

Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу

УДК [622.673.1: 681.514.54]

НОРМУЮЧИЙ ПІДСИЛЮВАЧ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ДАВАЧА ВИПРОБУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ І РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД І НАВАНТАЖЕНЬ НА СШНУ

¹Б.В.Копей, ²В.В.Лопатин, ¹І.Б.Копей

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,
e-mail: kopeyb@nuing.edu.ua

²ІГТМ НАН України, м. Дніпропетровськ, вул. Сімферопольська, 2

Статья посвящена экспериментально-теоретическому вопросу модернизации испытательного комплекса исследования нагрузок на ШСНУ и деформации и разрушения горных пород. Изготовленный в результате проделанной работы нормирующий усилитель дает удовлетворительные результаты.

The questions of the experimental-theoretical modernisation of mobile information-measuring systems for pumping units and amplifier for measuring gauge of testing complex for rock deformation and damage investigation are considered. Normalizing amplifier for measuring gauge of testing complex for rock deformation and damage investigation and pumping unit load analysis gives satisfied results.

Характер та інтенсивність прояву гірського тиску – основний чинник, що визначає деформацію і руйнування гірських порід на вибої. Внаслідок дії механічних напруг будь-який об'єм первинної суцільної гірської породи може, руйнуючись, переходити в дискретний стан [1]. Важко оцінити, наскільки важливі для гірської науки кількісні просторово-часові характеристики самого процесу руйнування [2]. В інституті геотехнічної механіки НАН України ім. Н.С.Полякова цю проблему вивчав академік А.Ф.Булат, учені В.Т.Глушко, В.В.Винограду, Б.М.Усаченко; в ІФНТУНГ – Векерик В.І., Волобуєв А.І. і багато інших. На базі серійних випробувальних пресів ПСУ-50 і ПСУ-500 Армавірського заводу випробувальних машин Т.Г.Кирнічанським було створено випробувальний комплекс дослідження деформації і руйнування гірських порід та вимірювальна апаратура [3]. До складу цієї апаратури входив давач, призначений для вимірювання зусиль, що діють на зразок гірської породи. За методикою випробувань головна вимога до давача – висока жорсткість, яка визначається дуже малими (порівняно з деформаціями зразка) змінами лінійних розмірів. Прийнятним за точністю, стабі-

льністю і працездатністю виявився жорсткий силівимірювальний давач, що являє собою сталевий циліндр з наклеєними тензодавачами опори, сполученими в незалежні повні мости, які включені послідовно. Давач дає змогу вимірювати зусилля в діапазонах від 0 до 0,25 МН і від 0 до 0,50 МН з точністю відповідно 1 і 2 кН і похибкою до 4% [4]. Вдосконалення техніки випробувань зразків гірських порід та вимірювання навантажень на головку балансира верстата-гойдалки вимагає використання мобільних інформаційно-вимірювальних систем штангових насосних установок свердловин і шахтних підйомних комплексів та гірських вироблень (МІВСК) [5-7, зокрема МІВСК «МАК-2». Проте з викладеної вище причини силівимірювальний давач володіє нестандартними вихідними параметрами і потребує вивчення питання щодо його сполучення [8]. Вивчення цього питання засвідчило, що нормуючий підсилювач для давача Т.Г.Кирнічанського для вимірювання зусиль, що діють на зразок гірської породи, повинен мати такі характеристики: струм зсуву – 5 пА, напруга зсуву – 1 мкВ, вихідна напруга – ±30 мВ, похибка – ±0,08%, нелінійність – 0,02% за напруги живлення підсилювача ±5 В і вхід-

ного опору 50 Ом. Крім того, слід забезпечити шумові характеристики, що не погіршують прецизійні параметри 5B38 МІСК «МАК-2».

