УДК 621.317.7.001.25

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ СВЕРДЛОВИННОЇ ШТАНГОВОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

В. В. Лопатін

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України,
вул. Симферопольская, 2,а, м. Дніпропетровськ, 49005, e-mail:igtmnanu@yandex.ru

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 перетворення (компенсації) сигналу, який врівноважує за допомогою гнучкої зворотного зв'язку, в результаті чого відбувається компенсація похибок. МСК підвищує точність контролю завдяки підключенню давачів до МСК, що виконано по компенсаційній схемі (із зворотним перетворювачем і перетворювачем розбалансу). Були проведені дослідження експериментальної МСК, які підтверджують правильність такого рішення.
Ключові слова: свердловинна штангова насосна установка, мобільна система контролю, компенсація сигналу, гнучкий зворотний зв'язок, компенсаційна схема, давач, акселерометр, система зрівноваження.

Для совершенствования контроля вибраций скважинной штанговой насосной установки (СШНУ) мобильной системой контроля (МСК) предложено повысить точность контроля с использованием метода компенсации уравновешивающим сигналом от помех посредством использования МСК. Точность предложенного метода определяется стабильностью работы обратной связи, входного и выходного элементов МСК. С целью повышения достоверности контроля вибрации сигнал сравнивают с компенсирующим сигналом, причем сравнение осуществляется методом преобразования (компенсации) сигнала, который уравновешивает с помощью гибкой обратной связи, в результате чего происходит компенсация погрешностей. МСК повышает точность контроля благодаря подключению датчиков к МСК, что выполнено по компенсационной схеме (с обратным преобразователем и преобразователем розбаланса). Были проведены исследования экспериментальной МСК, подтверждающие правильность решения.
Ключевые слова: скважинная штанговая насосная установка, мобильная система контроля, метод компенсации, гибкая обратная связь, компенсационная схема, датчик, акселерометр, система уравновешивания.

To improve vibration control sucker rod pumping unit (SRPU) mobile control system (MCS) proposed to increase the accuracy of control, using the method of compensation for balancing the signal from interference by the use of MCS s. The accuracy of this method is determined by the stability of the feedback, input and output elements of the MCS and to improve the reliability of vibration control signal received is compared with the compensating signal, and a comparison is carried out by the transformation (compensation) that balances the signal through a flexible feedback, resulting in is the compensation of errors. MCS improves the accuracy of control by connecting sensors to MCS, is satisfied by the compensation scheme (with the opposite transducer and transmitter imbalance). Experimental studies were carried out confirming the correctness of MCS solutions.
Keywords: sucker rod pumping unit, mobile control system, a method of balancing, flexible feedback compensation circuit, sensor, accelerometer, error compensation, the system of balance.

Видобування нафти за допомогою свердловинної штангової насосної установки (СШНУ) охоплює понад 65% діючого фонду свердловин в Україні. Більша частина СШНУ (рис. 1) експлуатується понад нормативний термін (20-30 років), мають місце відмови і аварії, кількість яких постійно зростає.



Рисунок 1 – Свердловина №246-Д НГВУ "Долинанафтогаз", яка обладнана СШНУ з верстатом-гойдалкою UP-12T (редуктор R-55) після 28 років експлуатації

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 досконаленими. Для вдосконалення контролю вібрацій СШНУ мобільною системою контролю (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. 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 розбалансу.

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

Принцип компенсації похибки може виконуватися з астатичною і статичною системами зрівноваження, а також з комбінованою системою зрівноваження [3]. Принцип компенсації похибки заснований на тому, що дія завад на акселерометр залишається, але їх вплив обчислюється (у нашому випадку процесором блоку реєстрації мобільної вимірювальної системи), 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 розбалансу на базі сучасних цифрових технологій.

Суть компенсації похибки у пропонованому методі полягає у тому, що (рис. 2) сигнал акселерометра 1 рівний A_a та вихідний сигнал зворотного перетворювача 3 рівний A_y порівнюють, виявляють величину розбалансу рівну $\pm\Delta A$ і як керуючий сигнал подають на вхід перетворювача розбалансу 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 сигналу *Б* виробляє вихідний сигнал A_y, що врівноважує.

