

УДК 622.4:622.817.4

## ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СМАРТ-ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ

БУНЬКО Т. В.<sup>1\*</sup>, *д.т.н., ст. наук. співр.*,  
ШИШОВ М. В.<sup>2</sup>, *магістр*,  
МІРОШНИЧЕНКО В. В.<sup>3</sup>, *магістр*,  
КОКОУЛІН І. Є.<sup>4</sup>, *к.т.н., ст. наук. співр.*

<sup>1\*</sup> Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (067) 142-54-55, e-mail: bunko2017@ukr.net.

<sup>2</sup> Департамент з технічного розвитку Дирекції з видобутку вугілля ДПЕК ЕНЕРГО, вул. Льва Толстого, 57, м. Київ, Україна, 01032.

<sup>3</sup> Відділ з вентиляції та дегазації, Департамент з технічного розвитку Дирекції з видобутку вугілля ДПЕК ЕНЕРГО, вул. Льва Толстого, 57, м. Київ, Україна, 01032, тел. +38 (044) 290-15-37, e-mail: miroshnichenkovvl@dtek.com.

<sup>4</sup> Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (067) 388-79-75.

**Анотація. Мета.** Обґрунтування створення і використання інформаційно-вимірювальної СМАРТ-технології моніторингу шахтної вентиляційної системи на основі комплексування базису стаціонарних і переносних приладів визначення аерогазодинамічних параметрів гірничих виробок і вентиляційних споруд та розробка методу структурно-параметричної ідентифікації вентиляційних систем в умовах невизначеності вхідної інформації. **Методи.** При виконанні досліджень проводився аналітичний огляд СМАРТ-методів постановки і досягнення цілей моніторингу шахтних вентиляційних систем, проаналізовано стан вентиляції, контролю аерогазодинамічних параметрів шахт ДПЕК, наявної бази стаціонарних і переносних приладів їх виміру, а також стан системи противарійної безпеки шахт. **Результати.** Охарактеризовано три етапи моніторингу аерогазодинамічних параметрів і сформульовано основні підходи з використанням СМАРТ-критеріїв до постановки і розв'язання задачі комплексування стаціонарних та переносних приладів виміру аерогазодинамічних параметрів з метою зниження ступеню невизначеності інформації, необхідної для проведення вентиляційних розрахунків. З метою комплексного вирішення задач моніторингу і розрахунку аерогазодинамічних параметрів ШВМ було адаптовано метод структурно-параметричної ідентифікації елементів вентиляційної мережі за умови отримання недостатньо визначеної вхідної інформації. **Наукова новизна.** Вперше розроблено метод моніторингу аерогазодинамічних параметрів шахтної вентиляційної мережі шляхом комплексування вимірів різними типами приладів і обґрунтовано підвищення точності структурно-параметричної ідентифікації вентиляційної мережі з урахуванням результатів моніторингу. **Практична значимість.** Отримані результати дозволять підвищити адекватність математичної моделі вентиляційної системи її реальному аналогу, ефективність її аерогазодинамічного моніторингу, точність вирішення вентиляційних задач отримати соціальний ефект за рахунок підвищення безпеки праці гірників.

**Ключові слова:** СМАРТ-технологія; моніторинг; аерогазодинамічні параметри; стаціонарні і переносні прилади; структурно-параметрична ідентифікація

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СМАРТ-ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ

БУНЬКО Т. В.<sup>1\*</sup>, *д.т.н., ст. научн. сотр.*,  
ШИШОВ М. В.<sup>2</sup>, *магістр*,  
МІРОШНИЧЕНКО В. В.<sup>3</sup>, *магістр*,  
КОКОУЛІН І. Є.<sup>4</sup>; *к.т.н., ст. научн. сотр.*

<sup>1\*</sup> Отдел проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, Украина, 49005, тел. +38 (067) 388-79-75, e-mail: bunko2017@ukr.net

<sup>2</sup> Департамент по техническому развитию Дирекции по добыче угля ДТЭК ЭНЕРГО, ул. Льва Толстого, 57, г. Киев, Украина, 01032

<sup>3</sup> Отдел по вентиляции и дегазации, Департамент по техническому развитию Дирекции по добыче угля ДТЭК ЭНЕРГО, ул. Льва Толстого, 57, г. Киев, Украина, 01032, тел. +38 (044) 290-15-37, e-mail: miroshnichenkovvl@dtek.com

<sup>4</sup> Отдел проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, Украина, 49005, тел. +38 (067) 388-79-75

**Аннотация. Цель.** Обоснование создания и использование информационно-измерительной СМАРТ-технологии мониторинга шахтной вентиляционной системы на основе комплексирования базиса стационарных и переносных приборов определения аерогазодинамических параметров горных выработок и вентиляционных сооружений и разработка метода структурно-параметрической идентификации вентиляционных систем в условиях неопределенности исходной информации. **Методы.** При

