат напруги в контактній мережі на основі отриманих результатів.

В якості ілюстрації роботи розробленої моделі на рис. 8 приведемо приклад вирішення задачі стабілізації напруги на струмоприймачеві

при розподіленому живленні із застосуванням закону керування підсилюючим пунктом.

Порівняння втрат електроенергії для розглянутого випадку стабілізації напруги вказує на економію електричної енергії величиною до 30 %.

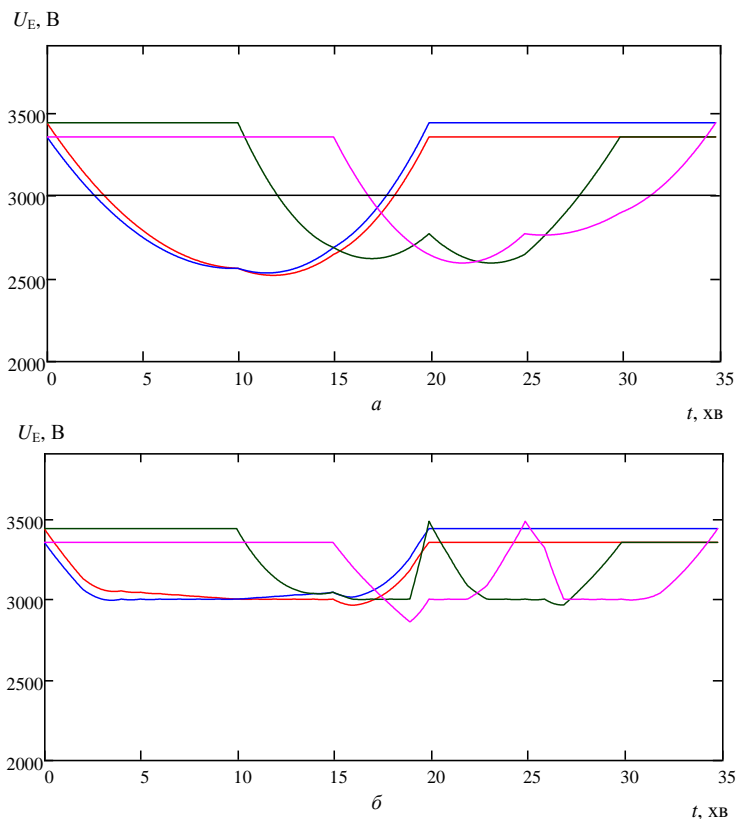


Рис. 8 – Графіки напруги на струмоприймачах:  
*a* – вихідний розрахунок; *б* – для стабілізації напруги

**Висновки.** Розрахунки систем тягового електропостачання в якості складної системи з вархуванням багатьох різноманітних факторів доцільно виконувати в просторово-часових координатах.

Розроблена методика просторово-часового розрахунку систем тягового електропостачання ґрунтується на аналітичних кусочно-заданих функціях двох змінних, а саме розподілу струмів та втрат напруги в

контактній мережі, дозволяє проводити оптимізаційні розрахунки чи розрахунки керуючого впливу при посиленні систем тягового електропостачання або застосуванні підходів керованого електропостачання.

**Список літератури:** 1. *Крюков А. В.* Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока / *А. В. Крюков, В. П. Закарыкин* // Транспорт Российской Федерации, 2010. – № 3 (28). – С. 61-65. 2. *Герман Л. А.* Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети / *Л. А. Герман, К. В. Кишкурно* // Вестник ВНИИЖТ, 2013. – № 1. – С. 16-21. 3. *Бобирь Д. В.* Удосконалення режимів ведення вантажного поїзда з електричною тягою: авт. дис. к. т. н. / *Д. В. Бобирь*. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – 22 с. 4. *Іванов О. П.* Удосконалення режимів тяги поїздів за вартісними показниками при змінних тарифах на електроенергію: авт. дис. к. т. н. / *О. П. Іванов*. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2013. – 24 с. 5. *Кузнецов В. Г.* Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму: авт. дис. д. т. н. / *В. Г. Кузнецов*. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2012. – 38 с. 6. *Кузнецов В. Г.* Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / *В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый* // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2006. – Вип. 12. – С. 36-40. 7. *Калашиников К. О.* Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень: авт. дис. к. т. н. / *К. О. Калашиников*. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – 20 с.

**Bibliography ( transliterated):** 1. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Komp'yuternye tekhnologii dlya modelirovaniya sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka*. Transport of the Russian Federation, 2010, No. 3(28), .61-65. 2. German L. A., Kishkurno K. V. *Sravnenie metodov rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya pri raznykh sposobakh ucheta parametrov vneshney seti*. VNIIZhT Bulletin, 2013, No. 1, 16-21. 3. Bobyr D. V. *Udoskonalennya rezhimiv vedennya vantazhnogo poyizda z elektrichnoyu tyagoyu*. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2007, 22 . 4. Ivanov O. P. *Udoskonalenniya rezhymiv tyagy poi'zdov za vartisnymi pokaznykamy pry zminnykh taryfah na elektroenergiyu*. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2013, 24 . 5. Kuznetsov V. G. *Rozvytok teoretychnykh osnov energozberezhenniya v sistemah elektropostachannya tyagy poi'zdov postijnogo strumu*. Dnipropetrovsk: DNURT Publ., 2012, 38 . 6. Kuznetsov V. G., Mytsko R. S., Bosiy D. A. *Otsenka poter elektroenergii v tyagovoy seti magistral'nykh zheleznykh dorog*. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2006, No. 12, . 36-40. 7. Kalashnikov K. O. *Zmenschenniya vtrat elektroenergii v tyagoviy merzhi postijnogo strumu shljahom vyboru racional'noyi dyslokatsii tyagovykh navantazhen*. Dnipropetrovsk: DNURT Publ., 2014, 20 .

## РЕФЕРАТИ

УДК 616.07 (075.8)

**Діагностика захворювання людини за характером зміни термодинамічних процесів / Й. І. Стенцель, О. І. Проказа, А. В. Рябіченко, Л. І. Петросян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 3–15. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-4525.**

Досліджуються термодинамічні процеси в біологічному організмі при захворюваннях, котрі супроводжуються екзотермічними чи ендотермічними змінами теплової енергії. Показано, що такі процеси можна описати на основі теорії реологічних перетворень теплової енергії. Приведена узагальнена нелінійна математична модель термодинамічних процесів в організмі людини, а також можливі початкові та граничні умови, при котрих можна отримати аналітичне рішення для розподілення температурного поля. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень показано, що характер зміни температурного поля залежить від вікового стану людини.