Відомо, що лише в абстрактному (ідеальному) нормуючому підсилювачі за вхідної напруги, що дорівнює нулю, вихідна напруга також дорівнює нулю. Для реальних підсилювачів характерна наявність вхідної напруги зсуву, якою можна знехтувати тільки за вхідної напруги, що перевищує 1 В [9]. На практиці напругу зсуву компенсують шляхом подавання такої ж за величиною напруги протилежної полярності. У простому варіанті це здійснюється за допомогою зовнішнього потенціометра, підключеного до виходів, вказаних в паспорті мікросхеми. Фізично потенціометр забезпечує збільшення струму через один з транзисторів і зменшує – через інший. Проте робочий режим кожного вхідного транзистора забезпечується за рахунок постійного протікання його базового струму (або струму затвора), званого струмом зсуву. Протікання струму зсуву через коло зворотного зв'язку призводить до похибки, що прямо пропорційно залежить від опору цього кола. Відомі рішення мінімізації і цих похибок, але вони призводять до інших серйозних проблем. Крім того, напруга живлення більшості прецизійних мікросхем дорівнює ± 15 В, а за напруги живлення близько 4 В внутрішні джерела струму будь-якої мікросхеми вже не працюють. Зниження номінальної напруги живлення, як відомо, істотно знижує діапазон лінійності будь-якого підсилювача і призводить до появи інших «неприємностей». Існує, наприклад мікросхема LH0052 фірми National Semiconductor (NSC), яка за напруги живлення ± 15 В має вхідний струм зсуву 0,5 пА і напругу зсуву 0,1 мкВ [7], проте в Україні вони практично недоступні. На жаль, на вітчизняному ринку не має аналогів з такими високими параметрами. Тому основну увагу було звернуто на конверсійну техніку. Проте готових і прийнятних рішень знайти не вдалося. Незважаючи на низку вдалих рішень, пов'язаних переважно з підбором параметрів і узгодженням, проблему розроблення і створення ефективного нормуючого підсилювача досі не можна вважати повністю вирішеною. Існуючим зразкам, як і раніше, властиві такі недоліки: великий рівень шумів, вхідних напруг і струмів зсуву; малий коефіцієнт підсилення; нерівномірність крутизни перетворення тощо. З метою зниження впливу шумів і позбавлення від вищенаведених недоліків авторами було проведено низку експериментів.

З теорії складання статистично непов'язаних шумових сигналів відомо, що квадрат амплітуди середнього сумарного шумового сигналу дорівнює сумі середніх квадратів амплітуд (струмів або напруг) окремих доданків, тобто

$$\bar{N}_{\Sigma}^2 = \bar{N}_1^2 + \bar{N}_2^2 + \dots + \bar{N}_n^2.$$

Такий ефект матиме місце і в МІВСК у режимі силовимірювача. Тоді шум на вході АЦП МІВСК буде

$$\bar{N}_{\Sigma} = \sqrt{\bar{N}_1^2 + \bar{N}_2^2 + \dots}$$

Якщо припустити, що всі параметри комплектуючих МІВСК в ТУ і шумовий внесок кожного приблизно однакові, то

$$\bar{N}_i = \sqrt{\bar{N}_1^2} = \sqrt{\bar{N}_2^2} = \dots = \sqrt{\bar{N}_n^2},$$

а

$$U_i = U_1 = U_2 = \dots = U_n,$$

внаслідок чого

$$\bar{N}_{\Sigma} = \sqrt{n\bar{N}_1^2}; U_{\Sigma} = n U_1.$$

Тоді відношення сигнал/шум на вході АЦП МІВСК дорівнює

$$\text{сигнал/шум} = \frac{n U_i}{\sqrt{n\bar{N}_1^2}} = \sqrt{n} \frac{U_i}{\bar{N}_1},$$

тобто відношення сигнал/шум поліпшується пропорційно до кореня квадратного від числа комплектуючих нормуючого підсилювача.

Таким чином, запропонований підхід дає змогу підвищити крутизну перетворення і, отже, чутливість підсилювача (МІВСК), значно знизити рівень власних шумів і вихідний опір, причому ці параметри можуть певною мірою бути керованими за допомогою вибору оптимальної схеми.

Як засвідчили результати експериментів, збільшення кількості компонентів вище 3 зменшує співвідношення сигнал/шум. Зрозуміло, що в цій роботі необхідно враховувати також дві суперечливі вимоги. З одного боку, для отримання високої крутизни перетворення і мінімуму власних шумів вимагається працювати на нелінійній ділянці характеристики, що досягається збільшенням струму, а це, в свою чергу, погіршує шумові і перетворюючі властивості нормуючого підсилювача.