выполнении исследований проводился аналитический обзор SMART-методов постановки и достижения целей мониторинга шахтных вентиляционных систем, проанализировано состояние вентиляции, контроля аэрогазодинамических параметров шахт ДТЭК, имеющейся базы стационарных и переносных приборов их измерения, а также состояние системы противоаварийной защиты шахт. **Результаты.** Охарактеризованы три этапа мониторинга аэрогазодинамических параметров и сформулированы основные подходы с использованием SMART-критериев к постановке и решению задачи комплексирования стационарных и переносных приборов измерения аэрогазодинамических параметров с целью снижения степени неопределенности информации, необходимой для проведения вентиляционных расчетов. С целью комплексного решения задач мониторинга и расчета аэрогазодинамических параметров ШВС был адаптирован метод структурно-параметрической идентификации элементов вентиляционной сети при условии получения недостаточно определенной входной информации. **Научная новизна.** Впервые разработан метод мониторинга аэрогазодинамических параметров шахтной вентиляционной сети путем комплексирования измерений разными типами приборов и обосновано повышение точности структурно-параметрической идентификации вентиляционной сети с учетом результатов мониторинга. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволят повысить адекватность математической модели вентиляционной системы ее реальному аналогу, эффективность ее аэрогазодинамического мониторинга, точность решения вентиляционных задач получить социальный эффект за счет повышения безопасности труда горняков.

**Ключевые слова:** SMART-технология; мониторинг; аэрогазодинамические параметры; стационарные и переносные приборы; структурно-параметрическая идентификация

## INFORMATIVELY-MEASURING SMART-TECHNOLOGIES OF MONITORING OF COMPLICATED ENGINEERING NETWORKS

BUNKO T. V.<sup>1\*</sup>, *D.Sc. (Tech.), Senior Researcher*,  
SHYSHOV M. V.<sup>2</sup>, *M.S. (Tech.)*,  
MYROSHNYCHENKO V. V.<sup>3</sup>, *M.S. (Tech.)*,  
KOKOULIN I. Ye.<sup>4</sup>, *Ph.D. (Tech.), Senior Researcher*

<sup>1\*</sup> Department of Problems of Mineral Mines at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolskaya str., 2a, Dnepr, Ukraine, 49005, phone +38 (067) 388-79-75, e-mail: bunko2017@ukr.net

<sup>2</sup> Technical development Department Coal production directorate DTEK Energy, Lva Tolstogo str., 57, Kiev, Ukraine, 01032

<sup>3</sup> Ventilation and Degassing group, Technical development Department Coal production directorate DTEK Energy, Lva Tolstogo str., 57, Kiev, Ukraine, 01032, phone +38 (044) 290-15-37, e-mail: miroshnichenkovvl@dtek.com

<sup>4</sup> Department of Problems of Mineral Mines at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolskaya str., 2a, Dnepr, Ukraine, 49005, phone +38 (067)

**Abstract.Purpose.** Ground of creation and use of informatively-measuring SMATT-technology of monitoring of the mine ventilation system on the basis of complexing base of stationary and portable devices determination of air-gas dynamic parameters of the mine workings and ventilation constructions and development method of structure-parametrical authentication of the ventilation systems in the conditions of vagueness of initial information. **Methods.** At implementation of researches the state-of-the-art review of SMART-methods of raising and achievement aims of monitoring of the mine ventilation systems was conducted, the state of ventilation is analyzed, control of air-gas dynamic parameters of the DTEK mines, present base of stationary and portable devices of their measuring, and also the state of the system of against-accident defence of mines. **Results.** Three stages of monitoring of air-gas dynamic parameters are described and basic approaches with the use of SMART-criteria to raising and decision of task of complexing stationary and portable devices of measuring of air-gas dynamic parameters with the purpose of decline degree of vagueness of information necessary for conducting of ventilation calculations are formulated. With the purpose of complex decision of tasks of monitoring and calculation of the air-gas dynamic parameters of mine ventilation networks the method of structure-parametrical authentication of elements of ventilation network on the condition of receipt was adapted unenough certain entrance information. **Scientific novelty.** The method of monitoring of air-gas dynamic parameters of mine ventilation network is first developed by complexing of measurings by different types of devices and the increase of exactness of structure-parametrical authentication of ventilation network is grounded taking into account the results of monitoring. **Practical meaningfulness.** The got results will allow to promote adequacy of mathematical model of the ventilation system to its real analogue, efficiency of its air-gas dynamic monitoring, exactness of decision of ventilation tasks to get a social effect due to the increase of labour safety of miners.