**Ключові слова:** температура, людина, процес, метод, хвороба, організм, реологія, рівняння, енергія

УДК 620.179.14

**Розширення функціональних можливостей електромагнітних перетворювачів з просторово-періодичними полями / Б. М. Горкунов, М. М. Сиренко, І. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 15–20. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-4525.**

В роботі розглянуті питання теорії електромагнітних перетворювачів для багатопараметрових вимірювань з полями, які мають просторово-періодичну структуру. Показано, як за допомогою залежностей амплітудних просторових гармонік можна розташувати секції вимірювальних обмоток з тим, щоб виділити з сигналу перетворювача необхідні гармоніки. Наведено графіки залежностей нормованих амплітуд і фаз. Описано алгоритм визначення електромагнітних і геометричних параметрів циліндричних виробів. Зроблено висновок про те, що електромагнітні перетворювачі дозволяють здійснювати багатопараметровий контроль за рахунок використання певного числа окремих просторових гармонік зондуючого поля.

**Ключові слова:** електромагнітний перетворювач, просторово-періодичне поле, багатопараметрові вимірювання, електромагнітні параметри.

УДК 620.179.14

**Однопараметровий неруйнівний контроль параметрів немагнітних циліндричних виробів / Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, М. М. Сиренко, Н. В. Костюченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 20–29. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-4525.**

В роботі розглянута теорія роботи перетворювача з досліджуванним немагнітним циліндричним зразком. Отримано функції перетворення, що зв'язують електричні і геометричні параметри досліджуваного виробу з вихідними сигналами перетворювача, що дозволило істотно розширити межі застосування перетворювача. Запропоновано метод однопараметрового контролю питомого електричного опору при відомих геометричних розмірах зразка та метод визначення діаметра зразка при відомому питомому електричному опору.

**Ключові слова:** вихрострумний перетворювач, питомий електричний опір, функція перетворення, амплітуда, фаза, магнітний потік.



УДК 620.179.16

**Розвиток теорії і практики створення ємнісних перетворювачів для ультразвукового контролю металовиробів (Огляд)/ К. Л. Ноздрачова// Вісник НТУ «ХП».** Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 29-54. – Бібліогр.: 57 назв. – ISSN 2079-4525

У роботі проаналізовано способи і засоби ультразвукового неруйнівного контролю ємнісним безконтактним методом. Описано переваги, недоліки, можливості та умови застосування ємнісного методу ультразвукового контролю. Встановлено перспективність застосування ємнісного методу, описаний принцип роботи. Розглянуто ємнісні перетворювачі та напрямки їх застосування, дослідження їх можливостей у порівнянні з іншими.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, ультразвуковий метод, ємнісний перетворювач, електрод, електричне поле, об'єкт контролю, безконтактний.

УДК 620.179.14

**Визначення оптимальних параметрів контролю стільникових панелей тепловим методом/ А. Г. Протасов // Вісник НТУ «ХП».** Серія: Електроенергетика і перетворювальна техніка. - Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 54 –60.- Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-4525.

В роботі пропонується використання методу комп'ютерного моделювання для дослідження можливостей теплового неруйнівного контролю для діагностики стану стільникових панелей. Для моделювання було використано пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics. Дослідження проводилися на трьохмірній моделі стільникової панелі. За результатами проведених досліджень було визначено оптимальні параметри контролю, що дозволяють знаходити дефекти типу відшарування обшивки від заповнювача і наявність води у заповнювачі.

**Ключові слова:** стільникова панель, комп'ютерне моделювання, трьохмірна модель.

УДК 621.314

**Експериментальні дослідження електричних характеристик ОПН / С. Ю Шевченко. // Вісник НТУ «ХП».** Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка.. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С.60–67. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-4525

Метою даної роботи є експериментальне визначення електрофізичних параметрів ОПН при різних частотах діючої напруги, що дозволить виконувати аналіз режиму їх роботи в мережах з низькою якістю електричної енергії. Виконані експериментальні дослідження електрофізичних властивостей ОПН при різних частотах діючої напруги. Отримані результати вимірів електрофізичних властивостей ОПН дозволяють визначати параметри їх схем заміщення при виконанні розрахунків режимів роботи електричних мереж при наявності гармонійних складових напруги. Проведений аналіз результатів експериментів дозволив визначити усереднені значення електрофізичних параметрів ОПН, що суттєво спрощує розрахунки параметрів схем заміщення необхідні для аналізу роботи ОПН в зоні струмів витоку вольтамперних характеристик при аналізі впливу на них вищих гармонійних складових напруги.

**Ключові слова:** обмежувачі перенапруг, Схеми заміщення ОПН, електрофізичних властивостей ОПН, діелектричні втрати, ємність, діелектрична проникність, варисторна кераміка.

УДК 681.2:623.454.836

**Визначення напрямку та шару захоронення точкових джерел гамма-випромінювання з використанням гамма-спектрометрії/ О.М. Григор'єв, З.В. Білик, Ю. В. Литвинов, М. Є. Полянський, В. В. Марушенко, О. Ю. Чернявський**

// Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2015 - № 19 (1128). – С.67-73 – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN2079-4525.

Експериментально досліджено зміну енергії джерела гамма-випромінювання <sup>137</sup>Cs при проходженні гамма-випромінювання крізь поглинач. Виявлено зменшення енергії гамма-випромінювання джерела <sup>137</sup>Cs при проходженні пучка гамма-випромінювання крізь поглинач зі свинцю товщиною 22 мм, 28 мм, 35 мм та 43 мм. Зменшення енергії гамма-випромінювання спостерігали з використанням спектрометрії гамма-випромінювання телурид кадмієвим детектором розміром 5×5×2 міліметра. Отримані результати дозволяють стверджувати, що є можливість визначати місцезнаходження радіонуклідів, що захоронені під поверхнею ґрунту на глибину декількох метрів. Глибину захоронення визначають за зменшенням кількості гамма-квантів в піку повного поглинання при використанні радіонукліда цезій-137 активністю  $2,064 \cdot 10^9$  Бк, що розташований на відстані трьох метрів від блоку детектування.

