

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ  
КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ СВЕРДЛОВИННОЇ ШТАНГОВОЇ НАСОСНОЇ  
УСТАНОВКИ**

Методи контролю вібрацій скважинної штангової насосної установки (СШНУ) являються неідеальними. Наприклад, це стосується руйнування зубчастих пар редукторів СШНУ, ці явища досить часто трапляються в повсякденній практиці. Для покращення контролю вібрацій СШНУ мобільною системою контролю (МСК) запропоновано підвищити точність контролю з використанням методу компенсації урівноважуючим сигналом від шумів за допомогою використання МСК. Точність запропонованого методу визначається стабільністю роботи зворотного зв'язку, вхідного і вихідного елементів МСК. З метою підвищення надійності контролю вібрації сигнал поступаючий порівнюють з компенсуючим сигналом, причому порівняння здійснюється методом перетворення (компенсації) сигналу, який урівноважує з допомогою гнучкої зворотного зв'язку, в результаті чого відбувається компенсація похибок. МСК підвищує точність контролю завдяки підключенню датчиків до МСК, виконаного за компенсаційною схемою (з зворотним перетворювачем і перетворювачем неідеальності). Були проведені дослідження експериментальної МСК, що підтверджують правильність рішення.

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF MOBILE CONTROL SYSTEM OF  
VIBRATION OF THE HOLE SUCKER-ROD PUMP UNIT**

Today, methods of vibration control of the sucker-rod pumping units (SRPU) are imperfect. In particular, it concerns destruction of the reducer gear pairs in the SRPU, which very often occurs in daily practice. To improve the SRPU vibration control, it is proposed to upgrade accuracy of control by using method of interference compensation by counterbalance signal with the help of mobile control systems (MCSs). The accuracy of this method is determined by stability of the MSC feedback and input and output elements. In order to improve reliability of the vibration control, incoming signal is compared with compensating signal. The comparison is carried out by transformation (compensation) of the signal which is counterbalanced through the flexible feedback resulting in error compensation. The MCS improves the control accuracy thanks to the sensors connected to the MCS by compensation scheme (with the inverse converter and disbalance converter). The experimental MSC was tested, and it confirmed correctness of the solution.

Видобування нафти за допомогою свердловинної штангової насосної установки (СШНУ) охоплює понад 65% діючого фонду свердловин в Україні. Більша частина СШНУ експлуатується понад нормативний термін (20-30 років), мають місце численні відмови і аварії, кількість яких постійно зростає. В роботі [1] розглядаються діагностичні моделі, методи та засоби діагностування технічного стану СШНУ. Описано основні принципи побудови систем контролю стану СШНУ, та показано, що методи контролю вібрацій СШНУ не є досконалими. Методи контролю вібрацій СШНУ є недосконалими. Наприклад, це стосується руйнування зубчастих пар редукторів СШНУ, ці явища досить часто трапляються в повсякденній практиці. Тому актуальною є проблема визначення стану СШНУ за непрямими ознаками. При цьому серед великого числа непрямих ознак треба вибрати такі, які дозволили б знаходити стан СШНУ з достатньою мірою точності. Практичним критерієм придатності ознаки - сигналу

служить задовільний зв'язок його з параметрами стану СШНУ. Наприклад, елементи зношеного редуктора СШНУ, робота яких супроводжується ударами, можна вважати джерелами збурення. Для вдосконалення контролю вібрацій СШНУ мобільною системою контролю (МСК) запропоновано підвищити точність контролю з використанням методу компенсації сигналом, що врівноважує від завад, за допомогою використання МСК. Точність запропонованого методу визначається стабільністю роботи зворотного зв'язку, вхідного і вихідного елементів МСК. З метою підвищення достовірності контролю вібрації сигнал, що надходить, порівнюють з сигналом, що компенсує, причому порівняння здійснюється методом компенсації сигналу, який врівноважує, за допомогою гнучкого зворотного зв'язку, в результаті чого відбувається компенсація похибок. МСК підвищує точність контролю завдяки підключенню датчиків, що виконано по компенсаційній схемі (із зворотним перетворювачем і перетворювачем нерівноваги). Були проведені дослідження експериментальної МСК, які підтверджують правильність рішення. Для вдосконалення контролю вібрацій СШНУ МСК пропонується [2] підвищити точність контролю з використанням методу компенсації завад. Точність методу [2] в основному визначається стабільністю роботи ланки зворотного зв'язку, вхідного і вихідного елементів схеми. З метою підвищення достовірності контролю вібрації сигнал, що поступає, порівнюють з сигналом, який компенсує, причому порівняння здійснюється за методом компенсації сигналу, який врівноважується, за допомогою зворотного зв'язку, в результаті чого відбувається компенсація похибок, а пристрій підвищує точність контролю завдяки підключення акселерометрів до блоку реєстрації МСК, яке виконане за компенсаційною схемою із зворотним перетворювачем і перетворювачем нерівноваги.