Таким чином 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* давача положення 5 подають на вхід блоку реєстрації 4 паралельно із сигналом *Б*.

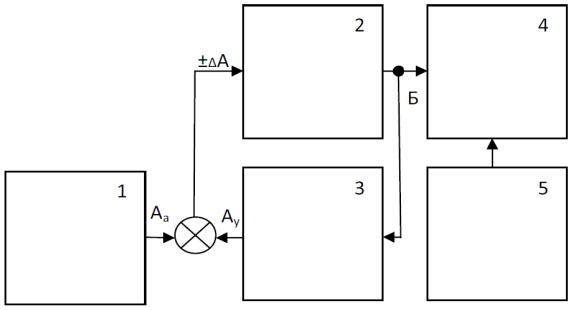


Рисунок 2 – Схема компенсації похибки у пропонованому методі для окремого акселерометра МСК

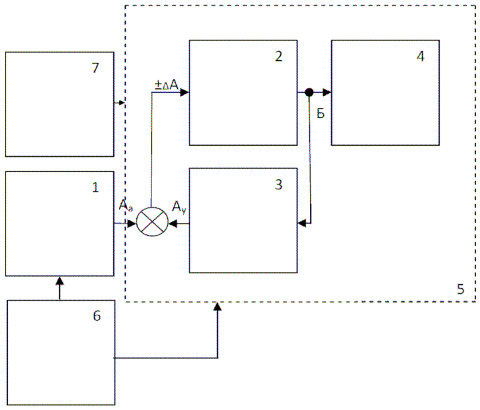


Рисунок 3 – Схема компенсації завад в пропонованому пристрою для окремого акселерометра МСК

У нашому пристрої (рис. 3) цифровий акселерометр 1 через стандартний порт і фідерно-кабельне з'єднання з'єднаний із процесором МСК 5. Функціонально перетворювач розбалансу, зворотний перетворювач, блок реєстрації виконані у виді драйвера, інтерфейсу і програмного забезпечення для процесора МСК 5. Весь пристрій живиться від автономного джерела електропостачання 6. Для підвищення точності вібраційного контролю кожний акселерометр містить давач положення 7, який з'єднаний із процесором 5.

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

Похибка пропонованого пристрою контролю складається з трьох складових: похибки акселерометра 1 β_a, похибки індивідуального зворотного перетворювача 3 $\beta_{оп}$, похибки блоку реєстрації 4 $\beta_{бр}$.

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

– перетворювача розбалансу (від ΔA до $Б$) з коефіцієнтом передачі K;

– зворотного перетворення (від $Б$ до A_y) з коефіцієнтом передачі α.

Введемо для аналізу роботи цих кіл і пояснення принципу роботи компенсаційної схеми у пропонованому пристрої контролю наступні позначення:

A_a – вхідна вимірювана величина;

A_y – величина, що врівноважує;

$Б$ – вихідна величина;

$K = Б/\Delta A$ – коефіцієнт схеми перетворювача розбалансу;

$\alpha = A_y/Б$ – коефіцієнт зворотного зв'язку;

$A_y/\Delta A = K\alpha$ – глибина зрівноваження;

$\gamma = \Delta A/A_a$ – відносний розбаланс;

$\zeta = A_y/A_a$ – відносна глибина зрівноваження.

При використанні вищенаведених позначень робота компенсаційної схеми (рис. 3) описується наступними рівняннями:

$$A_a = A_y + \Delta A,\ A_y = Б\alpha,\ Б = \Delta AK. \qquad (1)$$

З цих рівнянь виходить, що відносна нерівновага компенсаційної схеми є такою:

$$\gamma = \Delta A / A_a = A/(\Delta A + A_y) = 1/[1+(K\alpha)], \quad (2)$$

а відносна глибина зрівноваження компенсаційної схеми такою:

$$\begin{aligned}\zeta &= A_y / A_a = A_y/(\Delta A + A_y) = \\ &= (K\alpha)/[1+(K\alpha)] = 1+\gamma.\end{aligned} \qquad (3)$$

Звідси чутливість компенсаційної схеми буде такою:

$$\begin{aligned}S &= Б / A_a = (\Delta AK)/A_a = \\ &= \gamma K = K/[1+(K\alpha)].\end{aligned} \qquad (4)$$

З отриманого виразу (4) видно, що чутливість компенсаційної схеми в $1+(K\alpha)$ разів є меншою чутливості кола перетворювача розбалансу компенсаційної схеми. Це показує,

що приблизно 1+(*К*α) зменшується результуюча похибка перетворення сигналу A_y в сигнал *Б*. Ця похибка складається з адитивних і мультиплікативних складових перетворювачів мобільної вимірювальної системи.