**Ключові слова:** гамма-випромінювання, кадмій телур, захоронення, гамма-джерело.

УДК 621.311

**Аналіз нормативної бази по проектуванню і побудові системи «SMART GRID» яка базується на цифрових підстанціях / О.Г. Гриб, Д.А. Гапон, Т.С. Ієрусалімова, О.В. Лелека, М.С. Белов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. . – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С.74-78 – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-4525**

Проведен аналіз нових міжнародних стандартів для побудови і проектування цифрових підстанцій, яка є основним сегментом в системі «SMART GRID». Система базується на цифровій обробці інформації, що дозволяє використовувати новітні інформаційні технології при проектуванні і експлуатації енергетичних систем. При роботі електрообладнання використовується загально інформаційна модель, яка побудована по єдиній методології, що дозволяє її використовувати від підстанції до диспетчерського центру в енергосистемі.

**Ключові слова:** електроенергія, цифрова підстанція, диспетчеризація, інформація, модель.

УДК 543.421:621.38

**Підсистема контролю меж вибуховості рудничної атмосфери для системи аерогазового захисту вугільних шахт / О. В. Вовна, А. А. Зорі // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика і перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С.79–88. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.**

Отримала подальший розвиток математична модель визначення нижньої межі вибуховості системи «метан – вугільний пил – повітря» на основі результатів досліджень вибухонебезпеки пилогазової суміші. Модель враховує зміну вмісту вологи у повітрі, вихід летючих та зольність вугілля, що дозволяє запобігати наближенню робочої точки системи аерогазового контролю до критичних меж вибуховості. Розроблені та досліджені експериментальні зразки вимірників концентрації метану та пилу, які входять до складу системи аерогазового захисту вугільних шахт.

**Ключові слова:** підсистема, контроль, метан, вугільний пил, вологість, вибуховість, руднична атмосфера.

УДК 504.064.36

**Принципи побудови системи екологічного моніторингу параметрів шахтних вод/ І. А. Шведчикова, І. В. Нікітченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергети-**

ка та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С.89-96. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-4525.

Визначено основні забруднюючі складові шахтних вод. Розроблено систему екологічного моніторингу параметрів шахтних вод і запропонована її структура, заснована на модульному принципі побудови, що включає в себе ряд взаємопов'язаних модулів: модуль оцінки параметрів шахтних вод, модуль збору, обробки та зберігання даних, модуль «прийняття рішень». Показано, що запропонована система дозволяє організувати контроль якості питної води. Відзначено, що затоплення шахт та хімічні процеси, що відбуваються в підземному виробленому просторі, провокують викид збідненого киснем повітря, що представляє небезпеку для живих організмів. Обґрунтовано необхідність розробки нових приладів для контролю найбільш небезпечних параметрів шахтних вод і рудничної атмосфери.

**Ключові слова:** моніторинг стану, обробка даних, аналіз даних, база даних.

УДК 681.586.773

**Реперний алгоритм для ультразвукового рівнеміра з кільцевим рухом електричного сигналу / К. А. Літвінов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 97–105. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN2079-4525.**

Досліджується принцип формування реперного сигналу в ультразвукових рівнемірах з кільцевим рухом електричного сигналу. Показано, що відношення тривалості руху УЗС в прямому та зворотному напрямку не залежить від рівня рідини в ємності та може бути використано як реперний сигнал. Так як зворотний УЗС проходить подвійну відстань в газовому середовищі, то його зміна за рахунок відхилення впливових факторів є більшою, ніж для УЗК прямого руху, що можна використати для уведення поправки в результат вимірювального контролю рівнеміра.

**Ключові слова:** рівень, рідина, вимірювання, перетворення, ультразвук, реперний сигнал, імпульс, випромінювач, середовище.

УДК 681.586.773

**Математичні моделі діагностики здоров'я людини за станом масообмінних процесів / Й. І. Стенцель, О. І. Проказа // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 105–119. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN2079-4525.**

Досліджуються біохімічні процеси (БХП) в шлунку людини на основі теорії реологічних незворотних фазових перетворень. Показано, що в шлунку проходять масо- тепло- та енергообмінні процеси, котрі супроводжуються біохімічними реакціями. Запропонована фізична модель реологічного переходу, при котрому шлунок являє собою зону реологічного перетворення (ЗРП) зі стоком маси та енергії. У ЗРП проходять БХП з відповідною швидкістю та їх розподіленням за координатами й часом. Співвідношення сталих часу динамічних процесів в ЗРП та швидкості стоку маси та енергії є одним з основних показників для діагностування стану здоров'я людини.

**Ключові слова:** людина, процес, метод, масообмін, енергообмін, реологія, перетворення, рівняння, теплота, концентрація.

УДК 620.179.16

**Акустический неразрушающий контроль многокомпонентного сплава на основе ниобия / Ю. Г. Безьямный, Е. А. Козирацкий, Н. П. Бродниковский, О. В. Талько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 119–126. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-4525.**

Для відпрацювання технології створення нового багатокомпонентного жароміцного сплаву на основі ніобію за результатами акустичного неруйнівного контролю проведено моделювання матеріалу у відповідності до трьох задач дослідження: визначення характеристик пружності, пористості та лікваций. За результатами моделювання проведена адаптація акустичних методів контролю та оптимізація їх параметрів для ефективного рішення кожної задачі. Адаптовані методи використані для експериментального визначення вказаних характеристик матеріалу.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, акустичні методи, сплав на основі ніобію, ліквация, пори, характеристики пружності

УДК 004.052.2

**Комплексная оценка состояния канала связи и обобщенного критерия живучести / Л. В. Головкина, А. С. Борисенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 127–139–Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-4525.**

Запропоновано визначення узагальненого критерію живучості в бездротовій сенсорній ZigBee мережі з комірчастою топологією при руйнуючих діях і урахуванням стану реального каналу зв'язку, умовної надійності вузлів. Завдання визначення живучості мережі зведено до завдання зв'язності графа. Зміни структури мережі в результаті руйнуючих дій ураховані у вигляді зміни моделі графа. Зроблені висновки про методи маршрутизації, які використовуються в оцінці стану каналу зв'язку в мережі.