**Keywords:** SMART-technology; monitoring; air-gas dynamic parameters; stationary and portable devices; structure-parametrical authentication

### Постановка проблеми

Товариство з обмеженою відповідальністю «Донецька паливно-енергетична компанія» (ДПЕК) – найбільший в Україні приватний виробник вугілля. До складу ДПЕК (за нинішнім станом, враховуючи

знаходження частини підприємств компанії на тимчасово окупованій території Донбасу) входить ПрАТ «Павлоградвугілля» (10 шахт) і ПрАТ «Добропіллявугілля» (6 шахт). Всі шахти є багатогазовими (надкатегорійних – 9, Ш категорії – 7). Газоносність їх складає: абсолютна – майже до 110 м<sup>3</sup>/хв, відносна –

до 54 м<sup>3</sup>/тонну видобутого вугілля. Поступаючи до діючих виробок шахтної вентиляційної мережі (ШВМ), метан погіршує стан безпеки працюючих, створюючи умови для виникнення аварійних ситуацій. Тому боротьба з метаном на шахтах ДПЕК є важливою науково-технічною і практичною проблемою. Вона вирішується двома шляхами: засобами вентиляції, яка сприяє розрідженню метаноповітряної суміші до безпечних концентрацій, і системою дегазації, яка видаляє надлишки метану з метою його подальшої утилізації. На 10 шахтах діють системи дегазації (газовідсмоктувачі ВМЦГ-7, УВЦГ2, ПДУ; дегазація здійснюється ВНС, ПДУ, підземними свердловинами, «свічками» у виробленому просторі). Спільна робота двох цих підсистем є досить складною, і вимагає постійного ефективного моніторингу аерогазодинамічного стану гірничих виробок.

Всі шахти ДПЕК обладнані системами аерогазового контролю (АГК). Характеристику їх наведено у табл. 1.

Таблиця 1

#### Системи АГК на шахтах ДПЕК / The AGK Systems on the DTEK mines

Шахта	Категорія по газу	Система АГК
Тернівська	Надкатегорійна	СПП
Павлоградська	III категорія	СПП
ім. Героїв Космосу	Надкатегорійна	КАГП
Благодатна	III категорія	СПП
Степова	Надкатегорійна	СПП, УТАС
Ювілейна	Надкатегорійна	СПП
Самарська	III категорія	КАГП
Дніпровська	Надкатегорійна	СПП
Західно-Донбаська	Надкатегорійна	КАГП 2 компл.
ім. М.І. Сташкова	III категорія	КАГП
Добропільська	Надкатегорійна	КАГП, УТАС
Алмазна	Надкатегорійна	КАГП, УТАС
Білицька	III категорія	КАГП
Новодонецька	III категорія	КАГП
Піонер	III категорія	КАГП
Білозірська	Надкатегорійна	КАГП, УТАС

Крім того, згідно вимог «Правил безпеки у вугільних шахтах» [6] гірничим майстрами дільниці вентиляції та техніки безпеки (ВТБ) проводиться маршрутний контроль стану безпеки, до складу якого входять виміри аерогазодинамічних параметрів переносними приладами контролю. Наявність їх на шахтах ПрАТ «Павлоградвугілля» представлено у табл. 2.

Перевірки, проведені ДВГРС, свідчать, що кількість переносних приладів аерогазодинамічного контролю (крім, може сучасних анемометрів АПР-2 [5], розроблених у ІГТМ НАН України, питання придбання яких зараз обговорюються) достатня для їх оперативного аерогазодинамічного моніторингу. Тому розробка методів комплексування стаціонарних і маршрутних приладів контролю, яка дозволить вдосконалити моніторинг кожним із типів, є актуальною.

Таблиця 2

#### Прилади аерогазового контролю на шахтах ПрАТ «Павлоградвугілля» / Devices of aerogas control on the PJSK «Pavlogradvugillya»

Шахта	ШИ	СП, СМП, Сигнал	СМС	Анемо-метри
ім. Героїв Космосу	359	452	782	19
Благодатна	210	151		10
Павлоградська	343	244	109	16
Тернівська	296	314	344	20
Західно-Донбаська	535	482	1563	18
Самарська	318	400		18
Дніпровська	285	323		19
ім. М.І. Сташкова	464	272		20
Степова	344	348	330	18
Ювілейна	405	433	704	12

#### Аналіз останніх досліджень та задачі роботи

Таким чином, можна здійснювати наступні дії:

а) на основі стаціонарних вимірів аерогазодинамічних параметрів скоригувати імітаційну модель (ІМ) ШВМ;

б) з метою підвищення ступеню адекватності моделі реальній ШВМ регулярно коригувати її за результатами маршрутного контролю;

в) на отриманій ІМ моделі проводити вентиляційні розрахунки щодо вдосконалення аерогазодинамічного стану ШВМ.

Саме таким чином і будується, згідно вимог [1], Керівництва з проектування вентиляції вугільних шахт [4] і Тимчасового керівництва з впровадження і експлуатації системи АГЗ, робота дільниці ВТБ. Однак є декілька не до кінця вирішених питань, які, у разі задовільного вирішення, сприятимуть оптимізації провітрювання шахти.