Відмінними рисами використання методу компенсації сигналу є наявність зворотного перетворення вихідної величини у величину, однорідну з вхідною величиною, і їх взаємне урівноваження з тією або іншою мірою точності. Характерною для цього випадку є особлива структура пристрою контролю вібрації: у структурі обов'язково повинен міститися зворотний перетворювач, вихідна величина якого врівноважує вимірювану величину, і перетворювач нерівноваги (нуль-орган або орган порівняння), який виявляє величину і знак відхилення від рівноваги [2].

Принцип компенсації похибки може виконуватися з астатичною і статичною системами урівноваження, а також з комбінованою системою урівноваження [3]. Принцип компенсації похибки заснований на тому, що дія завад на акселерометр залишається, але її вплив обчислюється (у нашому випадку процесором блоку реєстрації МСК), а похибка компенсується.

У винаході [2] пропонується об'єднати ефект компенсації для обох видів перешкод. Виконано це за рахунок гнучкого від'ємного зворотного зв'язку кожного акселерометра з МСК, за допомогою індивідуальних зворотних перетворювачів і перетворювачів нерівноваги на базі сучасних цифрових технологій.

Суть компенсації похибки в запропонованому методі полягає в тому, що (рис.1) сигнал акселерометра (1), рівний  $A_a$ , та вихідний сигнал зворотного пе-

ретворювача (3) рівний  $A_y$ , порівнюють, виявляють ступінь нерівноваги (різниця величин, що врівноважують,  $A_a$  й  $A_y$ ) рівну  $\pm\Delta A$  і як керуючий сигнал подають на вхід перетворювача нерівноваги (2), який за сигналом  $\pm\Delta A$  обробляє вихідний сигнал Б, який подають у блок реєстрації (4) і одночасно на вхід зворотного перетворювача (3), який по сигналі Б виробляє вихідний сигнал, що врівноважує  $A_y$ .

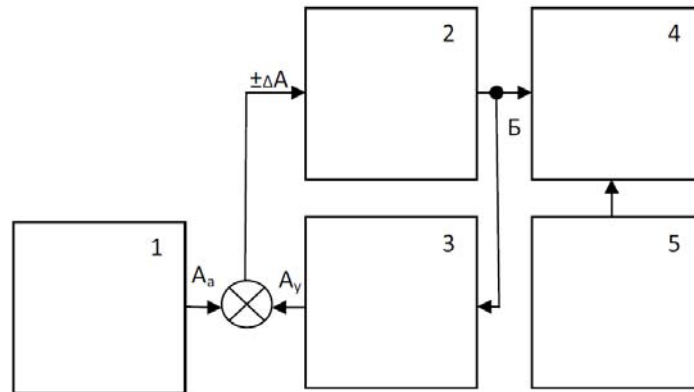


Рис.1 - Схема компенсації погрішності в пропонованому методі для окремого акселерометра МСК

Таким чином (рис.1) реалізується гнучкий зворотний зв'язок вихідного сигналу акселерометра (1), рівного  $A_a$ , і вихідного сигналу зворотного перетворювача (3) рівного  $A_y$ , що охоплює весь пристрій. Для підвищення точності вібраційного контролю сигнал П датчика положення (5) подають у блок реєстрації (4) паралельно із сигналом Б.

У нашому пристрої (рис. 2) цифровий акселерометр (1) через стандартний порт і фідерно-кабельне з'єднання з'єднаний із процесором МСК (5). Функціонально перетворювач нерівноваги, зворотний перетворювач, блок реєстрації виконані у вигляді драйвера, інтерфейсу й програмного забезпечення для процесора МСК (5). Весь пристрій має автономне джерело електропостачання (6). Для підвищення точності вібраційного контролю кожен акселерометр обладнаний датчиком положення (7), що з'єднаний із процесором (5).

Суть компенсації завад у пропонованому пристрої (рис.2 ) полягає в тому , що вихід цифрового акселерометра (1), вихід зворотного перетворювача (3) з'єднані із входом перетворювача нерівноваги (2), а цифровий вихід перетворювача нерівноваги (2) з'єднаний із цифровими входами зворотного перетворювача (3) і блоку реєстрації (4).