**Ключові слова:** узагальнений критерій живучості, вірогідність стану каналу зв'язку, умовна надійність вузлів, граф, руйнуючі дії.

. УДК 621.331

**Просторово-часова модель системи тягового електропостачання / Д. О. Босий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 139-151 . – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-4525.**

Розглянуто питання виконання розрахунків систем тягового електропостачання в якості складної системи, в якій вимагається враховувати багато різноманітних факторів. Запропоновано методику просторово-часового розрахунку систем тягового електропостачання, яка представляє собою аналітичне описання основних електричних процесів кусочно-заданими функціями двох змінних. Запропоновану методику можна використати до оптимізаційних розрахунків та визначення керуючого впливу при посиленні систем тягового електропостачання або застосуванні підходів керованого електропостачання.

**Ключові слова:** електрична тяга, система електропостачання, розрахунок, модель, простір, час, графік руху, схема живлення, контактна мережа.

## РЕФЕРАТЫ

УДК 616.07 (075.8)

**Диагностика заболеваний человека по характеру изменения термодинамических процессов / И. И. Стенцель, Е. И. Проказа, А. В. Рябиченко, Л. И. Петросян // Вестник НТУ «ХПИ».** Серия: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – № 9 (1128). – С. 3–15. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-4525.

Исследуются термодинамические процессы в биологическом организме при заболеваниях, которые сопровождаются экзотермическими или эндотермическими изменениями тепловой энергии. Показано, что такие процессы можно описать на основании теории реологических преобразований тепловой энергии. Приведена обобщающая нелинейная математическая модель термодинамических процессов в организме человека, а также начальные и граничные условия, при которых можно получить аналитическое решение для распределения температурного поля. В результате теоретических и экспериментальных исследований показано, что характер изменения температурного поля зависит от возрастного состояния человека.

**Ключевые слова:** температура, человек, процесс, метод, болезнь, организм, реология, уравнение, энергия.

УДК 620.179.14

**Расширение функциональных возможностей электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями / Б. М. Горкунов, Н. Н. Сиренко, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Вісник НТУ «ХП».** Серия: Электроэнергетика и преобразовательная техника – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 15–20. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-4525.

В работе рассмотрены вопросы теории электромагнитных преобразователей для многопараметровых измерений с полями, которые имеют пространственно-периодическую структуру. Показано, как с помощью зависимостей амплитудных пространственных гармоник можно расположить секции измерительных обмоток с тем, чтобы выделить из сигнала преобразователя необходимые гармоники. Приведены графики зависимостей нормированных амплитуд и фаз. Описан алгоритм определения электромагнитных и геометрических параметров цилиндрических изделий. Сделан вывод о том, что электромагнитные преобразователи позволяют осуществлять многопараметровый контроль за счет использования определенного числа отдельных пространственных гармоник зондирующего поля

**Ключевые слова:** электромагнитный преобразователь, пространственно-периодическое поле, многопараметровые измерения, электромагнитные параметры.

УДК 620.179.14

**Однопараметровый неразрушающий контроль параметров немагнитных цилиндрических изделий / Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, Н. Н. Сиренко, Н. В. Костюченко // Вісник НТУ «ХП».** Серия: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 20–29. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-4525.

В работе рассмотрена теория работы вихретокового преобразователя с исследуемым немагнитным цилиндрическим образцом. Получены функции преобразования, связывающие электрические и геометрические параметры исследуемого изделия с выходными сигналами преобразователя, что позволило существенно расширить пределы применения вихретокового преобразователя. Предложен метод однопараметрового контроля удельного электрического сопротивления при известных геометрических размерах обра-

зца и метод определения диаметра образца при известном удельном электрическом сопротивлении.

**Ключевые слова:** вихретоковый преобразователь, удельное электрическое сопротивление, функция преобразования, амплитуда, фаза, магнитный поток.

УДК 620.179.16

**Развитие теории и практики создания емкостных преобразователей для ультразвукового контроля металлоизделий (обзор)/ Е. Л. Ноздрачева// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 9 (1128). – С. 29-54 . – Бібліогр.: 57 назв. – ISSN 2079-4525**

В работе проанализированы способы и средства ультразвукового неразрушающего контроля емкостным бесконтактным методом. Описаны преимущества, недостатки, возможности и условия применения емкостного метода ультразвукового контроля. Установлена перспективность применения емкостного метода, описан принцип работы. Рассмотрены емкостные преобразователи и направления их применения, исследования их возможностей по сравнению с другими.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, емкостной преобразователь, электрод, электрическое поле, объект контроля, бесконтактный.

УДК 620.179.14

**Определение оптимальных параметров контроля сотовых панелей тепловым методом/ А. Г. Протасов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика і преобразовательна техніка. - X. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С.54 –60 Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-4525.**

В работе предлагается использовать метод компьютерного моделирования для исследования возможностей теплового неразрушающего контроля для диагностики состояния сотовых панелей. Для моделирования был использован пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics. Исследования проводились на трехмерной модели сотовой панели. В результате проведенных исследований были определены оптимальные параметры контроля, позволяющие обнаруживать дефекты типа отслоение обшивки от заполнителя и наличие воды в заполнителе.

**Ключевые слова:** сотовая панель, компьютерное моделирование, трехмерная модель.

УДК 621.314

**Экспериментальные исследования электрических характеристик ОПН / С. Ю Шевченко. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика і преобразовательна техніка . – X. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 60–67. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-4525.**

Целью данной работы является экспериментальное определение электрофизических параметров ОПН при различных частотах действующего напряжения, что позволит дополнить анализ режима их работы в сетях с низким качеством электрической энергии. Выполненные экспериментальные исследования электрофизических свойств ОПН при различных частотах действующего напряжения. Полученные результаты измерений электрофизических свойств ОПН позволяют определять параметры их схем замещения при выполнении расчетов режимов работы электрических сетей при наличии гармонических составляющих напряжения. Проведенный анализ результатов экспериментов позволил определить усредненные значения электрофизических параметров ОПН, что существенно упрощает расчеты параметров схем замещения необходимые для анализа работы ОПН в зоне токов утечки вольтамперных характеристик при анализе воздействия на них высших гармонических составляющих напряжения.

