

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

**Завадська Тетяна Володимирівна**



УДК 622.451:004.942:519.876.2

**МОДЕЛЬНА ПІДТРИМКА РОЗРОБОК СИСТЕМ КЕРУВАННЯ  
ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ШАХТ ІЗ УРАХУВАННЯМ ГІРНИЧО-ТЕХНІЧНИХ  
УМОВ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

Донецьк – 2013

## Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Святний Володимир Андрійович**,  
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ульшин Віталій Олександрович**,  
професор кафедри системної інженерії  
ДВНЗ «Східноукраїнський національний університет  
ім. В. Даля»;

доктор технічних наук, професор  
**Чепцов Михайло Миколайович**,  
завідувач кафедри автоматики, телемеханіки, зв'язку та  
обчислювальної техніки  
ДВНЗ «Донецький інститут залізничного транспорту  
Української державної академії залізничного транспорту»

Захист відбудеться «17» жовтня 2013 року о 14 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д11.052.03 Донецького національного технічного університету за адресою: 83001, Донецьк, вул. Артема, 58, корп. 8, ауд 704.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донецького національного технічного університету за адресою: 83001, Донецьк, вул. Артема, 58, корп. 2.

Автореферат розісланий «    »

2013 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д11.052.03  
кандидат технічних наук, доцент



Г.В.Мокрий

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Процес вентиляції гірничих виробок є найважливішим безперервним процесом при підземному видобутку вугілля, який забезпечує нормальні умови праці шахтарів, безпеку ведення гірничих робіт і впливає на продуктивність видобувних машин. Підвищення ефективності систем вентиляції метанонебезпечних шахт здійснюється поряд із суто технологічними методами за рахунок оперативного контролю і керування вентиляційними режимами. Шахтні вентиляційні мережі (ШВМ) є складними об'єктами керування, що характеризуються багатовимірністю параметрів і просторовою розподіленістю, нестационарністю та стохастичністю аерогазодинамічних процесів, що протікають в них. Для розробки алгоритмів керування і структур систем автоматизації вентиляційних мереж необхідні математичні моделі схем провітрювання видобувних ділянок (СПВД) і шахтної вентиляційної мережі в цілому як об'єктів автоматизації.

Практика розробки систем автоматизації керування вентиляцією для конкретних шахт показала, що однією з основних задач в таких проектах є врахування особливостей гірничо-технічних умов, що впливають на застосовувані типи СПВД і потребують адаптації алгоритмів контролю й керування. За цих обставин є актуальною задача розробки моделей СПВД певних типів, котрі експлуатуються на шахтах, і забезпечення модельної підтримки проектів автоматизації провітрювання, використання моделей при прийнятті рішень щодо безпечного ведення гірничих робіт. Потрібна також системна організація використання моделей СПВД і ШВМ в рамках галузевого моделюючого сервісного центру (МСЦ). У цьому зв'язку модельна підтримка розробок систем керування вентиляцією шахт із урахуванням гірничо-технічних умов є актуальною задачею, що є має галузеве значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами.** Робота виконана за держтемами кафедри комп'ютерної інженерії Донецького національного технічного університету: Н-25-2000 «Дослідження і розробка методів програмної підтримки проектування інформаційних технологій і комп'ютерних систем»; Н-26-10 «Теоретичний аналіз і дослідження процесів керування і обробки даних у комп'ютерних системах». Автор брала участь у цих дослідженнях як виконавець.

**Метою** роботи є вдосконалення системи автоматизованого керування розподілом повітряних потоків на основі моделей СПВД і ШВМ, в яких враховано гірничо-технічні умови, що дозволить підвищити рівень безпеки гірничих робіт за фактором вентиляції в процесі експлуатації шахт.

Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням таких **завдань досліджень:**

1. Розробка та дослідження математичних моделей схем провітрювання видобувних ділянок і шахтної вентиляційної мережі як об'єктів керування з урахуванням специфіки гірничо-технічних умов конкретних шахт.
2. Розробка структур і алгоритмів функціонування систем керування СПВД і ШВМ.

3. Моделювання систем керування провітрюванням на рівнях СПВД і ШВМ.

4. Розробка засобів моделювання для вирішення задач вентиляції та безпеки в рамках обчислювальних ресурсів диспетчерських служб шахт і галузевого моделюючого сервісного центру.

5. Експериментальні дослідження засобів моделювання аерогазодинамічних процесів та процесів керування вентиляцією шахт.

*Об'єкт дослідження* – схеми провітрювання видобувних дільниць як об'єкти керування та системи автоматизованого керування вентиляцією шахт.

*Предмет дослідження* – математичні моделі, структура, алгоритми функціонування та модельна підтримка розробок систем керування шахтними вентиляційними мережами.

*Методи дослідження.* При проведенні досліджень і розробок використовувалися методи теорій рудничної аерогазодинаміки, диференціальних рівнянь, матриць, чисельних методів, графів, математичного моделювання, застосовано методи і засоби об'єктно-орієнтованого програмування. В якості основного засобу реалізації моделей та проведення експериментів використовувалася блочно-орієнтована мова моделювання Simulink® (The MathWorks Inc.). Отримані результати перевірялися шляхом проведення модельних експериментів на локальних і віддалених обчислювальних ресурсах.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

*Основні наукові положення, що виносяться на захист.*

1. Встановлено, що шахтна вентиляційна мережа як багатозв'язна нелінійна розподілена система вимагає модельної підтримки розробок систем керування у зв'язку з тим, що аналітичні методи теорії автоматичного керування базуються на лінеаризації математичного опису, при якому не враховуються суттєві моменти умов реалізації системи.

2. Показано, що науковою основою модельного супроводу автоматизації шахтних вентиляційних мереж є комплекс диференціальних рівнянь динаміки регульованих величин (витрати повітря і концентрації метану) з урахуванням гірничо-технічних умов.

*Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.*

1. Запропоновано модифіковані структури і математичний опис схем провітрювання видобувних дільниць різних типів як об'єктів керування аерогазодинамічними процесами, що відрізняються врахуванням змін параметрів гірничо-технічних умов реальних шахт.

2. Запропоновано новий підхід до використання блочно-орієнтованої моделі ШВМ як об'єкта керування, що відрізняється матрично-векторним поданням рівнянь аерогазодинамічних процесів і наочною їх реалізацією засобами мови Simulink.

3. Запропоновано та досліджено модифіковані структури й алгоритми функціонування систем автоматизованого керування вентиляцією різних дільниць шахт, що дозволить реалізувати модельну підтримку розробок таких систем.

4. Вперше розроблено блочно-орієнтовану модель централізованої системи автоматизованого керування вентиляцією шахт, що сприяє безпечному веденню гірничих робіт при змінних гірничо-технічних умовах.

5. Вперше розроблено засоби доступу та формування моделей, що забезпечують модельну підтримку розробок всіх етапів проектування систем автоматизації шахтних вентиляційних мереж як об'єктів керування та реалізують процедуру доступу до ресурсів моделюючого сервісного центру вугільної промисловості.

#### **Практична значимість отриманих результатів.**

1. Розроблено блочно-орієнтовані моделі СПВД та ШВМ як об'єктів керування провітрюванням, що дозволяють вирішувати задачі досліджень ефективності алгоритмів і структур систем автоматизації шахтних вентиляційних мереж.

2. Розроблено модель системи автоматизованого керування розподілом повітря, що дозволить при мінімальних витратах енергії забезпечити об'єкт необхідною кількістю повітря.

3. Розроблено засоби формування моделей і доступу до ресурсів моделюючого сервісного центру вугільної промисловості.

4. Розроблено проблемно-орієнтоване програмне забезпечення, яке може використовуватися в якості окремого модуля тренажера для гірничих диспетчерів.