Похибка пропонованого пристрою контролю [2] складається з трьох складових: похибки акселерометра (1)  $\beta_a$ , похибки індивідуального зворотного перетворювача (3)  $\beta_{on}$ , похибки блоку реєстрації (4)  $\beta_{op}$ .

Коло перетворення, що врівноважує, складається з двох самостійних кіл (рис.2):

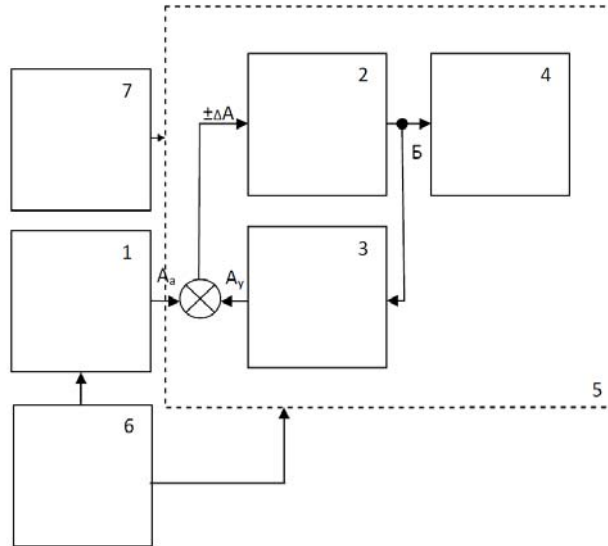


Рис.2 - Схема компенсації завад в пропонованому пристрої для окремого акселерометра МСК

- перетворювача нерівноваги (від  $\Delta A$  до  $B$ ) з коефіцієнтом передачі  $K$ ;
- зворотного перетворення (від  $B$  до  $A_y$ ) з коефіцієнтом передачі  $\alpha$ .

Введемо для характеристики роботи цих кіл і роз'яснення принципу роботи компенсаційної схеми в пропонованому пристрої контролю наступні позначення:

- $A_a$  – вхідна, перетворювана або вимірювана величина;
- $A_y$  – вихідний сигнал зворотного перетворювача;
- $B$  – вихідна величина перетворювача нерівноваги;
- $K$  –  $B/\Delta A$  – коефіцієнт кола перетворювача нерівноваги;
- $\alpha$  –  $A_y/B$  – коефіцієнт кола зворотного зв'язку;
- $A_y/\Delta A = K \alpha$  – глибина зрівноваження;
- $\gamma = \Delta A/A_a$  – відносна нерівновага;
- $\zeta = A_y/A_a$  – відносна глибина зрівноваження.

При використанні вищенаведених позначень робота компенсаційної схеми (рис.2) описується наступними рівняннями:

$$A_a = A_y + \Delta A; \quad A_y = B\alpha; \quad B = \Delta AK.$$

З цих рівнянь виходить, що відносна нерівновага компенсаційної схеми

$$\gamma = \Delta A / A_a = \Delta A / (\Delta A + A_y) = 1/[1 + K\alpha];$$

відносна глибина урівноваження компенсаційної схеми

$$\zeta = A_y/A_a = A_y/(\Delta A + A_y) = (K \alpha) / [1 + (K\alpha)] = 1 + \gamma,$$

таким чином чутливість компенсаційної схеми

$$S = B/A_a = (\Delta AK)/A_3 = \gamma K = K/[1+(K\alpha)].$$

З отриманого виразу виходить, що чутливість компенсаційної схеми виявляється в  $1+(K\alpha)$  разів менше чутливості кола перетворювача нерівноваги компенсаційної схеми. Це показує, що приблизно на таке ж число  $1+(K\alpha)$  зменшується результуюча похибка перетворення  $A_v$  в  $B$ . Як відомо, ця похибка складається з адитивних і мультиплікативних складових перетворювачів МСК.

При використанні тільки астатичного урівноваження процес урівноваження продовжується до тих пір, поки вираз  $A_a - A_v = \Delta A$  не стане менше величини  $\Delta A_u$  - порогу чутливості зворотного перетворювача. Нехтуючи величиною  $\Delta A_u$ , похибка в цьому випадку

$$\xi_c = \xi_a + \Delta A_u/A,$$

де  $\xi_c$  – похибка кола перетворювача нерівноваги компенсаційної схеми,  $\xi_a$  – похибка перетворювача,  $\Delta A_u/A$  – відносна величина порогу чутливості,  $A$  – значення вимірюваного прискорення.