**Ключевые слова:** ограничитель перенапряжений, схемы замещения ОПН, электрофизические свойства ОПН, диэлектрические потери, емкость, диэлектрическая проницаемость, варисторная керамика.

УДК 681.2:623.454.836

**Определение направления и слоя захоронения точечных источников гамма-излучения с использованием гамма-спектрометрии / А. Н. Григорьев, З. В. Бильк, Ю. В. Литвинов, Н. Е. Полянский, А. В. Сақун, В. В. Марушенко, О. Ю. Чернявский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015 - № 19 (1128). – С. 67-73. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN2079-4525.**

Экспериментально исследовано изменение энергии источника гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  при прохождении гамма-излучения через поглотитель. Обнаружено уменьшение энергии гамма-излучения источника  $^{137}\text{Cs}$  при прохождении пучка гамма-излучения через поглотитель из свинца толщиной 22 мм, 28 мм, 35 мм та 43 мм. Уменьшение энергии гамма-излучения наблюдали с использованием спектрометрии гамма-излучения теллурид кадмиевым детектором размером  $5 \times 5 \times 2$  мм. Полученные результаты позволяют утверждать, что представляется возможным определять местоположение радионуклидов захороненных под поверхностью грунта на глубине несколько метров. Глубину захоронения определяли по уменьшению количества гамма-квантов в пике полного поглощения при использовании радионуклида цезий-137 активностью  $2,064 \times 10^9$  Бк расположенного на расстоянии трех метров от блока детектирования.

**Ключевые слова:** гамма-излучение, кадмий теллур, захоронение, гамма-источник.

УДК 621.311

**Анализ нормативной базы по проектированию и построению системы «SMART GRID», которая базируется на цифровых подстанциях / О. Г. Гриб, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, А. В. Лелека, М. С. Белов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 74-78. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN2079-4525.**

Проведен анализ новых международных стандартов для построения и проектирования цифровых подстанций, которая является основным сегментом в системе «SMART GRID». Система базируется на цифровой обработке информации, что позволяет использовать новейшие информационные технологии при проектировании и эксплуатации энергетических систем. При работе электрооборудования используется общеинформационная модель, которая построена по единой методологии, что позволяет ее использовать от подстанции до диспетчерского центра в энергосистеме.

**Ключевые слова:** электроэнергия, цифровая подстанция, диспетчеризация, информация, модель.

УДК 543.421:621.38

**Подсистема контроля границ взрываемости рудничной атмосферы для системы аэрогазовой защиты угольных шахт/ А. В. Вовна, А. А. Зори // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 79-88. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.**

Получила дальнейшее развитие математическая модель определения нижней границы взрывчатости системы «метан – угольная пыль – воздух» на основе результатов исследований взрывоопасности пылегазовой смеси. Модель учитывает изменение содержания влаги в воздухе, выход летучих и зольность угля, что позволяет предотвращать приближение рабочей точки системы аэрогазового контроля к критическим границам взрывчатости. Разработанные и исследованные экспериментальные образцы измерителей

концентрации метана и пыли, которые входят в состав системы аэрогазовой защиты угольных шахт.

**Ключевые слова:** подсистема, контроль, метан, угольная пыль, влажность, взрывчатость, рудничная атмосфера.

УДК504.064.36

**Принципы построения системы экологического мониторинга параметров шахтных вод / И.А. Шведчикова, И.В. Никитченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С.89-96. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-4525.

Определены основные загрязняющие составляющие шахтных вод. Разработана система экологического мониторинга параметров шахтных вод и предложена ее структура, основанная на модульном принципе построения, включающая в себя ряд взаимосвязанных модулей: модуль оценки параметров шахтных вод, модуль сбора, обработки и хранения данных, модуль «принятия решений». Показано, что предложенная система позволяет организовать контроль качества питьевой воды. Отмечено, что затопление шахт и химические процессы, происходящие в подземном выработанном пространстве, провоцируют выброс обедненного кислородом воздуха, представляющего опасность для живых организмов. Обоснована необходимость разработки новых приборов для контроля наиболее опасных параметров шахтных вод и рудничной атмосферы.

**Ключевые слова:** мониторинг состояния, обработка данных, анализ данных, база данных.

УДК 681.586.773

**Реперный алгоритм для ультразвукового уровнемера с круговым движением электрического сигнала / К. А. Литвинов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: : Електроенергетика та перетворювальна техніка.. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 97–105. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-4525.

Исследуется принцип формирования реперного сигнала в ультразвуковом уровнемере с круговым движением электрического сигнала. Показано, что отношение длительности движения ультразвукового импульса (УЗИ) в прямом и обратном направлении не зависит от уровня жидкости в емкости и может быть использовано как реперный сигнал. Так как обратный УЗИ проходит двойное расстояние в газовой среде, то его изменение за счет отклонения влияющих факторов есть большей, чем для УЗИ прямого направления движения, что можно использовать для формирования поправки в результат измерительного контроля уровнемера.

**Ключевые слова:** уровень, жидкость, измерение, преобразование, ультразвук, реперный сигнал, импульс, излучатель, среда.

УДК 681.586.773

**Математические модели диагностики здоровья человека по состоянию массообменных процессов / И. И. Стенцель, Е. И. Проказа** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: : Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 105–119. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-4525.

Исследуются биохимические процессы (БХП) в желудке человека на основе теории реологических необратимых фазовых преобразований. Показано, что в желудке проходят массо- тепло- и энергообменные процессы, которые сопровождаются биохимическими реакциями. Предложена физическая модель реологического перехода, при котором желудок представляет собой зону реологического преобразования (ЗРП) со стоком массы и энергии. В ЗРП проходят БХП с соответствующей скоростью и их распределением по координатам и времени. Соотношение постоянных времени динамических про-



цессов в ЗРП и скорости стока массы и энергии является одним с основных показателей для диагностирования состояния здоровья человека

**Ключевые слова:** человек, процесс, метод, массообмен, энергообмен, реология, преобразование, уравнение, теплота, концентрация.