а) сучасний підхід до організації стаціонарної системи контролю аерогазодинамічних параметрів гірничих виробок базується на принципах встановлення датчиків у місцях найбільш імовірних та інтенсивних метановиділень за умови значного дебіту повітряного потоку. Таким умовам насамперед відповідають виробки виїмкових ділянок. Однак місць виділення метану у шахті багато, і не всі вони можуть ефективно прогнозуватися. Система стаціонарного контролю повинна містити максимальну кількість вимірних станцій з метою максимального охоплення зон із змінюваним газовим режимом;

б) існує ряд методів розміщення датчиків контролю вмісту газів у шахтному повітрі у виробках ШВМ. В основному вони розраховані на виявлення зміни складу шахтної атмосфери під час виникнення аварійних ситуацій, тобто виконують роль детектора, що сигналізує при необхідності прийняття протиаварійних мір. При цьому не передбачається подальший контроль протікання аварійної ситуації за зміною концентрацій шкідливих газів у шахтній атмосфері. Контроль концентрації метану у шахтній атмосфері у нормальному режимі повинен вирішувати обернену задачу: не виявити його

наявність у повітрі, а керувати складом шахтної атмосфери з метою підвищення безпеки праці і недопущення аварійних ситуацій. Від кількості датчиків системи такого контролю залежить, з одного боку, час виявлення і оперативність реагування на зміну газового складу атмосфери, а з іншого – локалізація місця аномалії, яка виникла. Рішення другої задачі потребує розробки методу визначення маршрутів розповсюдження метаноповітряної суміші (МПС) вентиляційною мережею (отже, і зони зміненого газового режиму), і у той же час дозволить, за умови наявності інформації щодо геометричних параметрів гірничих виробок, швидкості і витрати МПС у них, визначити концентрацію метану у аномальній точці, тобто можливому осередку аварії, розрахувати ступінь ризику її виникнення і прийняти відповідні міри щодо її недопущення;

в) використання існуючої на всіх шахтах системи маршрутного контролю аерогазодинамічних параметрів переносними приборами дозволить оперативно уточнювати дані стаціонарної системи моніторингу, а також контролювати аерогазодинамічний стан ділянок ШВМ, де контрольних точок стаціонарної системи немає. Виникнення таких ділянок неминуче, з одного боку, внаслідок неможливості урахувати завчасно змінення газової ситуації у шахті в процесі ведення гірничих робіт і створити універсальну адаптивну систему моніторингу, а з іншої – реальною обмеженістю розмірності стаціонарної системи контролю внаслідок високої вартості окремих її елементів і неможливості їх встановлення в усіх загрозливих за газовим чинником ділянках мережі (а також точного прогнозування виникнення додатково таких ділянок);

г) система маршрутного контролю формується з практичних міркувань з урахуванням даних стаціонарної системи. Однак останні використовуються не в повній мірі. Статистичні дані щодо змін газової ситуації, які поступають від датчиків стаціонарної системи, дозволять актуалізувати систему маршрутного контролю, більш ефективно локалізувати у ШВМ місця найбільш небезпечних метановиділень і організувати їх раціональний моніторинг. З іншого боку, використання результатів контролю шахти переносними приборами дозволить вдосконалити систему стаціонарного контролю у плані зміни її топологічної структури і розмірності і виробити рекомендації щодо проектування систем стаціонарного контролю на гірничотехнічних об'єктах з аналогічними умовами видобутку вугілля;

д) такий взаємозв'язок стаціонарної і маршрутної систем аерогазодинамічного контролю дає можливість вважати перспективним комплексування їх роботи, що дозволить досягти як соціальних, так і економічних результатів;

е) на основі комплексування стаціонарної і маршрутної систем контролю з урахуванням попередніх змін аерогазодинамічних параметрів можна буде побудувати прогнозну траєкторію такого

змінення, що дозволить підвищити надійність, оптимізувати структуру контролю і більш обґрунтовано прогнозувати виникнення аварійних ситуацій;

ж) оскільки досягти повної адекватності імітаційної моделі функціонування ШВС її реальному аналогу навряд чи можливо (завжди знайдуться чинники, які не враховано або взагалі неможливо врахувати), актуальними залишаються питання структурно-параметричної ідентифікації ШВМ за результатами недостатньо повної вимірної інформації;

и) оскільки поставити і вирішити таку багаточинникову задачу існуючими методами важко – необхідно використати для цього принципи SMART-технологій і SMART-критерії, яким повинна відповідати мета роботи.

### Виклад основного матеріалу досліджень

SMART-критеріїв існує п'ять, відповідно першим літерам англійської абетки SMART:

- а) specific (конкретний);
- б) measurable (вимірний);
- в) attainable (досяжний);
- г) relevant (значущий);
- д) time-bounded (обмежений за часом).

Якщо постановка задачі (проблеми) відповідатиме цим критеріям – отримане рішення буде наближеним до оптимального, оскільки вся необхідні чинники буде враховано.