5. Результати дисертаційної роботи використовуються на шахті ім. О.Ф. Засядька в якості тестової задачі для модуля тренажера гірничих диспетчерів.

6. Результати, отримані в дисертаційній роботі, застосовуються на кафедрі комп'ютерної інженерії ДВНЗ ДонНТУ в навчальному процесі з дисциплін «Паралельні та розподілені обчислення» та «Моделюючі середовища».

#### **Особистий внесок здобувача.**

Всі основні положення і результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором самостійно.

**Апробація.** Результати роботи доповідалися на міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформатика та комп'ютерні технології» (ДонНТУ, 2007), на науково-технічній конференції «Гарантоздатні (надійні та безпечні) системи, сервіси та технології» (Кіровоград, 2008, 2010), на науково-практичній конференції «Донбас-2020: наука і техніка-виробництву» (ДонНТУ, 2008, 2010), на міжнародній науковій конференції «Моделювання-2010» (Київ, 2010), на міжнародній науково-практичній конференції «Промислова безпека та вентиляція підземних споруд у 21 столітті» (ДонНТУ, 2011).

Результати дисертаційних досліджень доповідались, обговорювались та отримали схвальні рішення на наукових семінарах кафедри комп'ютерної інженерії ДВНЗ ДонНТУ.

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано в 13 друкованих роботах, із них 7 статей – у виданнях, внесених до переліку фахових наукових видань України, і 6 в працях міжнародних науково-технічних конференцій і семінарів, 8 наукових робіт написано без співавторів.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота обсягом 238 машинописних сторінок складається зі списку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел, що складається з 96 найменувань, розташованих на 11 сторінках, 6 додатків, розташованих на 90 сторінках. Дисертація містить 93 рисунка і 2 таблиці, основний текст дисертації складається з 148 сторінок.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз стану розробок в області систем керування вентиляцією шахт» дається короткий опис процесу провітрювання гірничих виробок як основного чинника безпеки шахтарів. Розвиток гірничих робіт в результаті навмисних або випадкових змін аеродинамічних параметрів елементів, що входять в шахтну вентиляційну мережу, призводить до того, що ШВМ відрізняється стохастичною динамікою структури і параметрів. У зв'язку з цим для роботи з ШВМ як з об'єктом керування застосовуються сучасні наукові методи, одним з яких є математичне моделювання процесів провітрювання. Основними об'єктами провітрювання на вугільних шахтах є видобувні дільниці. У схемах провітрювання видобувних дільниць як об'єктах керування витрата повітря ( $Q$ ) і концентрація метану ( $C$ ) є величинами, що регулюються. Керуючими діями, що впливають на величину  $Q$ , можуть бути депресія дільниці, депресія підсвіжаючих виробок і регульовані аеродинамічні опори, що встановлюються у виробках СПВД. Сторонніми впливами, що зумовлюють величину  $C$ , є джерела газовиділення. На величину  $Q$  впливають зміни аеродинамічного опору виробок, порушення нормальної роботи вентиляційних споруд, коливання тиску в точках підключення дільниці до мережі, а також керуючі дії сусідніх дільниць. Ці дії є сторонніми і по відношенню до регульованої величини  $C$ .

Аналізуючи схеми провітрювання видобувних дільниць, слід визначити загальні закономірності формування метаноповітряної суміші у виробках, впливу вироблених просторів, очисних вибоїв та інших джерел метановиділення. У структурі кожної СПВД можна виділити три елементи:

- з'єднання виробок і виробленого простору;
- джерела метановиділення;
- виробки, в яких формуються метаноповітряні суміші.

До теперішнього часу отримано загальний математичний опис схем провітрювання видобувних дільниць та ШВМ як об'єктів керування з розподіленими параметрами. Але видобувні дільниці з певними допущеннями можуть бути представлені як об'єкти з зосередженими параметрами і описані звичайними диференціальними рівняннями. Практичне використання цих математичних моделей вимагає додаткових досліджень з врахуванням особливостей гірничо-технічних умов і, відповідно, типів СПВД.

Шахтна вентиляційна мережа розглядається як єдина аерогазодинамічна система. У роботах ДонНТУ (ДП) спільно з МакНДІ та іншими організаціями запропоновано структури і алгоритми автоматизованої і автоматичної систем керування. Промислові випробування пройшла система автоматизованого контролю та керування АТМОС, апаратні і програмні рішення якої розвиваються

у відповідності з новими поколіннями засобів контролю параметрів шахтної атмосфери і керуючої обчислювальної техніки. Так, систему керування розподілом повітряних потоків та контролю метану на шахті ім. О.Ф. Засядька побудовано на базі апаратури КАГІ і АКМ.

Зважаючи на складність топології ШВМ, нелінійність і розподіленість аерогазодинамічних процесів, значна увага приділяється розробці методів і засобів математичного моделювання. Для вирішення завдань моделювання аеродинаміки ШВМ запропоновано методи безпосереднього інтегрування, еквівалентних інерційностей потоків повітря та рішення систем рівнянь ШВМ щодо вектора потоків в гілках дерева і вектора похідних потоків у гілках антидерева.

Аналіз показав, що досвід використання блочно-орієнтованих (БО), рівняння-орієнтованих (РО), об'єктно-орієнтованих (ОО) мов моделювання, імплементованих в персональних комп'ютерах, є досить обмеженим. Для моделювання спільного протікання аерогазодинамічних процесів в СПВД, ШВМ і системах керування обрана БО-мова моделювання Simulink.

В результаті аналізу визначено завдання досліджень і розробок.

У другому розділі «Розробка математичних моделей схем провітрювання видобувних дільниць та шахтної вентиляційної мережі як об'єктів керування» технологічні СПВД шахти ім. О. Ф. Засядька представлено структурними схемами, блоки яких відображають взаємозв'язки всіх елементів дільниці (рис.1). На рис. 1а елемент 1 – це відкатний штрек, лава і вентиляційний штрек, а також вироблений простір, витіки через який впливають на динаміку повітрярозподілу і на стаціонарні величини потоків повітря;  $H$  – депресія дільниці;  $R'$  – регульований опір;  $Q$  – витрата повітря на дільниці;  $f_Q$  – узагальнені аеродинамічні впливи. Елемент 2 включає в себе вироблений простір, лаву та інші джерела метановиділення;  $f_M$  – впливи на дебіт метану;  $Q_M$  – сумарний дебіт метану. Елемент 3 – це вентиляційний штрек з вихідним потоком повітря, що має концентрацію метану  $C$ .

У структурі другого типу (рис.1б) позначені:  $Q_1$  – витрата повітря в відкатному штреку;  $Q_2$  – витрата в другому свіжому струмені;  $Q_3$  – витрата у вихідному струмені. Регульовані опори  $R'_2$ ,  $R'_3$  відповідають витратам повітря  $Q_2$ ,  $Q_3$ ; при цьому враховано, що в відкатному штреку регульовані опори встановлюватися не будуть.