УДК 620.179.16

**Акустический неразрушающий контроль многокомпонентного сплава на основе ниобия / Ю. Г. Безмянный, Е. А. Козирацкий, Н. П. Бродниковский, О. В. Талько // Вісник НТУ «ХП». Серія: : Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 19 (1128). – С. 119–126. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-4525.**

Для отработки технологии создания нового многокомпонентного жаропрочного сплава на основе ниобия по результатам акустического неразрушающего контроля проведено моделирование материала в соответствии с тремя задачами исследования: определение характеристик упругости, пористости и ликваций. По результатам моделирования проведена адаптация акустических методов контроля и оптимизация их параметров для эффективного решения каждой задачи. Адаптированные методы использованы для экспериментального определения указанных характеристик материала.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, акустические методы, сплав на основе ниобия, ликвации, поры, характеристики упругости.

УДК 004.052.2

**Комплексная оценка состояния канала связи и обобщенного критерия живучести / Л. В. Головкина, А. С. Борисенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: : Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 19(1128). – С. 127–139. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-4525.**

Предложено определение обобщенного критерия живучести в беспроводной сенсорной ZigBee сети с ячеистой топологией при разрушающих действиях и учетом состояния реального канала связи, условной надежности узлов. Задача определения живучести сети сведена к задаче связности графа. Изменения структуры сети в результате разрушающих действий учтены в виде изменения графовой модели. Сделаны выводы о методах маршрутизации, которые используются в оценке состояния канала связи в сети

**Ключевые слова:** обобщенный критерий живучести, вероятность состояния канала связи, условная надежность узлов, граф, разрушающие действия.

УДК 621.331

**Пространственно-временная модель системы тягового электроснабжения / Д. А. Босый // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 9 (1128). – С. 139-151. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-4525.**

Рассмотрен вопрос выполнения расчетов систем тягового электроснабжения в качестве сложной системы, в которой требуется учитывать много разнообразных факторов. Предложена методика пространственно-временного расчета систем тягового электроснабжения, которая представляет собой аналитическое описание основных электрических процессов кусочно-заданными функциями двух переменных. Предложенная методика может использоваться для оптимизационных расчетов и определения управляющего воздействия при усилении систем тягового электроснабжения или применении подходов управляемого электроснабжения.

**Ключевые слова:** электрическая тяга, система электроснабжения, расчет, модель, пространство, время, график движения, схема питания, контактная сеть.

## ABSTRACTS

**The diagnostics of diseases of person on character of changes of thermodynamic processes / J. I. Stencil, E. I. Prokaza, A. V. Pyabichenko, L. I. Petrosyan //** Bulletin of NTU "KhPI". Series.: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – С. 3–15. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-4525.

Are investigated thermodynamic processes in a biological organism in diseases which are accompanied by exothermic or endothermic change of thermal energy. It is shown that such processes can be described by the theory of rheological conversion of thermal energy. The summarizing non-linear mathematical model of thermodynamic processes in the person body is shown as well as initial and boundary conditions under which it is possible to obtain an analytical solution for the distribution of the temperature field. As a result of theoretical and experimental researches have shown that the nature of the temperature field depends on the age of the person condition.

**Keywords:** temperature, person, process, method, disease, organism, rheology, equation energy.

**Enhancing the functionality of the electromagnetic converters with a spatially periodic field/ B. M Gorkunov, N. N. Sirenko, I. V. Typa, A. A. Tyshchenko//** Bulletin of NTU "KhPI". Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika.. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – P. 15–20. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-4525.

In this paper, the questions of the theory of electromagnetic converters for multiparameter measurements with fields that are spatially periodic structure are considered. It is shown how by means of the amplitude dependence of the spatial harmonics can be positioned section measuring windings in order to select the required transmitter signal from the harmonics. Plots of the normalized amplitudes and phases are shown. The algorithm for determining the electromagnetic and geometrical parameters of cylindrical products is given. The conclusion that electromagnetic converters allow to exercise multiparameter control due to use of a certain number of separate spatial harmonics of the probing field is made.

**Keywords:** electromagnetic converter, spatially periodic field, multiparameter measuring electromagnetic parameters.

**One-parameter non-destructive testing parameters nonmagnetic cylindrical products / B. M. Gorkunov, S. G. Lvov, N. N. Sirenko, N. V. Kostjuchenko/** Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika.. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – P. 20–29. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-4525.

The paper the theory of operation of eddy current converter to the study nonmagnetic cylindrical samples is considered. The functions of transformation connecting electrical and geometrical parameters of the test product with the outputs of the converter, which will significantly expand the scope of application of eddy current transducer, are obtained. Method of one-parameter control electrical resistivity under certain geometrical dimensions of the sample and the method of determining the diameter of the sample with a known electrical resistivity is offered. Block diagram of the converter and graphic according to the obtained transformation functions that can be used for one-parameter control nonmagnetic cylindrical samples are given.

**Keywords:** eddy current converter, electrical resistivity, the conversion function, amplitude, phase, magnetic flux.

**Development of the theory and practice of creation capacitive transducer for ultrasonic testing of metal products (Review) / E. L. Nozdrachova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. - Kharkiv : NTU "KhPI" 2015. - № 19 (1128). - P.29-54. - Bibliogr. : 57 titles. - ISSN 2079-4525.**

From the analysis of these data we can conclude that the advantage of the capacitive method is not only a non-contact, that is, ultrasonic vibrations occur in the surface layer of the product, it does not require the prior cleaning. As well as simplicity of implementation and exploitation not requiring the use of high current and high magnetic fields compared to the electromagnetic acoustic method.

This article analyzes the methods and means ultrasonic nondestructive testing non-contact capacitive method. The advantages, disadvantages, opportunities and conditions for the use of capacitive ultrasonic testing. Installed application prospects capacitive method described principle. Capacitive transducers are considered and directions of their application, their research capabilities than others is described.

**Keywords:** nondestructive testing, ultrasonic method, a capacitive transducer, the electrode, the electric field, the object of control, non-contact.

**Determination of the optimal parameters for honeycomb panels testing by thermal method/ A. G. Protasov. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. - Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. - № 9 (1128). - P. 54-60.... - Bibliogr.:6. - ISSN 2079-4525.**

In this article is proposed to use computing simulation method for research of the thermal nondestructive testing resources for providing condition diagnostics of honeycomb panels which used in aircraft industry. The application package COMSOL Multiphysics was used for such simulation. This software allows simulating technical problems which based on solving differential equations in partial derivatives. The three-dimensional model of a honeycomb panel realized for researches. As a result of the accomplished researches were determined optimal parameters of testing which allow finding defects like detachment of the covering from a filler and water presence in the filler.