Явно видно недолік схеми, що виявляється в обмеженому порозі чутливості  $\Delta A_u$ . Таким чином, відносна похибка зростала б обернено пропорційно до значення вимірюваної величини прискорення. У нашому випадку, збільшуючи глибину урівноваження  $K\alpha$ , можна істотно зменшити частку похибки, тому  $K\alpha$  є характерним показником якості пропонованого пристрою, чим більше  $K\alpha$ , тим вище точність. Для отримання ідеальної точності необхідно, щоб  $\xi_a \rightarrow 0$ , тобто використання мінімальної кількості перетворюючих ланок в колі зворотного перетворювача.

Давачі кріпляться на вузлі контрольованої СШНУ так, щоб вони могли сприймати вібрацію (удари), наприклад, в двох взаємно перпендикулярних горизонтальних напрямках. Можлива установка і трьох акселерометрів, зорієнтованих в тривимірному просторі або 3-координатного акселерометра. У цьому варіанті можливе визначення напрямів ударів в тривимірному просторі – в двох горизонтальних напрямках і додатково у вертикальному.

Коливання кожного давача перетворюють в індивідуальному зворотному перетворювачі і порівнюють в перетворювачі нерівноваги, який виявляє величину і знак відхилення від рівноваги і коректує (змінює) сигнал до здобуття відповідності вихідною і вхідною контрольованими величинами. Цей принцип застосовний для усунення як адитивних, так і мультиплікативних завод. Його перевага полягає в тому, що він може бути використаний тоді, коли завади не можуть бути визначені.

Після установки апаратури контролю на вузлі контрольованої свердловинної насосної установки проводять її тарування. Для цього в місцях кріплення давачів завдають удари відомої величини по напрямках дії давачів та фіксують величини на МСК. За величиною сили удару і величиною амплітуди першої га-

рмоніки коливань давачів, що записана на МСК, визначають ціну ділення шкали МСК. Для кожного давача визначають фазування, тобто відповідність напрямку удару фазі записаної амплітуди першої гармоніки на МСК.

При вібраційному контролі СШНУ ударні навантаження відсутні, і вібрація має плавний характер. По мірі зносу устаткування СШНУ при русі механізмів відбуваються ударні навантаження. Чим більше знос механізмів, тим більші удари і тим сильніші вібрації, що вони збуджують. Наприклад, це стосується руйнувань зубчастих пар редукторів СШНУ [4], ці явища досить часто мають місце, що вказує про нестачу існуючих методів контролю редукторів СШНУ. Ці вібрації сприймаються давачами (акселерометрами) і перетворюються в електричні затухаючі коливання, частота кожного з яких визначається власною частотою механічних коливань.

Вироблені акселерометрами коливання подають в МСК, де коливання кожного акселерометра записуються діаграмами. За записаними діаграмами визначають силу удару по величині амплітуди першої гармоніки електричних коливань акселерометра і ціні ділення шкали реєстратора. Звіряючи діаграми з результатами тарування, визначають напрям удару в контрольованому механізмі СШНУ. Наприклад, при фазі першої амплітуди першої гармоніки, що дорівнює  $180^\circ$ , удар відбувається зліва, при  $0^\circ$  - справа. Коли відсутній сигнал від другого акселерометра, напрям удару збігається з віссю першого акселерометра, і навпаки, коли відсутній сигнал першого акселерометра, напрям удару збігається з віссю другого акселерометра. При значній незбіжності напрямку удару з напрямками осей акселерометрів контроль ведуть за свідченнями двох акселерометрів із співвідношень:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2},$$

$$A_2/A_1 = \sin\varphi_1 / \sin\varphi_2,$$

$$\varphi = \arctg A_2/A_1,$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 90^\circ,$$

де  $A_1$  – перша амплітуда першої гармоніки коливань першого акселерометра;  $A_2$  – перша амплітуда першої гармоніки коливань другого акселерометра;  $\varphi_1$  – кут між віссю напрямку удару і віссю спрямованості першого акселерометра;  $\varphi_2$  – кут між віссю напрямку удару і віссю спрямованості другого акселерометра.

Простота співвідношень дозволяє повністю автоматизувати процес обробки МСК.

Функціонально зворотний перетворювач, перетворювач нерівноваги і блок реєстрації можуть бути виконані на базі комп'ютера з відповідним інтерфейсом і програмним забезпеченням. При досить малому порозі чутливості перетворю-

вача нерівноваги досягається майже повна рівновага, і похибка пристрою контролю вібрації визначається майже виключно похибкою перетворювачів, тобто комп'ютера пристрою контролю вібрації.

