

В.М. Теслюк, Т.М. Матвійків,
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

ФОРМАЛІЗОВАНЕ ІНТЕГРАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ ТА РИЗИКУ ПОЛОМКИ БУРОВИХ ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ

© Теслюк В.М., Матвійків Т.М., 2011

Запропоновано математичну модель, яка дає змогу здійснювати формалізоване інтегральне оцінювання ресурсу роботи та ризику поломки бурових телеметричних систем.

Ключові слова: буріння, телеметрична система, вимірювання в процесі буріння.

A mathematical model is proposed which allows to carry out the formalized integral estimation of lifetime and failure risk of drilling telemetry systems.

Key words: drilling, telemetry system, MWD.

Вступ

Процес буріння свердловин супроводжується вібрацією бурової колони, зокрема і обтяженої бурової труби (ОБТ), встановленої в її нижній частині, в якій розміщена телеметрична система. Джерелом вібрацій являються удари бурової колони та ОБТ об стінки свердловини, удари долота об породу, згинальні удари тощо. Вібрації передаються на корпус телеметричної системи і розміщені в ньому прилади телеметрії, затруднюючи їх роботу, знижуючи їхні точність і надійність.

Основна частина

Вібрації залежно від інтенсивності дії (частоти і амплітуди) спричиняють появу в буровій колоні, зокрема і в телеметричній системі, пружних або пластичних деформацій [1]. Пружні деформації виникають за менш інтенсивних вібрацій, а пластичні – за інтенсивніших. Пружні деформації зумовлюють появу внутрішніх механічних напружень, які зменшують механічну міцність елементів телеметричної системи, знижують точність їх роботи та надійність. Після припинення дії “пружних вібрацій” попередня механічна міцність та точність контрольно-вимірювальних приладів відновлюється. Але у разі тривалої дії в елементах, які вібрують, появляються незворотні зміни, що зумовлюють появу в них мікротріщин, які поступово “ростуть”, об’єднуються і зрештою спричиняють руйнування. Досліди показують, що найбільші вібрації спостерігаються не під час власне буріння, а під час опрацювання стовбура пробуреної свердловини. Найнебезпечнішим під час вібрації є резонанс вимушених і власних коливань названих вище елементів телеметричної системи, бо руйнуючі зусилля зростають в декілька разів.

Успішне функціонування телеметричної системи визначається:

- способом з’єднання елементів;
- способом їх кріплення в корпусі;
- інтенсивністю вібрації;
- способом і режимом буріння тощо.

Вказані фактори можуть бути різними. Способи з’єднання елементів можуть об’єднувати об’ємний або друкований монтаж з використанням різевих з’єднань зварювання, паяння, склеювання або накрутки. Кріплення елементів у корпусі можна здійснювати за допомогою скоб, втулок, хомутів тощо. Вібрації бурової колони можуть бути різними (рис. 1):

- осьові, за яких відбувається підсакавання на забої долота і разом з ним бурової колони та телеметричних систем;

- поперечні, які являють собою бокові биття бурової колони та вихрові рухи долота;
- обертові (заклинювання – проворот), за яких відбувається заклинювання долота з наступним його проворотом;
- ексцентричні, що являють собою вихрові рухи прогнутої бурової колони.

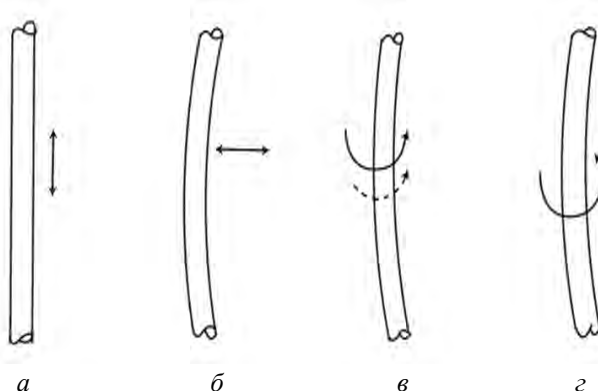


Рис. 1. Основні види вібрації бурової колони:
 а – осьові; б – поперечні; в – обертові; г – ексцентричні

Що стосується власне буріння, то воно може здійснюватись роторним або турбінним способом. У першому випадку бурова колона і долото обертаються електромотором, в другому – буровим розчином, який надходить на лопасті долота.