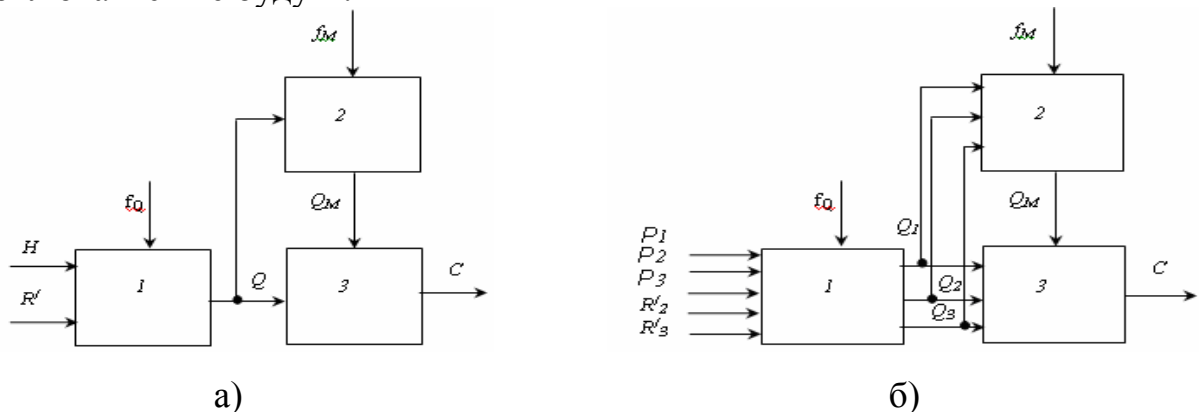


Рис. 1. Структури СПВД: а) першого типу; б) другого типу

Виведення рівнянь аерогазодинамічних процесів в СПВД як об'єктів керування зроблено за наступних фізичних передумов:

- елемент 1 в СПВД-1 є послідовним з'єднанням штреків і лави, а також паралельного з лавою потоку витоків; в СПВД-2 елемент 1 є фрагментом ШВМ з трьома контурами і двома вузлами;

- в елементі 2 СПВД обох типів дебіт метану у виробленому просторі  $Q_M$  залежить від динаміки кількості повітря у відкатному штреку (витрати  $Q$  і  $Q_3$  на рис.1.а, б) і формує концентрацію метану  $C_B$  у витоках повітря, що надходять у вентиляційний штрек; в лавах метан виділяється з відбитого вугілля і на вході в вентиляційний штрек струмінь має концентрацію  $C_L$ ;

- у вентиляційних штреках СПВД-1 і СПВД-2 формуються вихідні струмені з концентрацією метану  $C$ , які залежать від дебітів метану з лав і вироблених просторів.

Математична модель СПВД-1:

$$K_d \frac{dQ}{dt} + R_d * Q^2 + R' * Q^2 = H_d \quad (1)$$

$$A \frac{dQ_M}{dt} + Q_M = Q_{OM} + B * R\phi \frac{d(Q * Q)}{dt} \quad (2)$$

$$V_{ШВ} \frac{dC_B}{dt} = Q_M - (Q_B + Q_M) * C_B \quad (3)$$

$$V_L \frac{dC_L}{dt} = Q_{ML} - (Q_L + Q_{ML}) * C_L \quad (4)$$

$$V_{Ш} \frac{dC}{dt} = Q_{MLD} + Q_{MD} - (Q + Q_{MLD} + Q_{MD}) * C. \quad (5)$$

Тут  $Q_{MLD} = (Q_L + Q_{ML}) * C_L$ ;  $Q_{MD} = (Q_B + Q_M) * C_B$  – динамічні дебіти метану з лави і виробленого простору;  $K_d$  – коефіцієнт інерційності дільничного потоку  $Q$ ;  $R_d$ ,  $R'$  – відповідно аеродинамічні опори дільниці та регулюючого органу;  $H_d$  – депресія дільниці;  $A$ ,  $B$ ,  $R\phi$  – газодинамічні параметри виробленого простору (ВП);  $V_{ШВ}$ ,  $V_L$ ,  $V_{Ш}$  – об'єми шляхів витоків, лави, штреку відповідно;  $Q_{OM}$ ,  $Q_M$  – початковий і поточний дебіти метану ВП.

Математична модель СПВД-2:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 \frac{dQ_1}{dt} + R_1 * Q_1^2 + K_L \frac{dQ_L}{dt} + R_L * Q_L^2 - K_2 \frac{dQ_2}{dt} - R_2 * Q_2^2 - R'_2 * Q_2^2 = P_1 - P_2 = H_{12} \\ K_1 \frac{dQ_1}{dt} + R_1 * Q_1^2 + K_B \frac{dQ_B}{dt} + R_B * Q_B^2 - K_2 \frac{dQ_2}{dt} - R_2 * Q_2^2 - R'_2 * Q_2^2 = P_1 - P_2 = H_{12} \\ K_3 \frac{dQ_3}{dt} + R_3 * Q_3^2 + R'_3 * Q_3^2 + K_2 \frac{dQ_2}{dt} + R_2 * Q_2^2 + R'_2 * Q_2^2 = P_2 - P_3 = H_{23}; \\ Q_1 = Q_B + Q_L; \\ Q_3 = Q_2 + Q_B + Q_L, \end{array} \right. \quad (1')$$

$$A \frac{dQ_M}{dt} + Q_M = Q_{OM} + B * R\phi \frac{d(Q_3 * Q_3)}{dt} \quad (2')$$

$$V_{ШВ} \frac{dC_B}{dt} = Q_M - (Q_B + Q_M) * C_B \quad (3')$$



$$V_{\text{л}} \frac{dC_{\text{л}}}{dt} = Q_{\text{мл}} - (Q_{\text{л}} + Q_{\text{мл}}) * C_{\text{л}} \quad (4')$$

$$V_{\text{ш}} \frac{dC}{dt} = Q_{\text{млд}} + Q_{\text{мд}} - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{\text{млд}} + Q_{\text{мд}}) * C. \quad (5')$$

Система рівнянь (1') містить три контурних і два вузлових рівняння. При цьому  $P_1, P_2, P_3$  – значення тисків в точках підключення дільниці до вентиляційної мережі;  $Q_{\text{л}}, Q_{\text{в}}$  – відповідно витрата в лаві і величина витоків через ВП;  $K_1, K_2, K_3, K_{\text{л}}, K_{\text{в}}$  – коефіцієнти інерційності потоків  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_{\text{л}}, Q_{\text{в}}$  відповідно.

Для побудови блочно-орієнтованої Simulink-моделі ШВМ як об'єкта керування, топологія мережі описується орієнтованим графом  $G(m, n)$ , де  $m$  – кількість гілок,  $n$  – кількість вузлів.

Граф мережі  $G(m, n)$  кодується масивом чисел виду

$$NU_j, KU_j, Qi, R, K, H$$

і характеризується формально матрицею інцидентів  $A$ , матрицею незалежних контурів  $S$ , вектором характеристик вентиляторів  $H$ , діагональними матрицями опорів гілок  $R$ , опорів регулюючих органів  $R'$  і коефіцієнтів інерційності потоків  $K$ , вектором витрат  $Q$  в ШВМ і векторами витрат в гілках дерева ( $X$ ) і антидерева ( $Y$ ) графа ШВМ.

Математична модель динаміки повітрярозподілу в ШВМ як об'єкті керування представляється матрично-векторною системою вузлових і контурних рівнянь:

$$AQ=0; \quad (7)$$

$$SK \frac{dQ}{dt} + SRZ + SR'Z = SH, \quad (8)$$

де  $Z$  – вектор з елементами  $Z_i = Q_i |Q_i|$ .

Застосовуючи метод рішення системи (7), (8) відносно шуканих змінних і їх похідних, отримаємо модель ШВМ у вигляді, зручному для чисельного рішення:

$$X = -WY \quad (7')$$

$$\frac{dY}{dt} = S_{\text{п}} H - S_{\text{п}} RZ - S_{\text{п}} R'Z. \quad (8')$$

Тут  $S_{\text{п}} = U^{-1}S$ ;  $U = (S_Y K_Y - S_X K_X W)$ ;  $W = A^{-1}_X * A_Y$ ;  $H = (H_X H_Y)^T$ ;  $Z = (Z_X Z_Y)^T$ .