При використанні тільки астатичного зрівноваження процес зрівноваження продовжується до тих пір, поки вираз A_a-A_y=ΔA не стане меншим від величини Δ$A_ч$ – порогу чутливості зворотного перетворювача. Нехтуючи величиною Δ$A_ч$, похибка в цьому випадку буде такою:

$$\xi_c = \xi_a + A_ч / A, \qquad (5)$$

де ξ_c – похибка кола перетворювача розбалансу компенсаційної схеми, ξ_a– похибка перетворювача, Δ$A_ч$/A – відносна величина порогу чутливості, A – значення вимірюваного прискорення.

Явно видно недолік схеми, що виявляється в обмеженому порозі чутливості Δ$A_ч$. Таким чином, відносна похибка зростала б обернено пропорційно до значення вимірюваної величини прискорення. У нашому випадку, збільшуючи глибину урівноваження *К*α, можна істотно зменшити величину похибки. Тому *К*α є характерним показником якості пропонованого пристрою. Чим більшим є *К*α, тим більшою є точність. Для отримання ідеальної точності необхідно, щоб $\xi_a \to 0$, тобто використання мінімальної кількості перетворюючих ланок в колі зворотного перетворювача.

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

Коливання кожного давача перетворюють в індивідуальному зворотному перетворювачі і порівнюють у перетворювачі розбалансу, який виявляє величину і знак відхилення від рівноваги і коригує (змінює) сигнал до досягнення рівності між вихідною і вхідною контрольованими величинами. Цей принцип застосовний для усунення як адитивних, так і мультиплікативних завад. Його перевага полягає у тому, що він може бути використаний тоді, коли завади не можуть бути визначеними.

Після установки апаратури контролю на вузлі контрольованої свердловинної насосної установки проводять її калібрування. Для цього в місцях кріплення давачів завдають ударів відомої величини по напрямах дії давачів та фіксують ці величини на МСК. За величиною сили удару і величини амплітуди першої гармоніки коливань давачів, записаною на МСК, визначають ціну ділення шкали МСК. Для кожного давача визначають фазування, тобто відповідність напряму 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 більшим є знос механізмів, тим більшими є удари і тим сильніше вони збуджують механізм вібрації. Наприклад, це стосується руйнувань зубчастих пар редукторів СШНУ [4]. Ці явища досить часто мають місце, що вказує про недоліки відомих методів контролю редукторів СШНУ. Ці вібрації сприймаються давачами (акселерометрами) і перетворюються в затухаючі коливання, частота кожного з яких визначається власною частотою механічних коливань.

Вироблені акселерометрами коливання подають в МСК, де коливання кожного акселерометра записуються у вигляді діаграмам. За записаними діаграмами визначають силу удару по величині амплітуди першої гармоніки електричних коливань акселерометра і ціну ділення шкали реєстратора. Звіряючи діаграми з результатами калібрування, визначають напрям удару у контрольованому механізмі СШНУ. Наприклад, при фазі першої амплітуди першої гармоніки, рівною 180°, удар відбувається зліва, при 0° – 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 напряму удару з напрямами осей акселерометрів контроль ведуть за показами двох акселерометрів на основі таких співвідношень:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}, \qquad (6)$$

$$A_2 / A_1 = \sin\varphi_1 / \sin\varphi_2, \quad (7)$$

$$\varphi = \mathrm{arctg}(A_2 / A_1), \quad (8)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 90°, \quad (9)$$

де A_1 – перша амплітуда першої гармоніки коливань першого акселерометра, A_2 – перша амплітуда першої гармоніки коливань другого акселерометра, φ_1 – кут між віссю напряму удару і віссю спрямованості першого акселерометра, φ_2 – кут між віссю напряму удару і віссю спрямованості другого акселерометра.