Для правильного вибору принципової схеми нормуючого підсилювача бажано знати шумові параметри мікросхеми: еквівалентні шумові ЕРС e і струм i , дія яких еквівалентна дії деякої шумової ЕРС e .

На жаль, в паспортних даних ці параметри фірми-виробники не наводять. У реальних умовах лабораторії спектр шуму мікросхеми істотно відрізняється від вимірюваного під час заводських випробувань, і напруга шумів нормуючого підсилювача, перерахована на вході мікросхеми, може значно відрізнятись від паспортного значення. Необхідні дані було одержано експериментально шляхом використання 14 зразків мікросхем при симетричному і несиметричному їх включенні. Відомо, що в загальноприйнятій практиці за не надто жорстких вимог до шумів рекомендується симетричне включення вхідного диференціального каскаду, а для отримання мінімального рівня шуму – несиметричне. Для того, щоб результати вимірювань максимально враховували суб'єктивний характер сприйняття шумів нормуючого підсилювача, оцінювалася їх зважена напруга. Шум вимірювався мілівольтметром типу В3-38 з фільтром, що зважає. У всіх експериментах коефіцієнт передавання мікросхеми встановлювався рівним 250 і, крім того, підлаштовувався режим роботи за постійним струмом. До входу

мікросхеми напруга шумів підводилася шляхом розподілу вихідної напруги шумів на коефіцієнт передачі мікросхеми. Одержана усереднена напруга шумів при включенні мікросхеми: несиметричному – 0,45 мкВ, симетричному – 0,73 мкВ. Як видно, вираш по шумах при несиметричному включенні – до 4 децибел. Особливо слід зазначити, що серед випробуваних мікросхем зустрілося близько 20% зразків з аномальною поведінкою: рівень шуму при симетричному включенні біля них опинився менше, ніж при несиметричному. Задовільного пояснення цього явища немає, проте під час відбору мікросхем для нормуючого підсилювача його необхідно враховувати.

Одержані результати засвідчили, що рівень шумів мікросхем істотно залежить від внутрішнього опору джерела сигналу. Іншими словами, внесок еквівалентного генератора в загальний рівень шумів більший, ніж еквівалентного генератора шумової ЕРС.

Критерієм якості нормуючого підсилювача є характер і величина спотворень, що вносяться ним. Спробуємо класифікувати відомі на даний час спотворення корисного сигналу в МІВСК. Перш за все, звернемо увагу на практичний бік проблеми, пов'язаний з подальшою обробкою корисного сигналу, неідеальністю характеристик яких викликаний той або інший вид спотворень. Розділимо спотворення на статичні і динамічні. Перші зумовлені нелінійністю статичних передавальних характеристик нормуючого підсилювача. Другі – неідеальністю їх перехідних характеристик, під якими розуміється реакція нормуючого підсилювача на скачок вхідної напруги. Статичні спотворення, у свою чергу, можна поділити на гармонійні, які виражаються в зміні форми корисного початкового сигналу певної частоти, і інтермодуляційні, що виявляються в збагаченні сектора вихідного сигналу комбінаційними складовими. Статичні інтермодуляційні спотворення можуть бути амплітудними і фазовими (обумовлені відповідно амплітудною і фазовою модуляцією корисних вхідних сигналів). Динамічні спотворення також можна поділити на гармонійні і інтермодуляційні. У першому випадку йдеться про спотворення форми вхідного сигналу, коли його амплітуда і частота перевищують критичні значення, що визначаються максимальною швидкістю наростання вихідної напруги. Швидкість наростання вихідної напруги визначається із співвідношення

$$V_n = 2\pi f_m U_m,$$

де: U_m – максимальна амплітуда вихідної напруги; f_m – максимальна частота підсилюваного сигналу.

Для широко поширеної мікросхеми 741 та її аналогів типова швидкість наростання дорівнює 0,5 В/мкс. Це означає, що вихідний сигнал не може змінитися від –5В до +5В за час менше 20 мкс. Якщо ж за цих несприятливих умов на вході нормуючого підсилювача присутні сигнали інших частот, то з'являються умови для виникнення і сильних інтермодуляційних спо-

творень. Наведена класифікація зручна тим, що, з погляду авторів, дає змогу якнайповніше охарактеризувати спотворення, що вносяться нормуючим підсилювачем.