Беручи до уваги, що вектор витрат повітря у ШВМ  $Q=(X, Y)^T$  і підвектори  $Q_{\text{л}} \in Q$ ,  $Q_{\text{в}} \in Q$ , введемо вектори і матриці газодинамічних процесів і запишемо рівняння виду (2), (3), (4), (5) в матрично-векторній формі для всієї ШВМ:

$$A \frac{dQ_{\text{м}}}{dt} + Q_{\text{м}} = Q_{\text{ом}} + B * R\phi \frac{d(Q_3 * Q_3)}{dt} \quad (9)$$

$$V_{\text{шв}} \frac{dC_{\text{в}}}{dt} = Q_{\text{м}} - (Q_{\text{в}} + Q_{\text{м}}) * C_{\text{в}}; \quad (10)$$

$$V_{\text{л}} \frac{dC_{\text{л}}}{dt} = Q_{\text{мл}} - (Q_{\text{л}} + Q_{\text{мл}}) * C_{\text{л}}; \quad (11)$$

$$V_{\text{ш}} \frac{dC}{dt} = Q_{\text{млд}} + Q_{\text{мд}} - (Q + Q_{\text{млд}} + Q_{\text{мд}}) * C, \quad (12)$$

де  $A$ ,  $B \cdot R_f$ ,  $V_{л}$ ,  $V_{шв}$ ,  $V_{ш}$  – діагональні матриці газодинамічних параметрів, об'ємів лав, вироблених просторів і вентиляційних штреків;  $C_{л}$ ,  $C_{в}$ ,  $C$  – вектори концентрацій метану в лавах, у вироблених просторах, у вихідних струменях дільниць;  $Q_{м}$ ,  $Q_{ом}$ ,  $Q_{мл}$  – вектори дебітів метану з вироблених просторів і лав;  $Q$ ,  $Q_{л}$ ,  $Q_{в}$  – вектори витрат повітря у вентиляційних штреках, лавах і вироблених просторах;  $Q_{млд}$ ,  $Q_{мд}$  – вектори динамічних дебітів метану в лавах і вироблених просторах; суми  $(Q_{в}+Q_{м})$ ,  $(Q_{л}+Q_{мл})$ ,  $(Q+Q_{млд}+Q_{мд})$  є діагональними матрицями, складеними з елементів зазначених векторів.

У третьому розділі «Дослідження математичних моделей СПВД і ШВМ» розроблено блочно-орієнтовані моделі СПВД і ШВМ (рис.2), виконано модельні експерименти, отримано графіки витрат повітря  $Q(t)$  і концентрацій метану  $C(t)$  для СПВД і ШВМ (рис .3) для гірничо-технічних умов шахти ім.О.Ф.Засядька.

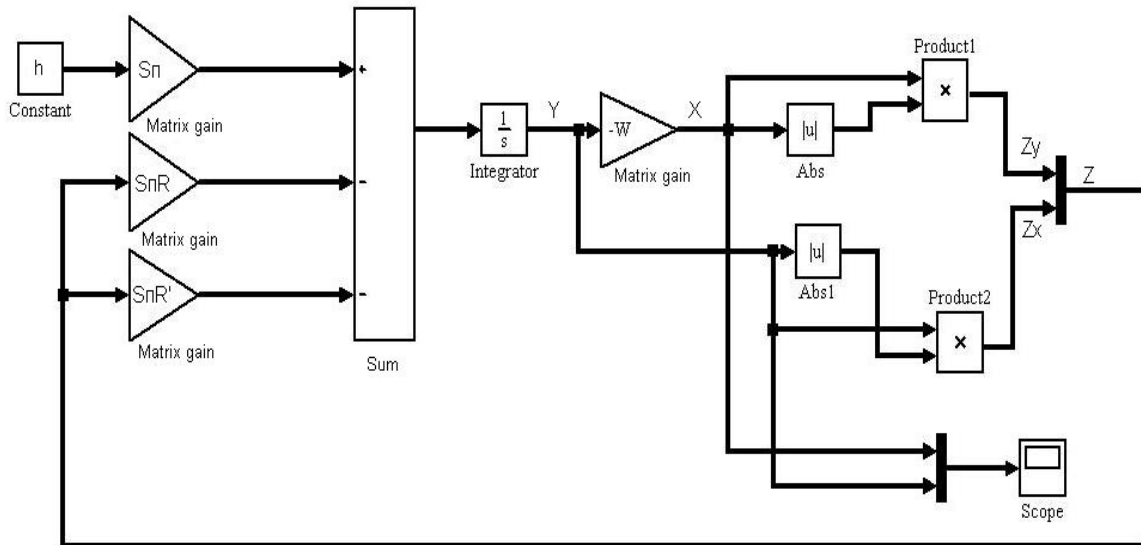


Рис. 2. БО-модель повітрярозподілу в ШВМ

Запропоновано структуру БО-симулятора (рис.4), що забезпечує комп'ютерну підтримку всіх етапів моделювання ШВМ як об'єкта керування.

Графічний інтерфейс користувача (ГІК) розроблено для полегшення роботи персоналу, який використовує моделююче програмне забезпечення і для підтримки розробника у складанні моделей та їх дослідженні.

Топологічний аналізатор (ТА) включає програмні засоби, які забезпечують зручний опис та кодування топології, перетворення топологічних характеристик, які можуть бути використані для складання рівнянь аерогазодинамічних процесів.

Генератор рівнянь (ГР) – програмний засіб, що за даними ТА і рівняннями елементів формує систему рівнянь всієї ШВМ. Генератор рівнянь виконує матрично-векторні операції, які забезпечують подання рівнянь у формі, зручній для чисельного рішення. Для реалізації алгоритмів ГР доцільно використовувати пакет MATLAB, в якому вбудовані функції для матрично-векторних операцій.

Вирішувач рівнянь (ВР) – програмні засоби БО-мови Simulink, які реалізують алгоритм чисельного рішення, виконують блочне рішення сформованих рівнянь з використанням необхідного чисельного методу, а також візуалізацію результатів моделювання у наочній для користувача формі.