Простота наведених співвідношень дозволяє повністю автоматизувати процес обробки МСК.

Функціонально зворотний перетворювач, перетворювач розбалансу і блок реєстрації можуть бути виконані на базі комп'ютера з відповідним інтерфейсом і програмним забезпеченням. При досить малій чутливості перетворювача розбалансу досягається майже повна рівновага і похибка пристрою контролю вібрації визначається виключно похибкою перетворювачів, тобто комп'ютера пристрою контролю вібрації.

Наприклад, нехай ударні вібрації виникають у 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 вказує на те, що удари відбуваються в поперечному напрямі контрольованого вузла. Отримані дані передають ремонтній бригаді, де вказують силу і частоту ударів, його напрям і місце виникнення (який 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 фазиї 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. Тобто здійснюється вібраційний контроль СШНУ.

Були проведені дослідження експериментальної мобільної системи контролю, які підтвердили правильність рішення винаходу [2].

Конструктивно чутливий елемент інтегрального акселерометру експериментальної МСК типу ADXL150 [5] являє собою диференційну конденсаторну структуру з повітряним діелектриком. Інерційна маса при наявності прискорення зміщується щодо іншої частини кристала полікремнійової плівки акселерометра, утворюючи рухливу обкладинку конденсатора змінної ємності. Розтяжки, що утримують у висячому положенні інерційну масу, є механічними пружинами постійної пружності, які обмежують переміщення інерційної маси акселерометра 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 $a = x(к/m)$, причому $к/m$ - характеристичний (конструктивний) параметр інтегрального акселерометру МСК типу ADXL150. Однак у ADXL150 як і у подальших моделях акселерометрів типу ADXLxxx компанії Analog Devise відсутній зворотній від'ємний зв'язок, який потрібний для зменшення похибки контролю вібрації МСК. Для підтвердження сказаного був проведений експеримент.

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

На рис. 4 приведений графік залежності швидкості від часу акселерометра типу ADXL150 експериментальної МСК. Швидкість контролюється, коли переміщення 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), дані якого розраховані за даними акселерометра типу ADXL150, похибка кінцевого значення швидкості склала приблизно 1,3 м/с при максимальній швидкості 3,4 м/с. Похибка кінцевого значення швидкості склала 38,2%.

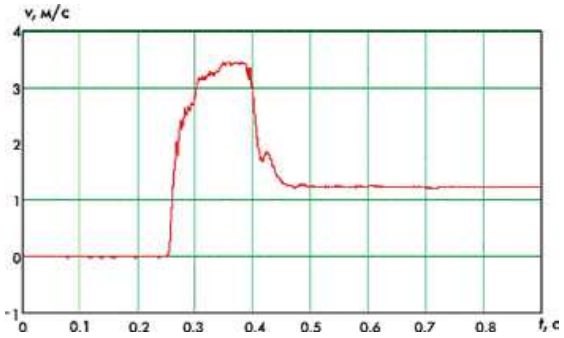


Рисунок 4 – Зміна швидкості, виміряної інтегральним акселерометром МСК типу ADXL150 при вібрації 300Гц

На рис. 5 приведена зміна лінійного прискорення, коли переміщення сталевого стрижня конструкції СШНУ супроводжувалося вібрацією досить великої амплітуди з частотою 300 Гц 12-розрядним АЦП МСК із частотою вибірки 1000 Гц, яка отримана безпосереднім зчитуванням сигналу акселерометра.

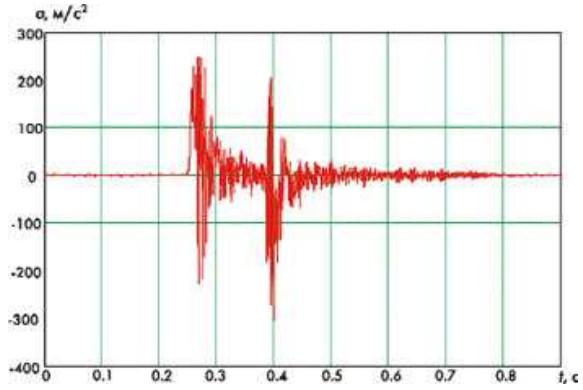


Рисунок 5 – Зміна прискорення, виміряного інтегральним акселерометром МСК типу ADXL150 при вібрації 300Гц

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

На рис. 6 приведений графік прискорення акселерометру типу ADXL150 МСК із 12-розрядним АЦП з частотою вибірки 1000 Гц, який отриманий безпосереднім зчитуванням сигналу. Переміщення супроводжувалися значно меншою подовжньою вібрацією. Як бачимо, похибка визначення прискорення зменшилася.