Чинник конкретності одразу ставить питання: чого **конкретно** ми очікуємо від результатів вирішення задачі? Просто констатувавши, що комплексування стаціонарного і маршрутного контролю дозволить знизити ступінь невизначеності інформації замало, необхідно конкретизувати кількісні показники рішення. І максимально зменшити кількість понять «за умовчанням», тобто очевидним – адже не для всіх технологів вони можуть бути очевидними!

Чинник вимірності передбачає наявність критеріїв того, чи досягнуто поставлену ціль. У нашому випадку це – достовірність отриманих результатів і кількісна оцінка зменшення ступеню невизначеності інформації, яка використовується під час імітаційного моделювання. Враховуватись можуть багато факторів:

а) можливість аналізу повторюваності подій (співвідношення інформації з стаціонарних і переносних приладів і його ефективності);

б) середні показники (коли результат досягається не максимізацією кількості задіяних вимірних засобів, а дещо меншою їх кількістю з отриманням додаткових економічних результатів);

в) час (інтервал часу контролю, протягом якого потрібно комплексування (чи роздільне використання) приладів різних типів);

г) заборона (за якимись додатковими обмеженнями кращого результату досягти неможливо), та ін.

Чинник досяжності потребує відповіді (з попередньою оцінкою) на запитання: чи досягне рішення задачі? Адже треба врахувати, що, незважаючи на комплексування стаціонарних і маршрутних систем контролю, у ШВМ може залишитися багато непідконтрольних ділянок, а організація маршрутного контролю лише з метою уточнення даних стаціонарного – найбільш вірогідно недоцільна.

Чинник значущості обмежується коротким питанням: «Навіщо?». Адже комплексування, яке нами розглядається, має як позитивні, так і негативні сторони. Якщо стаціонарний контроль не дає позитивних результатів – підтримка його за рахунок маршрутного доцільна. Якщо ж стаціонарного контролю вистачає (найбільш сучасна система УТАС, яка впроваджується на шахтах України (див. табл. 1), має досить широкі і гнучкі можливості в цьому плані) – можливо, слід скоригувати маршрути контролю в напрямку спрощення. Отриманий результат не зменшить точність подальших розрахунків.

Чинник обмеженості часу у задачах контролю не має вирішального значення (крім, звичайно, випадків необхідності контролю аерогазодинамічних параметрів у аварійній ситуації). Адже комплексування вимірів передбачається для нормальних умов функціонування шахти, і єдиним часовим параметром, який необхідно враховувати, є інтервал взаємокоригування комплексованих вимірів.

Якщо всі п'ять СМАРТ-критеріїв розглянуто, і питання комплексування стаціонарного і маршрутного контролю якимось чином вирішене – вхідну інформацію для подальшого моделювання аерогазодинамічного стану ШВС можна вважати придатною. Марно сподіватись на отримання оптимального результату – якась невизначеність у розрахунках завжди буде присутня. Задачею є визначення ділянок ШВМ, параметри яких у найбільшій мірі впливають на кінцевий результат, тобто структурна і параметрична ідентифікація ШВМ.

З метою комплексного вирішення задач моніторингу і розрахунку аерогазодинамічних параметрів ШВМ було скориговано метод структурно-параметричної ідентифікації елементів вентиляційної мережі [2,7] за умови отримання недостатньо визначеної вхідної інформації [1].

На першому етапі розв'язується задача структурної ідентифікації наступним чином.

1. Задано початкову мережу  $G_u(X_u, U_u)$ . На множині гілок  $U_m$  модельованого графа виділяється постійна частина  $U_{const}$ , тобто гілки, які відображаються у ІМ ШВМ без зміни структури і аеродинамічних параметрів і придатні для моніторингу. Для цього використовуються критерії структурної подібності [3].

2. У модельованій мережі головний маршрут від об'єкту провітрювання до вентилятора головного провітрювання (ВГП) і вузлів поверхні повинен співпадати з маршрутом у початковій мережі, для

цього використовується критерій функціональної подібності [3]; таким чином виявляються основні аеродинамічні зв'язки об'єктів провітрювання з ВГП і вузлами поверхні.

3. Частина мережі, яка залишилася (зони невизначеності), буде відображена у ІМ топологічною структурою  $M_k(X_k^M, U_k^M)$ . При формуванні цих структур нові вузли до множини  $U_m$  не включаються.

4. Результати виміру повітря і депресій у  $U_{const}$  наносяться на моделюючий граф  $G_m(X_m, U_m)$ . У моделюючому графі визначаються вузли з порушенням першого закону мереж таким чином:

$$\Delta q_i = \sum_{(i,j) \in U_i} \text{sign}(Q(i,j)) |Q(i,j)|, \quad l=1, n,$$

$$|\Delta q_i| \geq \xi, \quad i=1, n',$$

де  $\Delta q_i$  – нев'язка витрат повітря у  $i$ -тому вузлі;  $\xi$  – необхідна точність моделювання повітроділення у  $i$ -тому вузлі;  $n'$  – кількість вузлів з порушенням першого закону мереж.