На жаль, інструментальна оцінка якості нормуючого підсилювача утруднена, в першу чергу, відсутністю відповідних вимірювальних приладів: серед генераторів, що випускаються, немає приладів з коефіцієнтом гармонік менше 0,05%, вимірники нелінійних спотворень забезпечують достовірне вимірювання цього параметра тільки із значення, більшого 0,1%, а вимірники інтермодуляційних спотворень не випускаються взагалі. Прецизійні вимірювальні прилади унікальні, дорогі і практично недоступні. На практиці коефіцієнти гармонік вимірюють за нестандартними методиками, що робить результати неспівставними і знижує їх достовірність.

Аналіз літератури з обговорюваної теми засвідчив, що не всі дослідники однаково уявляють собі різні види спотворення корисного сигналу і їх взаємозв'язок. Викладеною вище класифікацією автори спробували викласти свою точку зору.

Відповідно до неї, одна і та ж нелінійність може характеризуватися або коефіцієнтом гармонік κ_2 , або коефіцієнтом інтермодуляційних спотворень κ_i .

Щоб виміряти перший з цих параметрів, необхідно на вхід підсилювача подати напругу синусоїдальної форми. За наявності нелінійності підсилювача сектор його вихідного сигналу міститиме нескінченне (у загальному випадку) число гармонік з різними амплітудами. Коефіцієнт гармонік κ_2 (для малих його значень) обчислюють за формулою

$$\kappa_2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1} 100\%,$$

де U_1, U_i – амплітуди відповідно першої і i -ї гармонік вихідного сигналу.

Щоб виміряти коефіцієнт інтермодуляційних спотворень κ_i на вхід підсилювача подають суму двох коливань різної частоти і амплітуди. Через нелінійність амплітудної характеристики на виході пристрою, окрім гармонік кожного з цих сигналів присутні комбінаційні складові, які власне і визначають величину κ_2 .

У загальному випадку коефіцієнти κ_2 і κ_i неоднакові. Їх співвідношення залежить від характеру нелінійності і коливається в широких межах. Проте, враховуючи, що κ_2 і κ_i характеризують одну і ту ж нелінійність, можна обмежитися вимірюванням тільки першого з цих параметрів, зробивши поправку, що враховує вплив κ_i тобто встановити норму на κ_2 , виходячи з допустимого рівня не гармонійних, а інтермодуляційних складових. В цьому випадку допустиме значення коефіцієнтів гармонік, природно буде менше, а його зниження буде непрямим чином характеризувати зменшення до прийнятого для експериментатора рівня інших спотворень. Виготовлений в результаті виконаної



Рисунок 1 — Нормуючий підсилювач УНЛ

роботи нормуючий підсилювач (див. рис. 1) має задовільні результати. Проте автори не виключають його подальше вдосконалення.

Література

1 Булат А.Ф. Геомеханические проблемы разработки угольных пластов на больших глубинах // Геотехническая механика: Межвед. науч.-техн. сб. – 1993. – Вып.1. – С. 24-28.

2 Булат А.Ф. Курносое А.Т. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наукова думка, 1989. – 168 с.

3 Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наукова думка, 1987. – 200 с.

4 Кирничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород. – К.: Наукова думка, 1989. – 184 с.

5 Ильин С.Р. Лопатин В.В. Послед Б.С. Программно-аппаратный комплекс для испытаний образцов горных пород. // Геотехническая механика: Межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 38. – С. 188-191.

6 Копей Б.В., Лопатин В.В., Копей І.Б. Вимірювальні засоби контролю та експрес-діагностики обладнання нафтогазового машинобудування // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1(6). – С.129-133.

7 Kopey B.V., Lopatin V.V. Designing of express-diagnostics of dynamic state of “lifting vessel-rigid reinforcement” system // Eastern-european journal of enterprise technologies, 2003, 2 (2), p.22-24. www.cs.vu.nl.

8 Lopatin V.V., Kopey B.V. Adequate interface in mobile information-measuring systems of mine elevating complexes and mine streaks // Transactions of 3rd International Conference “Special methods of deposit utilization”, Ostrava, October 6-7, 2005, pp.409-413.

9 Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ. / Под ред. У.Томпкинса и Дж.Уэбстера. – М.: Мир, 1992. – 592 с.