Наприклад, нехай ударні вібрації виникають в контрольованому вузлі з боку, протилежного місцю кріплення акселерометрів (уздовж осі другого акселерометра). Перший акселерометр не вироблятиме сигнал, а працюватиме лише другий акселерометр. Наявність сигналу другого акселерометра говорить про те, що удари відбуваються в поперечному напрямі контрольованого вузла. Отримані дані передають ремонтній бригаді, де вказують силу і частоту удару, його напрям і місце виникнення (що визначають за давачем положення), а також те, що удар прогресує і несе небезпеку руйнування деталей. Якщо удар не прогресує і незначний за величиною, оператор-контролер (комп'ютер) може прийняти рішення про продовження роботи. Таким чином, за величинами першої амплітуди і фази першої гармоніки, записаними залежно від місця розташування контрольованого вузла СШНУ, та їх змінам під час експлуатації, судять про технічний стан вузла, величину зношування, якість кріплення, тощо - виконуються вібраційний контроль СШНУ.

Були проведені дослідження експериментальної МСК, які підтверджують правильність нашого рішення у винаході [2].

Конструктивно чуттєвий елемент інтегрального акселерометру експериментальної МСК типу ADXL150 [5] являє собою диференціальну конденсаторну структуру з повітряним діелектриком. Інерційна маса при наявності прискорення зміщується щодо іншої частини кристала полікрем'яної плівки акселерометра, утворюючи рухливу обкладку конденсатора змінної ємності. Розтяжки, що утримують у висячому положенні інерційну масу, є механічними пружинами постійної пружності, які обмежують переміщення спробної маси і її повернення у вихідне положення. Акселерометр типу ADXL150 є, по суті, неповним сучасним аналогом МП-95 [4], тобто сила інерції при впливі прискорення врівноважується пружною силою пружини  $F = kx$ , де  $k$  - жорсткість пружини розтяжки інерційної маси,  $x$  - переміщення інерційної маси  $m$  щодо вихідного стану. Звідси випливає, що лінійне прискорення  $a = x(k/m)$ , причому  $k/m$  - характеристичний (конструктивний) параметр інтегрального акселерометру МСК типу ADXL150. Однак у ADXL150, як і у пізніх моделях акселерометрів типу ADXLxxx компанії Analog Devise, відсутній зворотний негативний зв'язок, якій потрібен заради зменшення похибки контролю вібрації МСК. Для підтвердження сказаного проведемо експеримент.

Акселерометр типу ADXL150 експериментальної МСК був жорстко закріплений на одному з кінців сталевого стрижня конструкції свердловинної штангової насосної установки (СШНУ) довжиною приблизно 1,6 м, що переміщається з великими прискореннями на відстань 0,4 м. Унаслідок пружності стрижня це переміщення супроводжується вібрацією досить великої амплітуди з частотою приблизно 300 Гц.

На рис. 3 приведений графік залежності швидкості від часу акселерометра типу ADXL150 експериментальної МСК. Швидкість контролюється, коли пе-

реміщення супроводжується вібрацією досить великої амплітуди з частотою 300 Гц 12-розрядним АЦП МСК із частотою вибірки 1000 Гц. Графік швидкості є результатом чисельного інтегрування цих даних методом трапецій. На початку і наприкінці інтервалу спостереження (0–0,9 с) швидкість акселерометра дорівнює нулю. На графіку швидкості (рис. 3), крапки якого розраховані за даними акселерометра типу ADXL150, похибка кінцевого значення швидкості складала приблизно 1,3 м/с при максимальній швидкості 3,4 м/с. Похибка кінцевого значення швидкості складала 38,2%.