5. Визначається множина гілок  $(i,j)$ , які моделюють  $M_k(X_k^M, U_k^M)$ . Для цього виконуються операції порівняння

$$\Delta q_i > 0, \quad \Delta q_i < 0 \quad |\Delta q_i| = |\Delta q_j|$$

Якщо виконуються всі три умови, то гілка  $(i,j)$  заноситься до множини гілок  $U_m$  моделюючого графа.

6. Визначається значення  $\max\{ad G_m\}$  критерію адекватності, в якості якого може бути прийнята максимальна нев'язка витрат повітря у вузлах модельованої мережі:

$$\max \left| \sum_{(i,j) \in U_i} \text{sign}(Q(i,j)) |Q(i,j)| \right| \leq \xi, \quad l=1, n.$$

Таким чином, задача структурної ідентифікації полягає у тому, щоб максимальне відхилення в будь-якому з вузлів реальної і модельованої мереж не перевищувало значення критерію адекватності, пов'язаного з вимірюваннями витрат повітря за умови  $\min\{dim G_m\}$ -мінімізації критеріїв розмірності та перетворення мережі.

На другому етапі розв'язується задача параметричної ідентифікації ШВМ з невизначеними аеродинамічними параметрами, яка полягає в оцінці вірогідності значень витрат повітря на всіх ділянках мережі та тиску у всіх вузлах мережі на підставі зміни тільки деяких із цих змінних. У результаті вирішення задачі за розрахунковими або експериментальними даними визначаються значення аеродинамічних опорів, розподілу депресій і витрат повітря у всіх виробках ШВМ, що задовольняють мережним законам.

Математична постановка задачі ідентифікації аеродинамічних параметрів ШВМ полягає у мінімізації функціонала:

$$F = \sum_{(i,j) \in U} \left[ \frac{1}{(\delta_{(j,i)}^q)^2} (Q(i,j) - Q^*(i,j))^2 + \frac{1}{(\delta_{(j,i)}^h)^2} (H(i,j) - H^*(i,j))^2 \right] \rightarrow \min \quad (1)$$

при обмеженнях:

$$\sum_{(i,j) \in U_l} \text{sign}(Q(i,j)) |Q(i,j)| = 0, \quad l=1, m \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in U_\mu} (\text{sign}(Q(i,j)) R(i,j) Q^2(i,j) \pm h_e) - \sum_{(i,j) \in (U_\mu \cap U_b)} H(i,j) = 0, \quad \mu=1, n-m+1, \quad (3)$$

$$H(i,j) = a(i,j) - b(i,j) Q^2(i,j), \quad (i,j) \in U_b, \quad (4)$$

$$H(i,j) \leq H_{\text{норм}}, \quad (i,j) \in U_b, \quad (5)$$

$$R(i,j) = \frac{\alpha(i,j) L(i,j) P(i,j)}{S^{2.5}}, \quad (i,j) \in U_x, \quad (6)$$

$$Q(i,j) = S(i,j) V(i,j), \quad (i,j) \in U \setminus U_b, \quad (7)$$

$$V^{\min}(i,j) \leq V(i,j) \leq V^{\max}(i,j), \quad (8)$$

$$R^{\min}(i,j) \leq R(i,j) \leq R^{\max}(i,j), \quad (9)$$

$$Q^{\min}(i,j) \leq Q(i,j) \leq Q^{\max}(i,j) \quad (10)$$

$$H^{\min}(i,j) \leq H(i,j) \leq H^{\max}(i,j), \quad (11)$$

де  $U_l$  - множина гілок, інцидентних  $l$ -тому вузлу;  $U_\mu$  - множина гілок, що належать  $\mu$ -тому незалежному контуру;  $U_b$  - множина гілок, що відображають ВГП;  $h_e$  - величина природної тяги, що діє в  $\mu$ -тому незалежному контуру;  $L(i,j)$  - довжина виробки, м;  $S(i,j)$ ,  $S^{\min}(i,j)$ ,  $S^{\max}(i,j)$  - відповідно площа поперечного перетину виробки, його мінімально і максимально припустимі значення,  $m^2$ ;  $Q(i,j)$ ,  $Q^{\min}(i,j)$ ,  $Q^{\max}(i,j)$  - відповідно витрата повітря у виробці, її мінімально і максимально припустимі значення,  $m^3/c$ ;  $H(i,j)$ ,  $H^{\min}(i,j)$ ,  $H^{\max}(i,j)$  - відповідно депресія виробки, її мінімально і максимально припустимі значення, Па;  $H_{\text{норм}}$  - обмеження на величину загальношахтної депресії, Па;  $V(i,j)$ ,  $V^{\min}(i,j)$ ,  $V^{\max}(i,j)$  - відповідно швидкість руху повітря у виробці, її мінімально і максимально припустимі значення, м/с;  $R(i,j)$ ,  $R^{\min}(i,j)$ ,  $R^{\max}(i,j)$  - відповідно аеродинамічний опір виробки, його мінімально і максимально припустимі значення, одиниць  $SI$ ;  $\alpha$  - коефіцієнт аеродинамічного опору виробки;  $\delta^q(i,j)$ ,  $\delta^h(i,j)$  - відповідно значення вірогідності завдання величин  $Q(i,j)$ ,  $H(i,j)$  у виробці;  $a(i,j)$ ,  $b(i,j)$  - коефіцієнти апроксимації характеристик ВГП,  $Q^*(i,j)$ ,  $H^*(i,j)$  - вимірювані значення витрат повітря і депресій гірничих виробок відповідно.