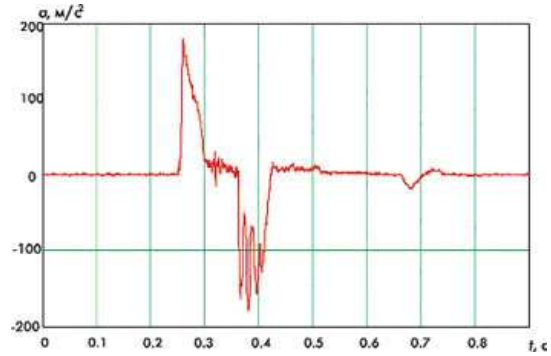


Рисунок 6 – Зміна прискорення, виміряного інтегральним акселерометром МСК типу ADXL150 при менших вібраціях.

На рис. 7 приведений графік швидкості акселерометра акселерометру типу ADXL150 експериментальної МСК з 12-розрядним АЦП з частотою вибірки 1000 Гц. Графік швидкості одержаний чисельним інтегруванням методом трапецій. На початку і наприкінці інтервалу спостереження (0–0,9 с) швидкість акселерометра дорівнює нулю. На графіку швидкості значення якої розраховані за даними акселерометра типу ADXL150, похибка кінцевого значення швидкості зменшилася суттєво.

Похибка кінцевого значення швидкості акселерометра типу ADXL150 є меншою 5%.

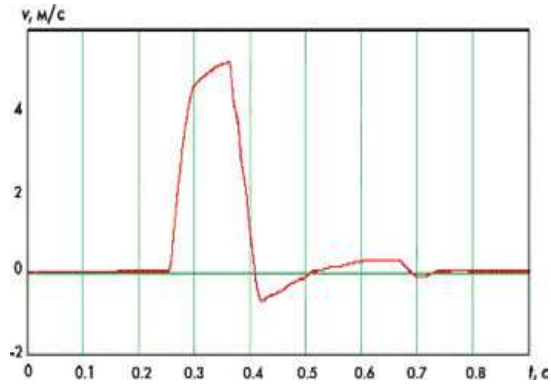


Рисунок 7 – Зміна швидкості, виміряної інтегральним акселерометром МСК типу ADXL150 при менших вібраціях

Як бачимо, похибка визначення прискорення, а особливо швидкості зменшилися суттєво.

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

На наш погляд, компанія Analog Devise при розробці інтегрального акселерометра ADXL50 [5] з використанням зворотного від'ємного зв'язку по положенню його інерційної маси була на вірному шляху.

Розглянемо роботу акселерометра ADXL50 (рис. 8). На верхню і нижню обкладинки конденсатора від генератора подаються прямокутні протифазні сигнали однакової амплітуди частотою 1МГц. За відсутності прискорення, як було вказано вище, завдяки однаковим відстаням між обкладинками конденсатора, ємності будуть однакові, отже на рухливі обкладки 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, зменшення нелінійності перехідної характеристики акселерометра, впливу температури довкілля, використовується від'ємний зворотний зв'язок (повна аналогія демпфуванню в МП-95) за положенням інерційної маси. Як видно із схеми, напруга з виходу передпідсилювача через резистор подається на рухливі обкладинки акселерометра, які прагнуть встановити інерційну масу у початковий стан.

Інтегральний акселерометр типу ADXL50 (з використанням зворотного від'ємного зв'язку) був знятий з виробництва з метою зниження його вартості, підвищення економічності, збільшення розмаху вихідної напруги і чутливості. В подальших моделях акселерометрів типу ADXLxxx компанія Analog Devise відмовилася від зворотного від'ємного зв'язку, що привело до реального погіршення лінійності їх характеристик та зростання їх похибок.