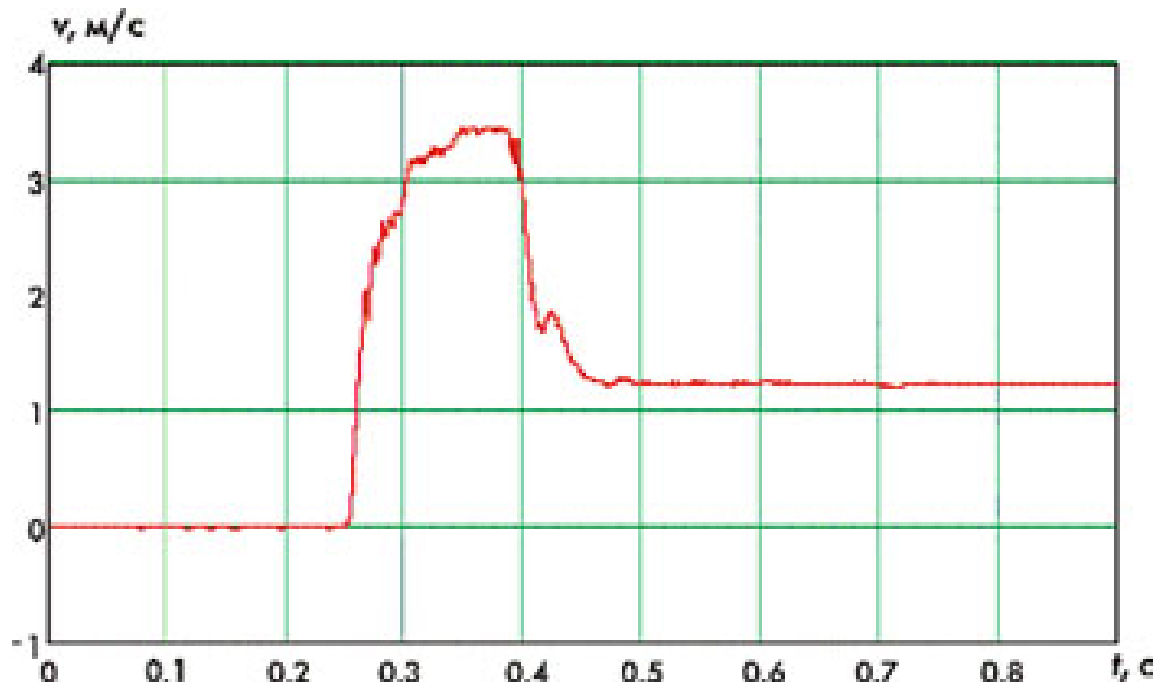


Рис. 3 - Графік швидкості обмірюваної інтегральним акселерометром МСК типу ADXL150 при вібрації 300Гц.

На рис. 4 приведений графік лінійного прискорення, коли переміщення сталевго стрижня конструкції СШНУ супроводжується вібрацією досить великої амплітуди з частотою 300 Гц 12-розрядним АЦП МСК із частотою вибірки 1000 Гц, отриманий безпосереднім зчитуванням сигналу акселерометра.

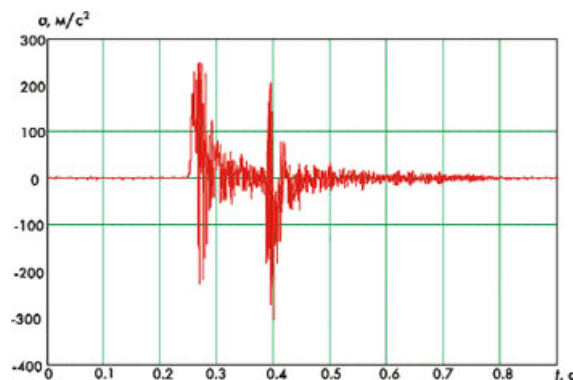


Рис. 4 - Графік прискорення обмірюваного інтегральним акселерометром МСК типу ADXL150 при вібрації 300Гц.



Акселерометр типу ADXL150 експериментальної МСК був жорстко закріплений на більш твердій конструкції СШНУ при подібних параметрах вібрації.

На рис. 5 приведений графік прискорення акселерометру типу ADXL150 МСК 12-розрядним АЦП із частотою вибірки 1000 Гц, отриманий безпосереднім зчитуванням сигналу. Переміщення супроводжуються значно меншою подовжньою вібрацією. Як бачимо, похибка визначення прискорення значно зменшилася.

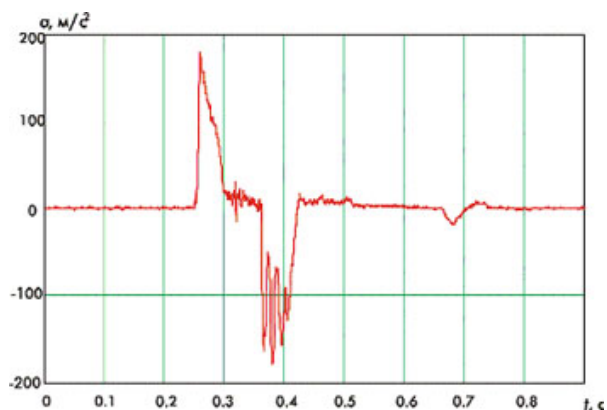


Рис. 5 - Графік прискорення обмірюваного інтегральним акселерометром МСК типу ADXL150 при зниженій вібрації.