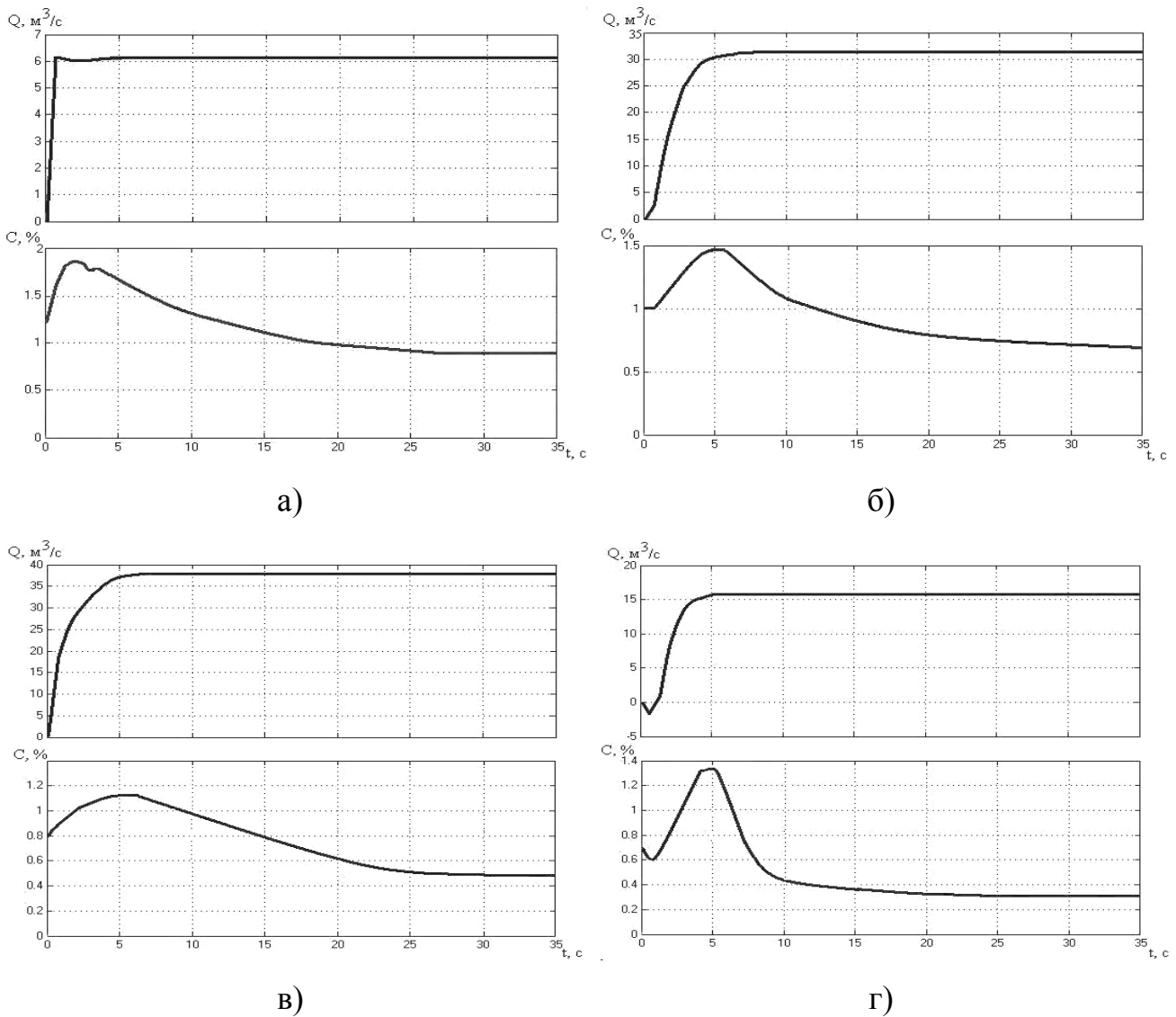


Рис. 3. Результати моделювання аерогазодинамічних процесів: а) для гілки № 326, б) для гілки № 418, в) для гілки № 562; г) для гілки № 630

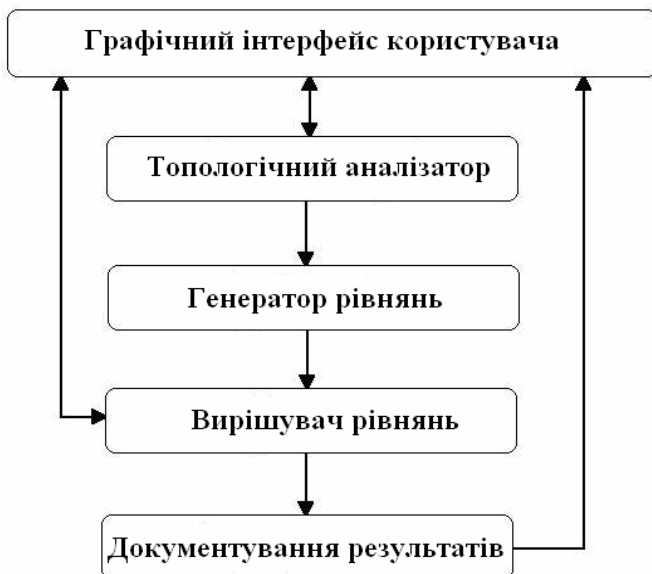


Рис. 4. Структура БО-симулятора ШВМ

У четвертому розділі „Структура та алгоритми функціонування системи автоматизації вентиляції шахт (САВШ)” сформульовано вимоги до САВШ, визначено її основні функції і розглянуто задачу оптимального безпечного керування провітрюванням ШВМ. Запропоновано структури і алгоритми функціонування САВШ.

1. Система автоматичного керування (САК) СПВД. На рис. 5 позначені наступні елементи:

1 – суматор; 2 – регулятор, 3 – двигун,

4 – редуктор, 5 – регулюючий орган; 6 – видобувна дільниця (об'єкт), 7 – датчик.

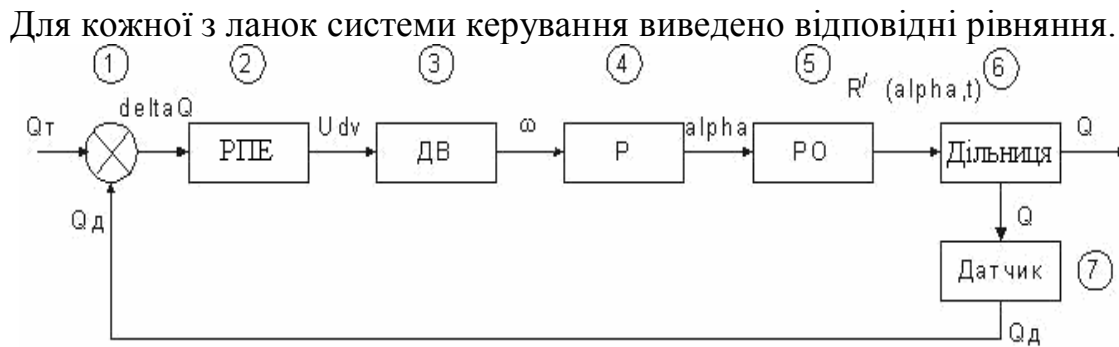


Рис.5. Структура системи автоматичного керування потоком повітря на дільниці

2. Багатозв'язна система автоматичного керування, в якій одночасно працює деяка множина систем керування, взаємопов'язаних між собою двома основними методами: через об'єкт керування; через інформаційні зв'язки. Структурну схему такої системи представлено на рис. 6.

3. Система автоматичного керування груповим регулятором витрати повітря (ГРВП) встановлюється на виробці, яка об'єднує кілька виробок, в яких встановлені дільничні регулятори. В ієрархічній структурі регуляторів автоматично вирішується завдання забезпечення необхідних витрат повітря при мінімальних витратах енергії на провітрювання за запропонованим алгоритмом (рис.7).

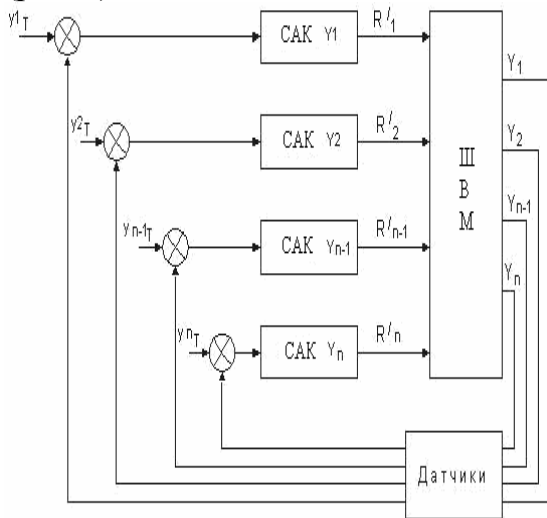


Рис.6. Структурна схема багатозв'язної системи керування

4. Централізована система, яка може функціонувати в режимах диспетчерського і автоматичного керування. У систему керування розподілом повітря входять: об'єкт керування; датчики витрати повітря; канали зв'язку; виконавчі пристрої регуляторів 1-го і 2-го рівнів (групових); дистанційно керований вентилятор головного провітрювання (ВГП). Виходами незмінної частини будуть витрати повітря  $Q$ , положення регулюючих органів всіх рівнів, величини депресій  $H$  ВГП. Основні операції з керування повинні виконуватися обчислювальним комплексом під контролем оператора.