Мінімізація функціонала (1) є завданням нелінійного математичного програмування, при цьому враховуються наступні обмеження у вигляді рівнянь і нерівностей: закони розподілу повітря у ШВМ (2) - (3); залежності між аеродинамічним

опором виробки, її перетином, довжиною та коефіцієнтом аеродинамічного опору виробки (6), швидкістю руху та витратою повітря у виробці (7); на можливі місця установки регуляторів і на величини їх аеродинамічних опорів, а також гірничих виробок (9); мінімально та максимально припустимі швидкості повітря у виробці (8), витрати повітря (10) і депресії (11); максимально можлива величина загальношахтної депресії (5); рівняння, що апроксимує робочу характеристику ВГП (4).

Дослідження необхідних та достатніх умов існування мінімуму функціонала (1) при обмеженнях (2) і (3) показало, що функція цілі (1) є опуклою, тому що являє собою суму опуклих функцій виду

$$\frac{1}{(\delta_{(j,i)}^q)^2} (Q(i,j) - Q^*(i,j))^2$$

та

$$\frac{1}{(\delta_{(j,i)}^h)^2} (H(i,j) - H^*(i,j))^2,$$

тобто функція має єдиний екстремум.

Постановку задачі ідентифікації аеродинамічних параметрів ШВМ в умовах неповної та недостатньо достовірної інформації необхідно доповнити двосторонніми обмеженнями на змінні (8) - (11). У цьому випадку передбачається, що за розрахунковими формулами і експериментальними залежностями зміни аеродинамічного опору можна одержати оцінку верхньої та нижньої межі зміни аеродинамічних параметрів ШВМ.

У постановці задачі вперше враховується  $P(i,j)$  - якісна характеристика стану виробки, що важливо під час визначення маршрутів аерогазодинамічного контролю і зон ШВС, яким притаманна невизначеність аерогазодинамічних параметрів.. Для цього множина виробок розбивається на 3 групи залежно від стану виробки: I- добре (виробки без істотної деформації); II- задовільне (виробки з частково деформованим кріпленням); III- погане (аварійно деформовані виробки, або зі значною кількістю породи та устаткування). Кількісна оцінка аеродинамічного опору цих виробок визначається за формулою (6).

Основними етапами методу ідентифікації невизначених аеродинамічних параметрів ШВМ є наступні.

1. Розв'язується задача структурної ідентифікації ШВМ із невизначеною топологією та виконуються діакоптичні перетворення мережі.

2. У гілках моделюючої ШВМ діакоптичною процедурою визначаються витрати повітря, які мінімізують функціонал (1) при виконанні обмежень (2), (8) - (11):

$$Q(i,j) = Q^*(i,j) - \frac{(\delta^q(i,j))^2}{2} \sum_{l=1}^m \text{sign}(\lambda_l) |\lambda_l|,$$

3. Отримане рішення використовується під час мінімізації функціонала (1) при обмеженнях (3), (8) - (11).

$$Q(i, j) = Q^*(i, j) - \frac{(\delta^q(i, j))^2}{2} \sum_{l=1}^m \text{sign}(\lambda_l) |\lambda_l|,$$

4. Отримані результати використовуються під час мінімізації функціонала (1) при обмеженнях (3), (8) - (11).

$$R(i, j) = R^*(i, j) - \frac{(\delta^h(i, j))^2 Q^2(i, j)}{2} \sum_{l=1}^{n-m+1} \text{sign}(\lambda_l) |\lambda_l|,$$

5. За отриманими у результаті реалізації етапів 2 і 3 витратами повітря і значенням депресій у гілках ШВС обчислюються їхні аеродинамічні опори.

6. Виконується розрахунок природного повітророзподілу (контроль виконання обмежень (2) і (3)).

$$\begin{cases} R^{\min}(i, j) = R(i, j), \text{ якщо } R(i, j) < R^{\min}(i, j) \\ R(i, j) = R^{\max}(i, j), \text{ якщо } R(i, j) > R^{\max}(i, j), \\ (i, j) \in U \setminus U_b \end{cases}$$

7. Визначаються чисельні значення критеріїв адекватності [4] реальної ШВМ і ШВМ, яка моделюється.

8. Робиться висновок про коректність отриманого рішення задачі ідентифікації аеродинамічних параметрів ШВМ.