На рис. 6 - графік швидкості обмірюваної інтегральним акселерометром типу ADXL150 експериментальної МСК з 12-розрядним АЦП із частотою вибірки 1000 Гц. Графік швидкості одержано чисельним інтегруванням методом трапецій. На початку і наприкінці інтервалу спостереження (0–0,9 с) швидкість акселерометра дорівнює нулю. На графіку швидкості (рис. 6), крапки якого розраховані за даними акселерометра типу ADXL150, похибка кінцевого значення швидкості зменшилася в багато разів.

Похибка кінцевого значення швидкості акселерометра типу ADXL150 складала менше 5%.

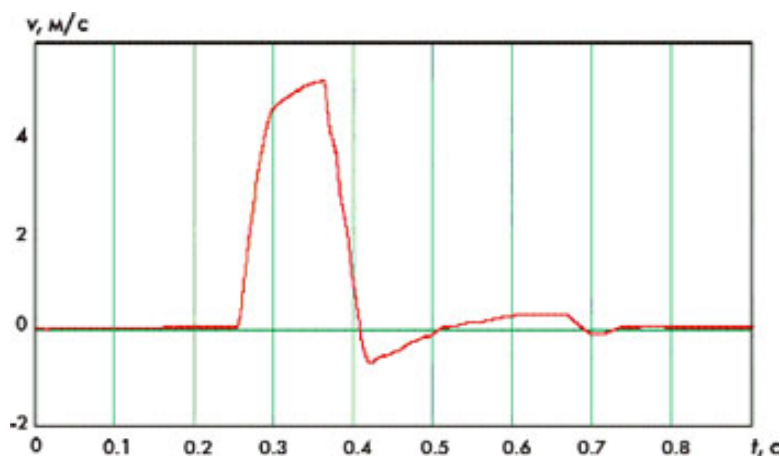


Рис. 6 - Графік швидкості обмірюваної інтегральним акселерометром МСК типу ADXL150 при зниженій вібрації.

Як бачимо, похибка визначення прискорення, а особливо швидкості, значно зменшилася.

Цей результат підтверджується збігом отриманих результатів з результатами експериментальних досліджень інших авторів, наприклад [6].

На наш погляд, компанія Analog Devise при розробці поверхневого інтегрального акселерометра ADXL50 [5] з використанням зворотного негативного зв'язку по положенню інерційної маси була на вірному шляху (повним сучасним аналогом МП-95) (див. рис.7).

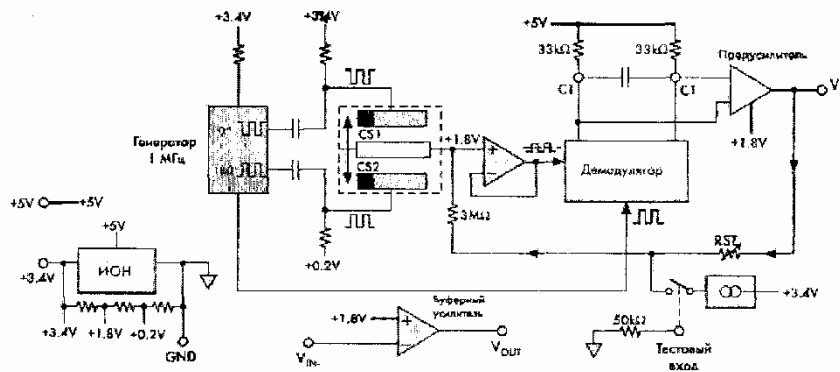


Рис. 7 - Функціональна схема акселерометра ADXL50

Розглянемо роботу акселерометра ADXL50. На верхню і нижню обкладку від генератора подаються прямокутні протифазні сигнали однакової амплітуди частотою 1МГц. За відсутності прискорення, як було сказано вище, завдяки однаковим відстаням між обкладинками конденсатора, ємності будуть однакові, отже, на рухливій обкладці передаються сигнали однакової амплітуди. Різницевий сигнал, що поступає на вхід повторювача, дорівнює нулю. Зрозуміло, що при лінійному прискоренні амплітуда різницевого сигналу буде пропорційна його величині, а фаза визначається знаком прискорення. Це здійснюється фазочутливим демодулятором, що перетворює різницевий сигнал в низькочастотний (смугою від 0 до 1000Гц), що характеризує величину і знак прискорення. Для зменшення впливу тимчасових змін параметрів, зниження нелінійності перехідної характеристики акселерометра, впливу температури довкілля використовується негативний зворотний зв'язок (повна аналогія демпфуванню в МП-95) за положенням інерційної маси. Як видно з схеми, напруга з виходу передсилювача через резистор подається на рухливі обкладки акселерометра, які прагнуть встановити інерційну масу в початковий стан.