Режим буріння визначається:

- частотою обертання бурової колони та долота;
- осьовим навантаженням на долото;
- в'язкістю бурового розчину та швидкістю його подачі;
- температурою на забої тощо.

Для врахування їх спільного впливу необхідно було би в кожному конкретному випадку ставити окремий експеримент. Щоб уникнути цього, необхідна абстрактна модель, яка б описувала процес руйнування телеметричної системи і давала змогу прогнозувати її надійність. Для її отримання ми використали метод аналогій. На наш погляд, прототипом може слугувати модель, яка використовується для оцінювання надійності електрорадіоелементів (ЕРЕ), що в складі електронного апарата (ЕА) встановлені на певний транспортний засіб, наприклад, корабель, літак, ракету тощо, які є джерелом вібрації [2, 3]. У нашому випадку аналогом транспортного засобу є ОБТ, аналогом ЕА – телеметрична система, а аналогом ЕРЕ – елементи телеметричної системи.

Модель передбачає використання для смуги частот, в якій відбувається вібрація, середнього значення енергетичного спектра вібрації (середнього значення спектра прискорень) $G(\omega)$, який можна взяти з літературних джерел або визначити експериментально, наприклад, за допомогою акселерометра. Його орієнтовні значення для різних джерел вібрації наведені в таблиці.

**Орієнтовні значення смуги частот Δf
 та середнього значення енергетичного спектра $G(\omega)$, вібрації**

Джерело вібрації	Смуга вібрації Δf , Гц	Середній енергетичний спектр $G(\omega)$	Література
Ракети	До 2000	(10...20)g	[2]
Літаки	До 500	(5...10)g	[2]
Кораблі	До 100	(2...5)g	[2]
Бурова колона	До 100	≈ 50 g	Інтернет джерела

Для ОБТ смуга вібрації приймалась $0...f_p$, де f_p – власна резонансна частота, тому що під час ударів елементи вібрують з частотами, що дорівнюють їх власній резонансній частоті. Проведений аналіз показує, що телеметричну систему можна розглядати, як конструкцію з зосередженою масою

1, прикріпленою за допомогою пружних елементів 2 до ОБТ 3 (рис. 2А), або зосереджену масу 4, прикріплену за допомогою елементів 5 до корпусу телеметричної системи 6 (рис. 2Б).

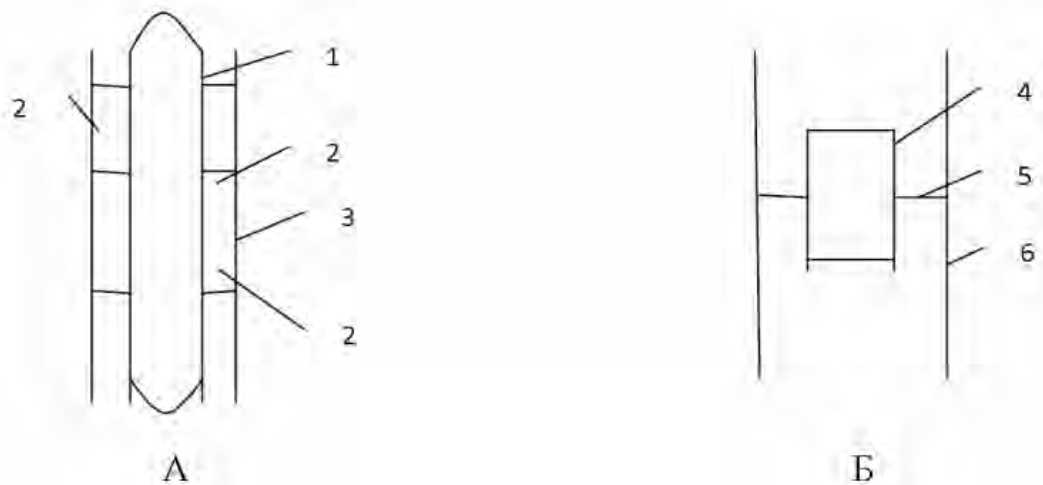


Рис. 2. Спрощені механічні моделі телеметричної системи (А) та елемента (наприклад, сенсора) телеметричної системи – (Б), 1, 6 – корпус телеметричної системи; 2 – елемент зв'язку корпусу з ОБТ; 3 – ОБТ; 4 – сенсор; 5 – елемент зв'язку сенсора з корпусом 6

Аналіз показує, що властивості таких моделей аналогічні властивостям лінійного електричного кола і тому можуть бути описані функцією передачі $K(j\omega)$. Але оскільки для вібрації фаза складових не є визначальною, то для аналізу можна використати лише модуль коефіцієнта передачі $K(\omega)$, тобто його амплітудно-частотну характеристику.