**Keywords:** honeycomb panel, computing simulation, three-dimensional model.

**Experimental studies of the electrical characteristics of the arrester / S. Yu Shevchenko. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika.. - Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. - № 19 (1128). - P. 60-67. - Bibliogr.: 14. - ISSN 2079-4525.**

The aim of this work is the experimental determination of electrophysical parameters of surge arrester at different frequencies of the current voltage, which will carry out the analysis of their work in networks with low quality electric energy. Performed experimental investigations electrophysical properties of the surge arrester at different frequencies effective stress. The measured electrophysical properties of the surge arrester allow you to define the parameters of equivalent circuits in the performance of the operating conditions of electric networks in the presence of harmonic voltage components. The analysis of experimental results allowed us to determine the average values of electrophysical parameters of the surge arrester, which greatly simplifies the calculations of the parameters of equivalent circuits necessary for the analysis of acute renal failure in the area of leakage currents voltage ampere characteristics in the analysis of their exposure to the higher harmonic voltage components.

**Keywords:** surge arrester, the equivalent circuit arrester electrical properties of the arrester, dielectric loss, capacitance, dielectric constant, and varistor keramika.

**Determining the direction and the layer the of burial of point sources of gamma radiation using gamma-spectrometry / A. N. Grigoryev, Z. V. Bilyk, Yu. V. Litvinov, N. E. Poljanskij, A. V. Sakun, V. V. Marushchenko, O. Yu. Chernyavsky // Bulletin of NTU**

"KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – P. 67-73. – Bibliogr.: 3. – ISSN2079-4525.

Experimentally was investigated the change in energy the gamma-ray source  $^{137}\text{Cs}$  passing through the absorber. Was discovered a decrease in the energy of the gamma radiation source  $^{137}\text{Cs}$ , when the beam of gamma rays was passing through an absorber of lead 22 mm, 28 mm, 35 mm, 43 mm. Reducing energy gamma radiation was observed using gamma spectrometry cadmium telluride detector  $5 \times 5 \times 2$  mm. The results suggest that it is possible to determine the location of radionuclides buried beneath the surface of the soil at a depth of several meters. The depth of the burial was determined according to the reduced the number of gamma rays in the peak of total absorption using radionuclide cesium-137 activity  $2,064 \times 10^9$  Bq at the distance of three meters from the detection unit.

**Keywords:** gamma radiation, cadmium tellurium, burial, gamma source.

**Analysis of the regulatory framework for the design and construction of a system of "SMART GRID", which is based on digital substations / O.G. Gryb, D.A. Gapon, T.S. Ierusalimova, A.V. Leleka, N.S. Belov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika.. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – P. 74-78. – Bibliogr.: 11. – ISSN2079-4525.**

The analysis of new international standards for the construction and design of digital substations, which is the main segment in the "SMART GRID" in given. The system is based on digital information processing, which allows the use of advanced information technologies in the design and operation of energy systems. Common information model is used in electrical equipment, which is built on a unified methodology that allows its use from the substation to the control center of the power system.

**Keywords:** electricity, digital substation, dispatching, information, model.

**The boundaries explosion miner atmosphere monitoring subsystem for the air-gas protection in the coal mines/ A. V. Vovna, A. A. Zori // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – P.79–88. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-4525.**

The mathematical model for the lower limit of the "methane – coal – dust – air" explosiveness determining has been further developed, which is based on the dust-gas mixture explosive research results. The model takes into account changes of the moisture content on air, volatile and ash content. This can prevent the approach of the system operating point of the air-gas monitoring to the explosiveness critical limits. Experimental samples of the methane and dust concentration meters had been designed and studied, which are parts of the air and gas protection in the coal mines.

**Keywords:** subsystem, control, methane, coal dust, humidity, explosiveness, mine atmosphere.

**Construction principles of ecological monitoring system of mine water parameters / I.A. Shvedchikova, I.V. Nikitchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – P.89-96. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-4525.**

In the article the principles of environmental monitoring system of parameters mine waters of coal mines affected by armed conflict are proposed. The structure of the system is developed. It collection, processing and storage modules and "decision-making" module. The module of collecting and processing data system is adopted as a central module. It receives information from four other modules: the testing of organic substances, control of bacterial contamination, mineral contamination control, control of "dead air". These modules are the

basic in the system. If necessary, it is possible to add or remove modules depending on the goals and objectives. It is shown that the proposed system allows to organize monitoring of drinking water quality. It is noted that the flooding of the mines and chemical processes occurring in the underground mined-out space are provoking the release of oxygen-depleted air. It is a danger to living organisms. The necessity of development of new devices for the parameters control of the most dangerous mine waters and mine atmosphere is proved.

**Keywords:** condition monitoring, data processing, data analysis, database

**The reference algorithm for ultrasonic level transmitter with a circular motion of an electrical signal / K. A. Litvinov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – С. 97–105. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-4525.

Investigated principle of formation of the reference signal in ultrasonic level the circular traffic movement electrical signal. It is shown that the length of the movement of the ultrasonic pulse (ultrasound) in forward and backward direction does not depend on the level of the liquid in the tank and can be used as a reference signal. Since the return ultrasound passes twice the distance in a gaseous medium, it changes due to deviations influencing factors have more than ultrasound forward direction of movement, which can be used to generate a result of amendments to the control of the measuring gauge.

**Keywords:** level, liquid, measurement, transformation, ultrasound, reference signal, the pulse emitter, environment.

**The mathematical models of diagnostics of health of the person as mass interchange processes / J. I. Stencil, E. I. Prokaza** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – С. 105–119. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2079-4525.

Are investigated biochemical processes (BHP) in the human stomach, based on rheological theory of irreversible phase transformations. It is shown that in the stomach pass mass interchange, thermal interchange and energy interchange processes that are accompanied by biochemical reactions. The physical model of the rheological transition is propose, in which the stomach is the zone of rheological transforms laid (ZRT) with the drain of mass and energy. BHP passes in the ZRT with their appropriate distribution on the coordinates and time. The ratio of the time constants of the dynamic processes in the ZRP and the rate of flow of mass and energy is one of the main indicators for diagnosis of the state of health of the person.