### Висновки

На основі проведених досліджень та оптимізації запропоновано комплексний підхід до оптимізації вимірів аерогазодинамічних параметрів елементів ШВМ з подальшими розрахунками ШВМ за умови зниження ступеню невизначеності вхідної інформації і з використанням СМАРТ-критеріїв коректності вирішуваної задачі. Впровадження отриманих результатів дозволить отримати соціальний ефект за рахунок підвищення безпеки праці гірників.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Булат, А.Ф. Методология поиска рациональных параметров шахтной вентиляционной системы в условиях неопределенности / А.Ф. Булат, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 59. – С. 3-8.
2. Булат, А.Ф. Структурная идентификация шахтной вентиляционной сети / А.Ф. Булат, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин // Уголь Украины. – 2004. - № 1. – С. 31-35.
3. Бунько, Т.В. Критерии адекватности математических моделей вентиляционных сетей угольных шахт с неопределенной структурой и аэродинамическими параметрами / Т.В. Бунько // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 59. – С. 176-183.
4. ДНАОТ 1.1.30-6.09.93 Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт: утв. Приказом Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда № 131 от 20.12.93. – Киев: 1994. – 312 с. (Государственный нормативный акт по охране труда).
5. Дудник, М.Н. Анемометр АПР-2 – современный прибор для контроля проветривания шахт / М.Н. Дудник, А.П. Круковский, Ю.Д. Беликов // Уголь Украины. – 2013. - № 7. – С. 26.
6. НПАОП 10.0-1.01-10 Правила безпеки у вугільних шахтах: затв. Наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 № 62. – Київ: 2010 – 2154. – 211с. (Нормативний документ Мінвуглепрому).
7. Lulic N. Optimization of air distribution in mine ventilation networks / N. Lulic, D. Kuzmanovic // Yugosl. I. Oper. Res. – 1994.- 4, №1.- pp. 105-113.

### REFERENCES

1. Bulat, A.F., Bunko, T.V. and Kokoulin, I.Ye. *Metodologiya poiska ratsionalnykh parametrov shakhtnoy ventilatsionnoy sistemy v usloviyakh neopredelenosti* [Methodology search of rational parameters of the mine ventilation system in the conditions of vagueness]. *Geotekhnicheskaya mekhanika: Mezhvedomstvennyy sbornik nauchnykh trudov* [Geo-Technical Mechanics]. 2005, no. 56, pp. 3-8. (in Russian).
2. Bulat, A.F., Bunko, T.V. and Kokoulin, I.Ye. *Strukturalnaya identifikatsiya shakhtnoy ventilatsionnoy seti* [Structural authentication of mine ventilation network]. *Ugol Ukrainy* [Coal of Ukraine]. 2004, no. 7, p. 26. (in Russian).
3. Bunko, T.V. *Kriterii adekvatnosti matematicheskikh modeley ventilatsionnykh setey ugol'nykh shakht s neopredelennoy strukturoy i aerodinamicheskimi parametrami* [Criteria of adequacy of mathematical models of ventilation networks of coal mines with an indefinite structure and aerodynamic parameters]. *Geotekhnicheskaya mekhanika: Mezhvedomstvennyy sbornik nauchnykh trudov* [Geo-Technical Mechanics]. 2005, no. 59, pp. 176-183. (in Russian).
4. State Committee of Ukraine on the Supervision after a Labour Protection (1994), *DNAT 1.1.30-6.09.93 Rukovodstvo po proyektirovaniyu ventilatsii ugol'nykh shakht: utv. Prikazom Gosudarstvennogo komiteta Ukrainy po nadzoru za okhranoy truda # 131 ot 20.12.93* [Guidance on planning of ventilation of coal mines: Ratified by Order of the State committee of Ukraine on the Supervision After a Labour Protection № 131 from 20.12.93], Kyiv, UA. (in Russian).
5. Dudnik, M.N., Krukovskiy, A.P. and Belikov, Ju.D. *APR-2 – sovremenny pribor dlia kontrolya provetrivaniya shakht* [Anemometer APR-2 is modern device for the control ventilation of mines]. *Ugol Ukrainy* [Coal of Ukraine]. 2013, no. 7, p. 26. (in Russian).
6. Ministry of Coal industry of Ukraine (2010), *NRALP 10.0-1.01-10 Pravyla bezpeky u vuhilnykh shakhtakh: zatverdzheno Nakazom Derzhavnogo komitetu Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhorony pratsi ta hirnychogo nagliadu 22.03.2010 № 62* [NRALP 1.01-10 Rules of safety at coal mines: ratified by Order of State Committee of Ukraine by the industrial safety, protection of labour and mining inspectorate 22.03.2010 № 62]. 2010, Kyiv, UA. (in Russian).
7. Lulich, N. and Kuzmanovich, D. *Optimization of air distribution in mine ventilation networks*, *Yugosl. I. Oper. Res.*, 4, 1994, no. 1, pp. 105-113.