Для ЕА, наприклад касетної конструкції частотна залежність модуля коефіцієнта передачі $K(\omega)$, має максимум в області $f \approx 1000 \dots 5000$ Гц [2] (рис.3, крива 2). Це означає, що вони можуть вступати в резонанс з коливаннями, які генерують такі транспортні засоби, як кораблі, літаки, ракети, оскільки їхні частоти коливань на значних ділянках збігаються.

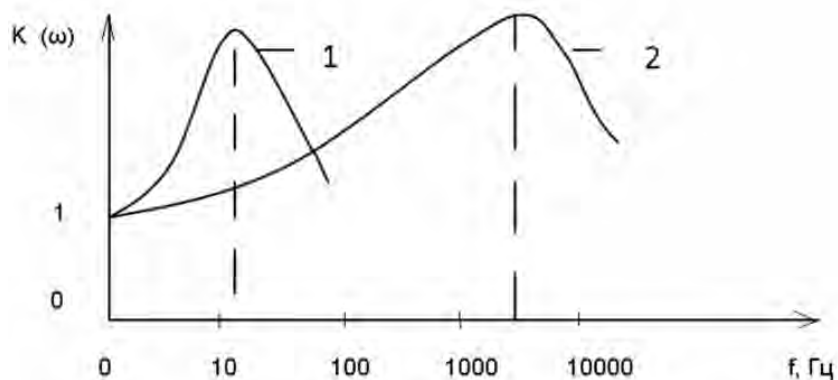


Рис. 3. Орієнтовна частотна залежність коефіцієнта передачі $K(\omega)$ для телеметричної системи (1) та ЕА (2).

Телеметрична система має приблизно на два порядки більшу за ЕА масу (≈ 300 кг [5,7]), і відповідно на два порядки меншу власну частоту коливань (рис.3, крива 1), оскільки зміна власної частоти коливань пропорційна зміні маси [6], тобто:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta m}{m}, \quad (1)$$

Виходить, що коливання телеметричної системи можуть вступати в резонанс з коливаннями бурової колони, оскільки на значній ділянці їхні власні частоти коливань збігаються.

Щодо сенсорів, пристроїв оброблення та передавання інформації, розміщених в корпусі телеметричної системи, то їхні власні частоти коливань через малу масу перебувають у діапазоні від сотні до тисячі Гц (рис. 4), тому їхній резонанс з коливаннями всієї телеметричної системи можливий лише на низьких частотах.

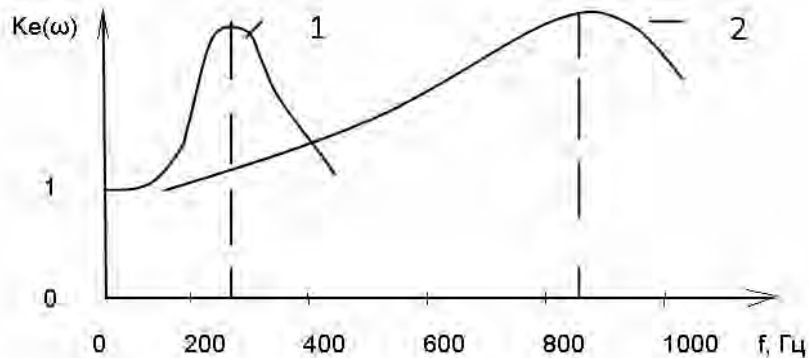


Рис. 4. Орієнтовна частотна залежність коефіцієнта передавання для дискретних ЕРЕ (1) та інтегральних мікросхем (2) $K_e(\omega)$

Спектр прискорень, яких набувають елементи телеметричної системи $G_e(\omega)$ (сенсори, пристрої оброблення та приймання інформації), визначаємо із виразу [2]

$$G_e(\omega) = G(\omega) \times K^2(\omega) \times K_e(\omega). \quad (2)$$

Нагадаємо, що тут $G(\omega)$ – спектр прискорень ОБТ; $K(\omega)$ – коефіцієнт передавання телеметричної системи; $K_e(\omega)$ – коефіцієнт передавання елементів телеметричної системи.