У п'ятому розділі «Моделювання структур і алгоритмів САВШ» розроблено блочно-орієнтовані моделі САК дільничним регулятором, системи керування груповим регулятором, багатозв'язної системи та централізованої автоматичної системи керування. Централізовану автоматичну систему керування можна виділити в окремий модуль тренажера для гірничих диспетчерів (рис. 8). Виконано експерименти з моделювання різних ситуацій і отримано графіки витрат повітря  $Q(t)$  і концентрацій метану  $C(t)$ . На рис.9 показано реакцію

системи керування у найскладнішій ситуації – при зміні концентрацій метану на всіх ділянках і, відповідно, забезпечення їх необхідними витратами повітря.

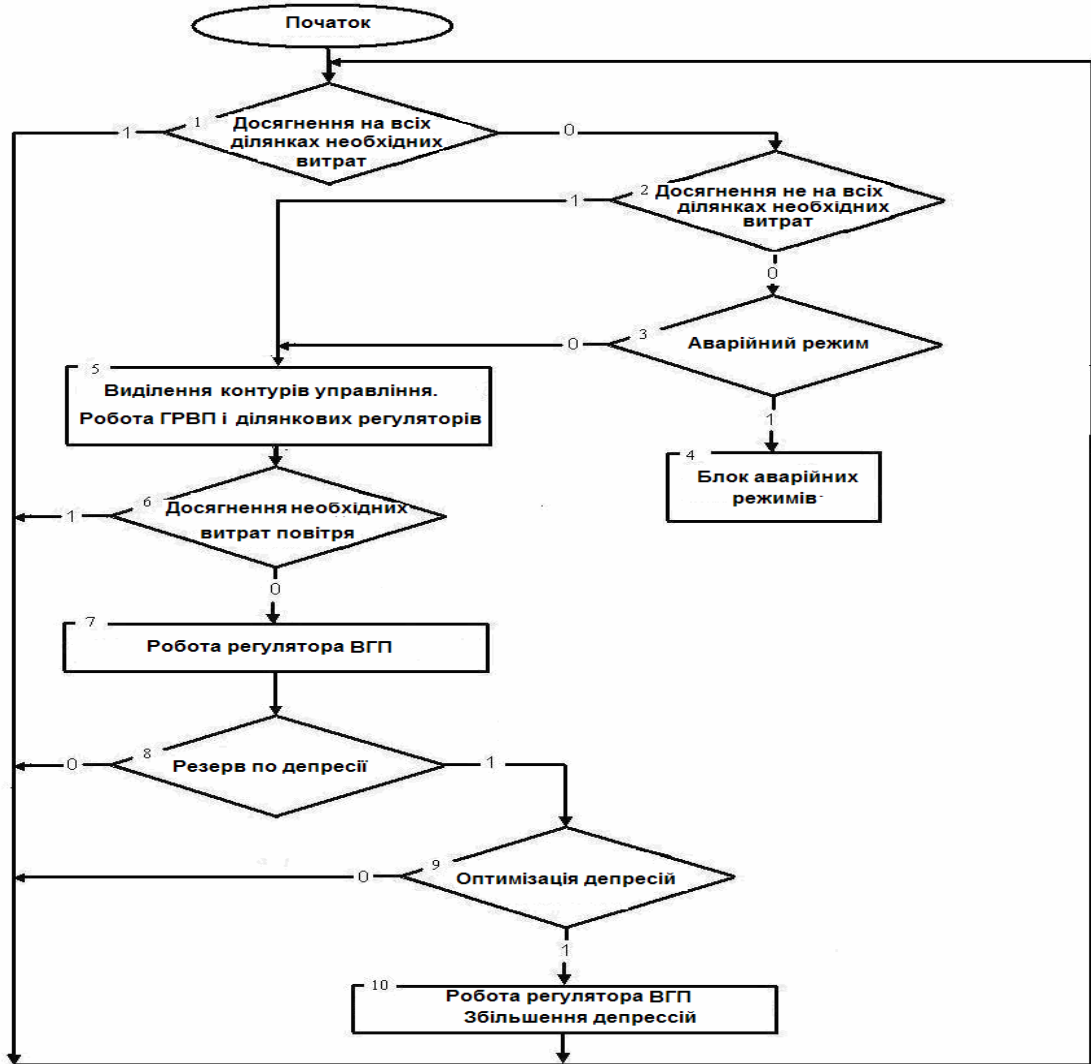


Рис.7. Блок-схема алгоритму автоматичного керування провітрюванням

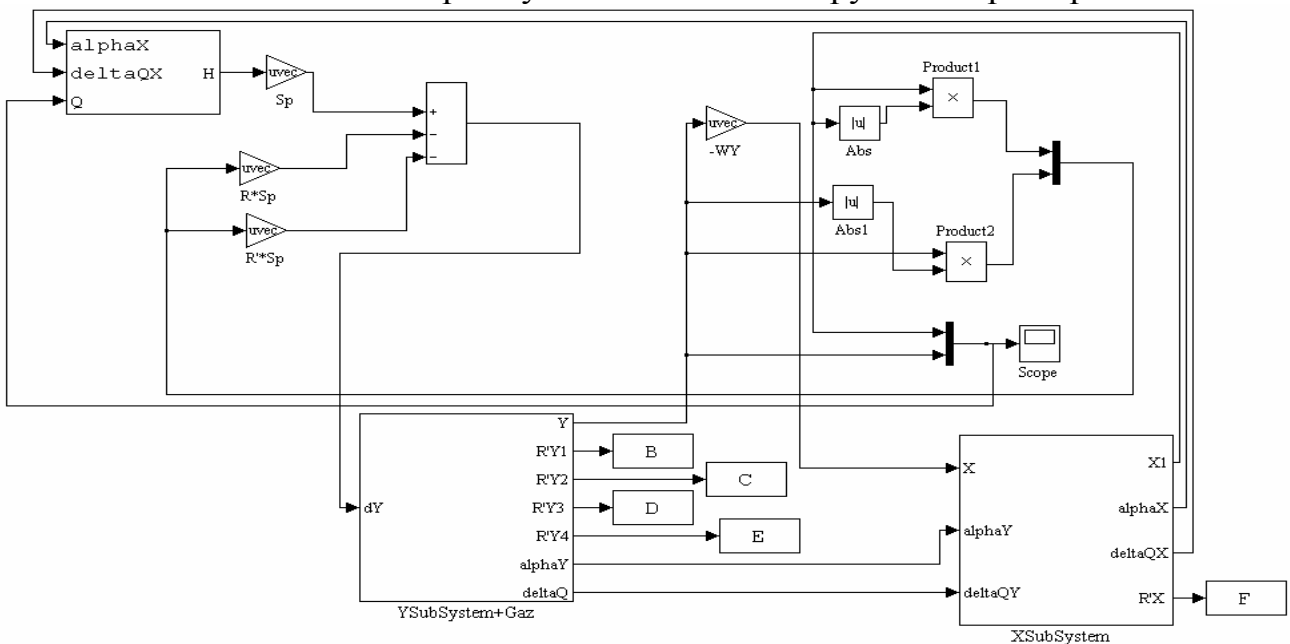


Рис.8. Блочно-орієнтована модель централізованої автоматичної системи керування

Результати дисертаційної роботи впроваджено в диспетчерську службу шахти ім. О. Ф. Засядька як клієнта моделюючого сервісного центру для вугільної промисловості і в якості модуля тренажера для гірничих диспетчерів.

Для забезпечення комп'ютерної підтримки всіх трудомістких процесів проектування та керування ШВМ, а також для підключення досліджуваної вентиляційної мережі до галузевого моделюючого сервісного центру розроблено проблемно-орієнтоване програмне забезпечення.