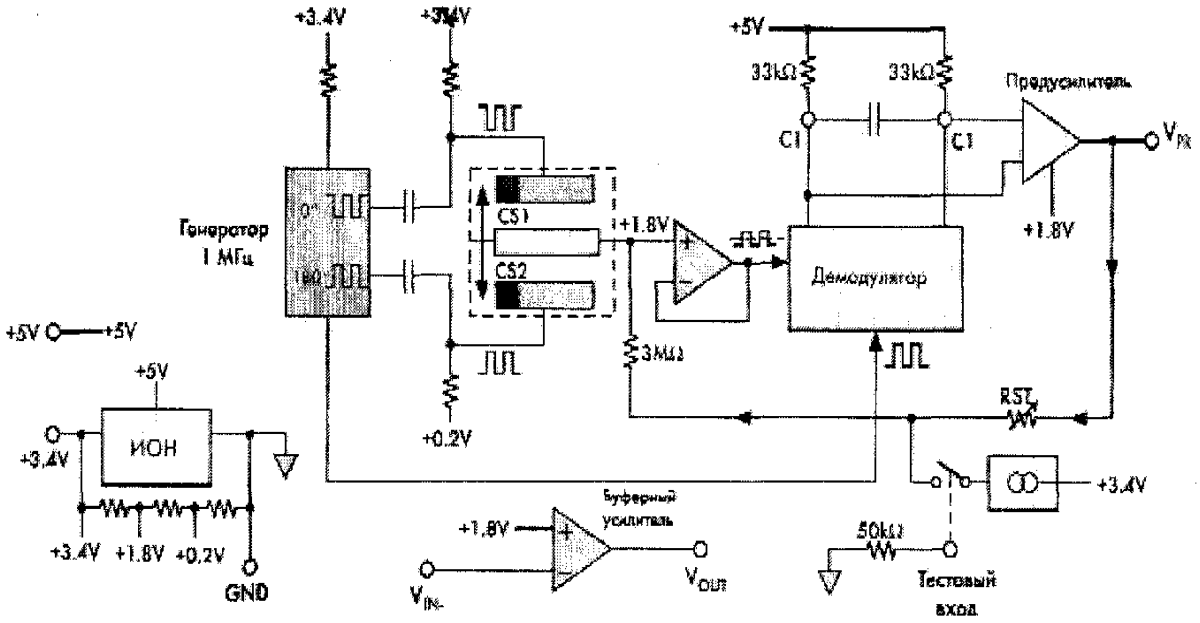


Рисунок 8 - Функціональна схема акселерометра ADXL50

ВИСНОВКИ

У винаході [2] ми врахували негативний досвід компанії Analog Device. Приведені графіки (рис.4÷7) підтверджують правильність вибраного рішення у винаході.

Наявність вагової обробки у винаході [2] приводить до того, що МСК стає системою із змінними параметрами. Використання вагової обробки вимагає застосування окремого нуль–органу. Необхідність вагової обробки підкреслює значення цифрової техніки у винаході, оскільки згладжування сигналів похибки із змінними ваговими коефіцієнтами зручніше в МСК виконати у цифровому виді. Ця частина МСК виконується програмою і перетворювачами сигналу до цифрового виду.

1. Заміховський, Л. М. Діагностика технічного стану глибинно-насосних установок / Л. М. Заміховський, В. А. Ровінський, О. В. Євчук О.В. – Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2006. – 308с. 2. Спосіб вібраційного контролю свердловинної штангової насосної установки і пристрій для його реалізації. /Копей Б.В., Лопатін В.В., Стефанишин О.І. 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. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 392с. 5. Датчики ускорений в мобильных информационно-измерительных системах / Б. В. Копей, Ю. А. Бобошко, В. В. Лопатин, И. Б. Копей // Нафтогазова енергетика. – 2007. – №3(4). – С.47-54. 6. Волович А. Интегральные акселерометры / А. Волович, Г. Волович // Электроника. – 2002. – №7. – С. 69–74.

Поступила в редакцію 27.05.2013р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Копей Б. В.