**Keywords:** person, process, method, mass interchange, energy interchange, rheology, conversion, equation, heat, concentration.

**The acoustical nondestructive testing of a multicomponent alloy based on niobium / Y. G. Bezimyannyi, E. A. Kozyratskyi, N. P. Brodnykovskiy, O. V. Tal'ko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – P. 119–129 – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-4525.

Testing of manufacturing techniques and measurement of the elastic properties of the multicomponent heat-resistant alloy based on niobium were performed using acoustic measurements. To determine the characteristics of elasticity, porosity and segregation was used their model representation of the structure of the alloy. Adaptation of acoustic measurement techniques and optimization of their parameters were performed as a result of simulation to effectively address each problem. Adapted methods were used for the experimental determination of these material characteristics.

**Keywords:** nondestructive testing, acoustic methods, alloy based on niobium, liquations, pores, characteristics of elasticity.

**Complex estimation of the state of communication channel and generalized criterion of vitality** / L. V. Golovkina, A. S. Borisenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika.. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 19 (1128). – P. 127–139. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-4525.

Determination of the generalized criterion of vitality is offered in the wireless sensory ZigBee network with mesh topology at destroying actions and account of the state of the real communication channel, conditional reliability of knots. The task of determination of vitality of network is taken to the task of connections of graph. Changes of network structure as a result of destroying actions take into account as the change of graph model. Importance of routing data is confirmed in estimation of quality of communication channel both in the case of destruction of 3 and 6 ribs on the basis of calculations and measurings conducted with the real modules of XBee-PRO. The conclusions about methods routing which are used in estimation of the state of communication channel in a network.

**Keywords:** generalized criterion of vitality, probability of the state of communication channel, conditional reliability of knots, graph, destroying actions.

**Space-time model of a traction power supply system** / D. O. Bosiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. - Kharkiv : NTU "KhPI" 2015 . - № 19 (1128). - P.139-151 . - Bibliogr. : 7 titles . - ISSN 2079-4525.

Evaluation of traction power supply system as a complex system in which needs to be taken into account many different factors is very difficult process. Receiving the results in a space-time coordinates are the most generalizing. Without space-time results can not be performed optimization calculations for traction power supply system. Methodic of evaluation the space-time systems of traction power supply lies in analytical description of the main electrical processes by piecewise functions of two variables. As the example of solving the problem of stabilizing the voltage at the pantograph for distributed power supply system the developed model is used. The results of evaluation are used as a control law of the reinforcing points. Comparison of energy losses in the considered cases of voltage stabilization indicates the savings of electricity of up to 30 %.

**Keywords:** electric traction, power supply system, evaluation, model, space, time, train schedule, power scheme, contact network.

## ЗМІСТ

<b>Стенцель Й. І., Проказа О. І., Рябіченко А. В., Петросян Л.І.</b> Діагностика захворювання людини за характером зміни термодинамічних процесів.....	3
<b>Горкунов Б. М., Сиренко Н. Н., Тюпа И. В., Тищенко А. А.</b> Расширение функциональных возможностей электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями.....	15
<b>Горкунов Б. М., Львов С. Г., Сиренко Н. Н., Костюченко Н. В.</b> Однопараметровый неразрушающий контроль параметров немагнитных цилиндрических изделий.....	20
<b>Ноздрачёва Е. Л.</b> Развитие теории и практики создания емкостных преобразователей для ультразвукового контроля металлоизделий (обзор).....	29
<b>Протасов А. Г.</b> Определение оптимальных параметров контроля сотовых панелей тепловым методом.....	54
<b>Шевченко С. Ю.</b> Експериментальні дослідження електричних характеристик ОПН.....	60
<b>Григор'єв О. М., Білик З. В., Литвинов Ю. В., Полянський М. Є., Марущенко В. В., Чернявський О. Ю.</b> Визначення напрямку та шару захоплення точкових джерел гамма-випромінювання з використанням гамма-спектрометрії.....	67
<b>Гриб О. Г., Гапон Д. А., Ієрусалімова Т. С., Белов М. С., Лелека О. В.</b> Аналіз нормативної бази по проектуванню побудові системи «SMARTGRID» яка базується на цифрових підстанціях.....	74
<b>Вовна О. В., Зорі А. А.</b> Підсистема контролю меж вибуховості рудничної атмосфери для системи аерогазового захисту вугільних шахт.....	79
<b>Шведчикова И. А., Никитченко И. В.</b> Принципы построение системы экологического мониторинга параметров шахтных вод.....	89
<b>Литвинов К.А.</b> Креперный Алгоритм для ультразвукового рівнеміра з кільцевим рухом електричного сигналу.....	97

<b>Стенцель Й. І., Проказа О. І.</b> Математичні моделі діагностики здоров'я людини за станом масообмінних процесів .....	105
<b>Безьянный Ю. Г., Козирацкий Е. А., Бродниковский Н. П., Талько О. В.</b> Акустический неразрушающий контроль многокомпонентного сплава на основе ниобия .....	119
<b>Головкина Л. В., Борисенко А. С.</b> Комплексная оценка состояния канала связи и обобщенного критерия живучести .....	127
<b>Босий Д. О</b> Просторowo-часова модель системи тягового електропостачання .....	139
<b>Реферати</b> .....	152
<b>Рефераты</b> .....	157
<b>Abstracts</b> .....	162



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ»**

**Збірник наукових праць**

Серія:

Електроенергетика та перетворювальна техніка

№19 (1128)2015

Науковий редактор, д-р техн. наук, проф. Г.М. Сучков  
Технічний редактор інж. І. Г. Хорошайло

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І. Б. Обухова

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».  
Кафедра приладів і методів неруйнівного контролю  
Тел.: (057) 707-63-08, (057) 707-69-27; e-mail: vestnik-hpi@mail.ru

Обл.-вид. №16-13

Підп. до друку 00.06.2014р. Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Друк. офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид.  
арк. 10.

Тираж 300 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК №3657 від 24.12.2009  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21