Поверхневий інтегральний акселерометр типу ADXL50 (з використанням зворотного негативного зв'язку) був знятий з виробництва з метою зниження вартості, підвищення економічності, збільшення розмаху вихідної напруги і чутливості. В більш пізніх моделях акселерометрів типу ADXLxxx компанія Analog Devise відмовилася від зворотного негативного зв'язку, що привело, як бачимо, до реального погіршення їх лінійності та похибки акселерометрів типу ADXLxxx.

## ВИСНОВКИ

У нашому винаході [2, 4] ми врахували негативний досвід компанії Analog Device. Приведені графіки (рис.3-6) підтверджують правильність нашого рішення у винаході.

Наявність вагової обробки у винаході [2] приводить до того, що мобільна система контролю (МСК) стає системою з перемінними параметрами. Використання вагової обробки вимагає застосування окремого нуля-органа. Необхідність вагової обробки підкреслює значення цифрової техніки у винаході, оскільки згладжування сигналів помилки з перемінними ваговими коефіцієнтами можливо зручніше в МСК виконати в цифровому вигляді. Ця частина МСК виконується програмою і перетворювачами сигналу до цифрового вигляду.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Заміховський Л.М. Діагностика технічного стану штангових глибинно-насосних установок./ Л.М. Заміховський, В.А. Ровінський, О.В. Євчук.- Івано-Франківськ: Сімфонія форте, 2006.-307с.
- 2 Спосіб вібраційного контролю свердловинної штангової насосної установки і пристрій для його реалізації. /Б.В. Копей, В.В. Лопатін, О.І. Стефанишин. -Реєстр. номер заявки а201002864, Бюл.№23 2010; Опубл. 10.12.2010.
3. Турчин А.М. Электрические измерения величин/ А.М. Турчин. - ЛВИКА им. А.Ф. Можайского, - Л. - 1967, 429с.
4. Копей Б.В.Мобільні вимірювальні системи в нафтогазовій та гірничій промисловості/ Б.В. Копей, В.В. Лопатін, О.І. Стефанишин. Монографія. - Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2010, - 392с.
5. Давачі прискорень у мобільних інформаційно-вимірювальних системах/ Б.В. Копей, В.В. Лопатін, І.Б. Копей, Ю.А. Бобошко // Нафтогазова енергетика. Усеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал. - № 3(4) - 2007.- С. 47-54.
6. Волович А. Интегральные акселерометры / А. Волович, Г. Волович // Электроника, -2002 - №7 - С. 69-74.

**УДК 622.78 (045):622.02:543.226**

Канд. техн. наук К.С. Ищенко,  
научн. сотр. В.Я. Осенний  
(ИГТМ НАН Украины)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ИХ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Дослідження механізму крихкого термічного руйнування і структурні зміни в гірських породах при їх тепловому (плазмовому) навантаженні.

На основі теорії термопружності і енергетичних показників описуваного процесу розглянуто механізм крихкого термічного руйнування гірських порід. При його оцінці враховувалась градієнтна, структурна та термічна пружність мінералів в породі. У лабораторних умовах на відібраних зразках порід (шелушці) продуктів руйнування кварцитів і сланців Кривбасу в процесі розширення свердловин повітряною плазмою проведені дослідження їх структурних змін з використанням методів рентгеноструктурного, термогравіметричного і диференціально-термічного аналізів. Для їх реалізації використовувались дослідницькі комплекси дериватограф і ДРОН- 3.

За результатами теоретичних досліджень проведена оцінка механізму крихкого термічного руйнування з використанням критерію міцності Баландина для будь-якої породи. Розраховані чисельні значення лінійної швидкості крихкого руйнування для кварцитів. Експериментально за результатами рентгеноструктурного, термогравіметричного і хімічного аналізів проаналізовані ендотермічні і окислювальні процеси розкладання мінералів в гірській породі. При теоретичній оцінці механізму термічного руйнування гірської породи отримані основні вирази, що описують структурні і градієнтні напруження в породі при її відділенні