Швидкість нагромадження незворотних змін в елементах телеметричної системи залежить від інтегрального показника інтенсивності вібрацій, який визначається із виразу [3]:

$$K_{iB} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} G(\omega) \cdot K^2(\omega) \cdot K_e^2(\omega) d\omega \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Припускаючи, що спектр прискорення бурової колони рівномірний, запишемо вираз (3) в іншому вигляді:

$$K_{iB} = \left[G(\omega) \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_B} K^2(\omega) * K_e^2(\omega) d\omega \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де ω_B – верхня частота в спектрі вібрації бурової колони.

Оцінні розрахунки за формулою (4) і даних таблиці, рис. 2, і рис. 3 дають:

- для ракет $K_{iB} \approx 230$;
- для літаків $K_{iB} \approx 10$;
- для кораблів $K_{iB} \approx 5$;
- для бурової колони $K_{iB} \approx 12$.

Поступове нагромадження незворотних змін в елементах телеметричної системи призводить до їх відмови, і відповідно до відмови цілої системи. У лінійному наближенні модель, яка описує процес руйнування, можна подати у такому вигляді:

$$t_p = t_0 - a_k \times K_{iB} \times t, \quad (5)$$

де t_p – ресурс роботи телеметричної системи; t_0 – ресурс роботи за відсутності вібрації; a_k – коефіцієнт, який характеризує конструкцію і матеріал кріплення елементів телеметричної системи до корпусу; t – час роботи телеметричної системи.

У момент руйнування ресурс роботи стає нульовим, тобто $t_p = 0$. Тоді:

$$a_k \times K_{iv} \times t = t_0 \quad (6)$$

Звідси можна визначити час, що залишився до руйнування:

$$t = \frac{t_0}{a_k \times K_{iv}} \quad (7)$$

При $a_k \approx 1$:

$$t = \frac{t_0}{K_{iv}} \quad (8)$$

Тобто час, що залишився до руйнування, прямо пропорційний ресурсу роботи за відсутності вібрації t_0 і обернено пропорційний коефіцієнту інтенсивності вібрації K_{iv} .

Наприклад, за початкового ресурсу роботи вузла телеметричної системи 2000 год і коефіцієнта вібрації $K_{iv} = 10$, час, що залишився до відмови, становить ≈ 200 год. Наші спостереження за роботою телеметричних систем підтверджують справедливість виразу (8).

Вібрації, коефіцієнт інтенсивності яких $K_{iv} = 10-12$, приблизно на порядок зменшують ресурс роботи телеметричної системи.

Висновки

Отримана математична модель відмови телеметричної системи в лінійному наближенні дає можливість оцінювати за відомого коефіцієнта інтенсивності вібрації час, що залишився до відмови, тобто поточний ресурс її роботи.

1. Глудкин О.П., Черняев В.Н. *Технология испытания кроэлементов РЭА и ИМС.* – М.: Энергия, 1980. – 360 с. 2. Рычина Т.А. *Электрорадиоэлементы.* – М.: Советское радио, 1976. – 336 с. 3. Корпушин В.Б. *Вибрации и удары в радиоаппаратуре.* – М.: Советское радио, 1971. – 330 с. 4. *Радіотехніка. Енциклопедичний навчальний довідник за редакцією докторів Ю.Л. Мороза, Е.А. Магрального, В.І. Приводи.* – К.: КНТ “Вища школа”, 1999. – 231 с. 5. *Технічні дані з рекламних брошур різноманітних телеметричних та роторних керованих систем в бурінні.* 6. Жиров Г.А. *Технология гибридных интегральных микросхем.* – К.: Высшая школа, 1976. – 240 с. 7. Close David A., Owens Stevens C., Pugh Trevos K. *Англійський патент по глибокій вібрації.* – № 4903245. – 1990.