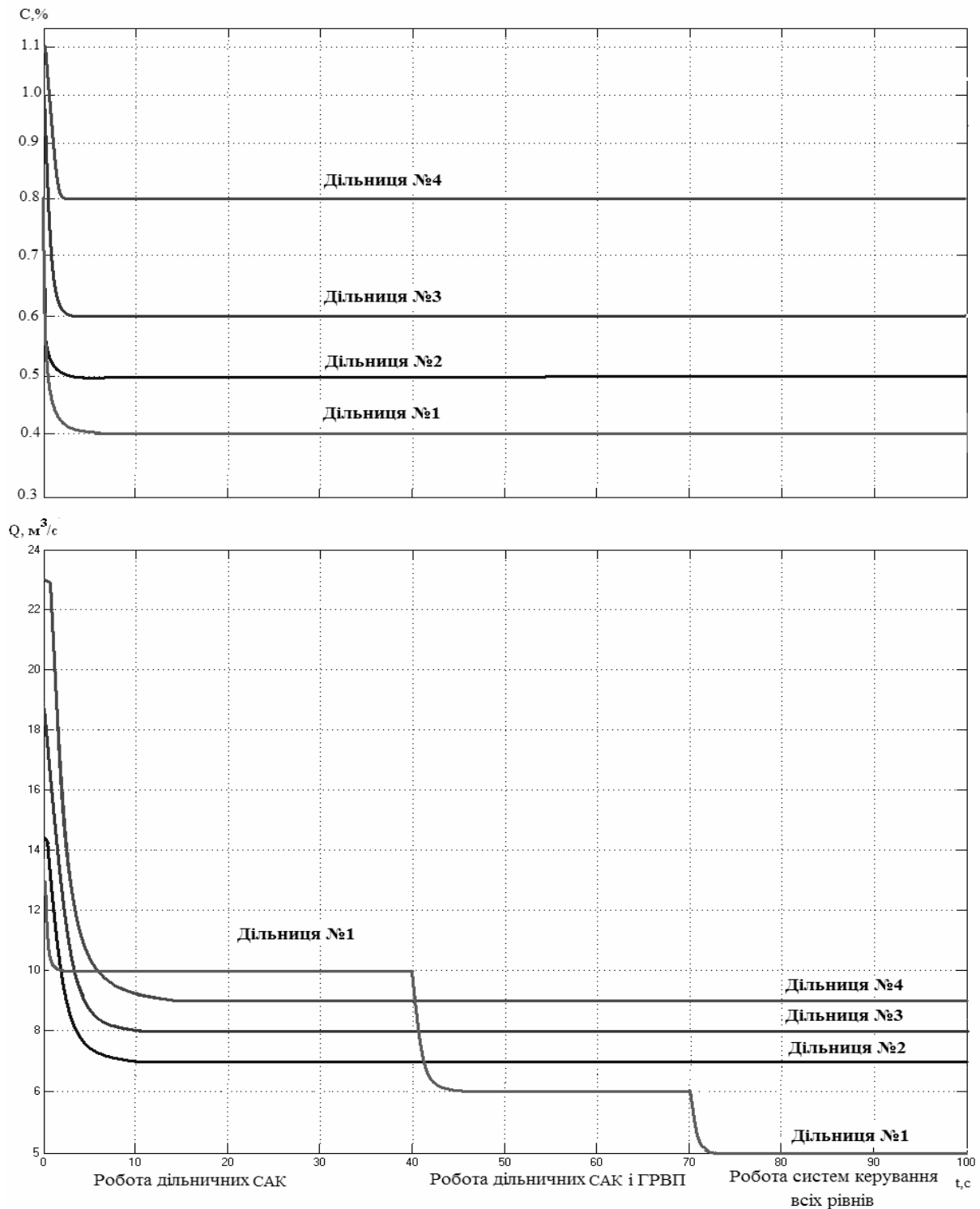


Рис.9. Результати моделювання централізованої автоматичної системи керування провітрюванням

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено нове рішення науково-практичної задачі, яка полягає у вдосконаленні системи автоматизованого керування розподілом повітря на основі моделей схем провітрювання видобувних дільниць і шахтної вентиляційної мережі, що враховують гірничо-технічні умови.

У дисертації отримані наступні результати:

1. Виведено системи рівнянь динаміки повітряних потоків і концентрацій метану в СПВД як об'єктах керування з урахуванням основних струменів, витіків, струменів підсвіжування, розташування регулюючих органів в умовах заданої шахти та урахуванням гірничо-технічних умов, що характеризуються змінністю складу виробок і їх параметрів у процесі розвитку гірничих робіт.

2. Розроблено методику формування рівнянь аерогазодинамічних процесів для шахтних вентиляційних мереж як об'єктів керування в матрично-векторній формі, що дозволить виконати Simulink-дослідження.

3. Запропоновано методику апаратно-програмної реалізації моделі ШВМ за допомогою блочно-орієнтованої мови Simulink і розроблених допоміжних програмних засобів, які підтримують всі етапи підготовки ШВМ до моделювання і безпосередньо самого моделювання.

4. Розроблено алгоритми функціонування системи автоматизації вентиляції шахти: САК СПВД, групового регулятора витрати повітря, багатозв'язної системи, диспетчерської і автоматичної систем керування повітряними потоками.

5. Розроблено та досліджено блочно-орієнтовані моделі функціонування алгоритмів запропонованих систем керування повітряними потоками ШВМ.

6. Експериментальну частину дисертації завершено побудовою діючого програмного забезпечення, що підтримує всі етапи побудови моделей ШВМ та керування повітряними потоками в мережі діючої шахти.

7. Результати досліджень використовуються для вирішення проблеми автоматизації вентиляції і для підключення шахти ім.О.Ф.Засядька як клієнта галузевого моделюючого сервісного центру, а також у навчальному процесі ДонНТУ.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК АВТОРА В РОБОТАХ, ОПУБЛІКОВАНИХ У СПІВАВТОРСТВІ

1. Завадская Т.В. Моделирование структур и алгоритмов управления системы автоматизации вентиляции шахт / Т. В. Завадская // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування». № 1 (10)-2(11), 2012. С. 188-199. ISSN 2074-7888.

2. Завадская Т.В. Блочно-ориентированная модель системы автоматического управления регуляторами расхода воздуха в шахтной вентиляционной сети [Текст] / Т.В. Завадская // Научно-технический журнал. Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – Вып. 7 (48).– С. 152-156 ISSN 1814-4225.

3. Смагин А.Н. Моделирование промышленных шахтных вентиляционных сетей [Текст] / А.Н. Смагин, Т.В. Завадская, Д.В. Надеев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» (МАП-2010). – 2010. – Вип. 8 (168). С. 15-23. ISSN 2074-7888.

4. Завадская Т.В. Учет горно-технических условий при построении математических моделей газодинамических процессов в схемах проветривания выемочных участков шахт [Текст] / Т.В. Завадская, А.М. Чут // Наукотехнічний журнал. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – Вип. 5 (132). – С. 98-103 ISSN 1814-4225.

5. Завадская Т.В. Блочно-ориентированная модель системы многосвязного управления воздухораспределением в шахтной вентиляционной сети [Текст] / Т. В. Завадская // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем» (МАП-2008). – 2008. – Вип. 7 (150). С. 104-115. ISSN 2074-7888.

6. Завадская Т.В. К разработке математических моделей схем проветривания выемочных участков [Текст] / Т. В. Завадская // Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю. – 2008. С. 115-120. ISSN 1999-981X.

7. Завадская Т.В. Блочно-ориентированная модель газодинамических процессов в схемах проветривания участков [Текст] / Т. В. Завадская // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем» (МАП-2007). – 2007. – Вип. 6 (127). С. 122-128. ISSN 2074-7888.

8. Завадская Т.В. Моделирование систем управления вентиляцией шахт [Текст] / Т.В. Завадская // Промышленная безопасность и вентиляция подземных сооружений в 21 столетии: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Донецкого национального технического университета. – Донецк: ДонНТУ. – 2011. – С. 107-111.

9. Смагин А.Н. Моделирование промышленных шахтных вентиляционных сетей [Текст] / А.Н. Смагин, Т.В. Завадская, Д.В. Надеев // Донбас 2020: наука і техніка виробництву: Матеріали 5 науково-практичної конференції. – Донецьк, ДонНТУ, 2010. – С. 480-484.

10. Смагин А.Н. Параллельное моделирование шахтных вентиляционных сетей [Текст] / А.Н. Смагин, Т.В. Завадская, Д.В. Надеев // Материалы международной научной конференции «МОДЕЛИРОВАНИЕ-2010». – Киев, Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова, 2010. – С. 60-67.

11. Завадская Т.В. К разработке математических моделей схем проветривания выемочных участков [Текст] / Т.В. Завадская // Донбас 2020: наука і техніка виробництву: Матеріали 4 науково-практичної конференції. – Донецьк, ДонНТУ, 2008. – С. 41-47.

12. Завадская Т.В. Математическое описание схем проветривания выемочных участков шахт с учетом горно-технических условий [Текст] / Т.В. Завадская // Донбас 2020: наука і техніка виробництву: Матеріали 4 науково-практичної конференції. – Донецьк, ДонНТУ, 2008. – С. 428-431.



13. Завадська Т.В. Модельна підтримка розробок систем управління вентиляцією шахт з урахуванням горно-технічних умов [Текст] / Т.В. Завадська, В.А. Святний // Інформатика та комп'ютерні технології – 2007: Матеріали 3 науково-технічної конференції молодих учених та студентів. – Донецьк, ДонНТУ, 2007. – С. 456-457.

Роботи [1,2,5-8,11,12] написані без співавторів. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: у публікації [4] аналіз схем провітрювання видобувних ділянок, класифікація структурних схем провітрювання, виведення систем рівнянь газодинамічних процесів, розробка блочно-орієнтованої моделі і аналіз отриманих результатів; в роботах [3,9,10] – дослідження характеристик і експериментальне дослідження паралельної моделі ШВМ шахти ім. О. Ф. Засядька; в [13] визначення області та об'єкта дослідження, визначення властивостей ШВМ як об'єкта керування і розробка структурних схем провітрювання в залежності від типу СПВД.

## АНОТАЦІЇ

**Завадська Т.В. Модельна підтримка розробок систем керування вентиляцією шахт із урахуванням гірничо-технічних умов.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2013.

Дисертація присвячена розробці автоматизованої централізованої системи керування вентиляцією шахт (на прикладі вентиляційної мережі шахти ім.О.Ф.Засядька). Розробка системи проводилася поетапно із застосуванням сучасних засобів блочно-орієнтованого (БО) моделювання. На першому етапі розробки системи керування діляничним регулятором було представлено структурну схему видобувної ділянки як об'єкта керування провітрюванням і запропоновано БО-модель керування витратою повітря. На другому етапі досліджено структуру та принципи функціонування системи керування груповим регулятором. На основі цих досліджень вперше розроблено блочно-орієнтовану модель такої системи. БО-модель регулювання вентиляторами головного провітрювання розроблено на третьому етапі. Всі моделі керування підключені в БО-модель реальної, діючої шахтної вентиляційної мережі (ШВМ).

Для забезпечення комп'ютерної підтримки всіх трудомістких процесів проектування та керування ШВМ, а також для підключення досліджуваної ШВМ до моделюючого сервісного центру вугільної промисловості розроблено проблемно-орієнтоване програмне забезпечення.

**Ключові слова:** шахтна вентиляційна мережа, модель, блочно-орієнтована модель, математична модель, моделювання, система керування, регулятор.

**Завадская Т.В. Модельная поддержка разработок систем управления вентиляцией шахт с учетом горно-технических условий.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2013.

Диссертационная работа посвящена разработке автоматизированной централизованной системы управления вентиляцией шахт (на примере вентиляционной сети шахты им.А.Ф.Засядько) с применением современных средств блочно-ориентированного моделирования. Практика разработки систем управления проветриванием для конкретных шахт показала, что одной из основных задач в таких проектах является учет особенностей горно-технических условий. В работе были проанализированы схемы проветривания выемочных участков (СПВУ), которые используются на шахте им.А.Ф.Засядько и на основе этого предложены структурные схемы двух типов. Составлены математические модели динамики аэрогазодинамических процессов, происходящих на участке, с учетом горно-технических условий. На основе математических моделей СПВУ предложено описание шахтой вентиляционной сети (ШВС) как объекта управления. Это описание включает представление топологии (ориентированный граф, который отражает связи между ветвями и узлами, а также указывает на размещение вентиляторов) и уравнения аэрогазодинамических процессов. Исследовано быстродействие моделирования аэродинамических процессов в сети в зависимости от использования разных вычислительных ресурсов. Построение моделей, отражающих аэрогазодинамические процессы в СПВУ и ШВС, производилось с помощью блочно-ориентированного (БО) языка моделирования Simulink.

Для эффективного управления проветриванием в работе предложено связать между собой все компоненты ШВС с помощью единой системы автоматизации вентиляции шахты. Предложена базовая структура управления расходом воздуха в одной ветви, которая состоит из определителя разницы между требуемым значением расхода воздуха в ветви и значением, полученным от датчика расхода воздуха; релейного усилительного элемента; двигателя; редуктора; регулирующего органа; выемочного участка; датчика. Каждое из звеньев системы управления выполняет определенную функцию и описывается соответствующим уравнением. Устойчивость системы проверялась при помощи БО-модели и подбора параметров. По горно-техническим условиям сложных ШВС предложены и исследованы структура и принципы функционирования системы управления с групповыми регуляторами. Входами системы являются управляющие воздействия на приводы участковых регуляторов расхода воздуха, групповых регуляторов расхода воздуха и регуляторов вентилятора главного проветривания (ВГП). На основе этих исследований впервые разработана блочно-ориентированная модель такой системы. Регулирование вентиляторов главного проветривания достигается путем изменения скорости вращения двигателя, разработана соответствующая блочно-ориентированная модель и проведены

эксперименты по исследованию работоспособности описанных выше систем. Предложены алгоритмы диспетчерского и автоматического управлений. Впервые разработана БО-модель централизованной автоматической системы управления, в которую подключены все модели управления расходами воздуха в сети.

Для обеспечения компьютерной поддержки всех трудоемких процессов проектирования и управления ШВС, а также для подключения исследуемой ШВС к моделирующему сервисному центру угольной промышленности разработано проблемно-ориентированное программное обеспечение.

**Ключевые слова:** шахтная вентиляционная сеть, модель, блочно-ориентированная модель, математическая модель, моделирование, система управления, регулятор.

**Zavadskaya T.V. Modeling support for the design process of coal mines ventilation control systems with regard to mining technical specifications. – Manuscript.**

Thesis for a candidate's degree on speciality 05.13.07 – control processes automation. State Higher Educational Institution "Donetsk National Technical University", Donetsk, 2013.

PhD thesis is devoted to development of the coal mines ventilation automated centralized control system (on the example of the coal mines ventilation network of A.F.Zasyadko). System development carried out in stages with the use of modern means of block-oriented (BO) modeling. At the first development stage of the local regulator control system was submitted the structure chart of an as excavation area as control object by airing and the consumption of air block-oriented control model is offered. At the second stage the structure and the principles of control system functioning were investigated by the group regulator, on the basis of these researches the block-oriented model of these system is developed for the first time. The BO-regulation model of the main ventilation fans is developed at the third stage. All models of air volume control connected to the BO-model of a real acting.

To provide computer support all-consuming processes of coal mine ventilation network design and control, as well as to connect to the modeling service center of the coal industry developed problem-oriented software.

**Keywords:** coal mine ventilation network, model, block-oriented model, mathematical model, modeling, control system, regulator.