

свідчить збільшення прогнозованого коефіцієнта тертя більше ніж  $\mu=0,25$ . Останнє в свою чергу обумовить протікання патологічних процесів руйнувань поверхонь тертя. Але також, слід відмітити, що для еталонних станів моторних олив, тобто з не втраченими експлуатаційними властивостями, в аналізованих умовах відсутності подачі їх в зону тертя, більш надійний режим мащення буде забезпечувати мінеральна олива AZMOL 15W40, та взагалі – на грані руйнувань шарів, попередньо створених з її молекул,  $\mu=0,16-0,18$ .

Таким чином, використаний метод прямої екстраполяції дозволив теоретично виявити трибологічні стани елементів трибоз'єднань у підшипнику ковзання колінчастого валу при моделюванні дії сил механічного навантаження на мастильні утворення в умовах відсутності подачі моторних олив в зону тертя [4], тобто при мастильному голодуванні.

### Література

1.Кубіч В.І., Чернета О.Г., Мимоход Д.Ю. Вплив примусово зістарених моторних олив на трибологічний стан модельного трибоз'єднання/ Проблеми тертя та зношування. №3(96), 2022. К.: НАУ. С.41-52

2. Слинко Г.І. Вплив навантаження бензинового чотиритактового двигуна на критерій мащення шатунного підшипника колінчастого валу /Г.І. Слинко, В.І. Кубіч, В.І.Бокарев// Вісник двигунобудування. Запоріжжя, АО «Мотор Січ». т.1. 2019. с.18-28

3. Кубич В.И. Коэффициент трения триад «45XH2MФА - Lukoil-Super - AO20-1», «12X2H4 - Lukoil-Super - AO20-1» в условиях ступенчатого нагружения /В.И. Кубич// Проблеми тертя та зношування №61. 2013. К.: НАУ. С.37-45

4. Термінологічний словник-довідник з трибології, надійності та нанотехнологій / [Івченко Л. Й., Черкун В. Ю., Кубіч В. І., Черкун В. В.]; за заг. ред. Л. Й. Івченка – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – 116 с

Міщенко Ігор Вікторович, к.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, : [ivmishch@gmail.com](mailto:ivmishch@gmail.com)

Пивовар Дмитро Олегович, студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

### ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ НАДІЙНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

Розглядається задача визначення показників надійності (імовірність безвідмовної роботи, щільність відмов і середнього часу до руйнування) трубопроводних систем з урахуванням зовнішньої випадкової кінематичної дії з метою запобігання аварійних ситуацій на промислових об'єктах, об'єктах підвищеної небезпеки тощо.

При зовнішній кінематичній дії в різних елементах конструкції відбувається накопичення пошкоджень від втомленості, що призводить до виникнення тріщин, подальшого їх розвитку та руйнування або відмови.

Випадковий характер зовнішньої кінематичної дії призводить до необхідності рішення задачі статистичної динаміки і надійності в імовірнісній постановці. Аналіз накопичених пошкоджень в трубопроводній системі важливий для визначення її працездатності і запобігання аварій на різних об'єктах (літальні апарати, транспортні засоби різного призначення, металургійні підприємства та ін.).

Розрахунок конструкцій при вібраційному навантаженні розглянуто в роботі [1], розв'язання задачі надійності для елементів конструкцій при циклічному навантаженні та різних фізичних моделях відмов на основі двовимірних марковських моделей, загальну постановку задачі надійності з урахуванням зовнішнього випадкового кінематичного впливу розглянуто в роботі [2].

Розглядається задача визначення показників надійності – імовірності безвідмовної роботи, щільності відмов та середнього часу до руйнування – трубопроводної системи, представленої на Рис. 1. Передбачається, що зовнішній кінематичний вплив становить стаціонарний нормальний випадковий процес з відомою спектральною щільністю (Рис. 2).

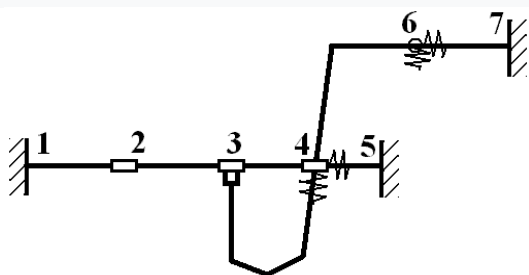


Рис. 1 – Трубопроводна система

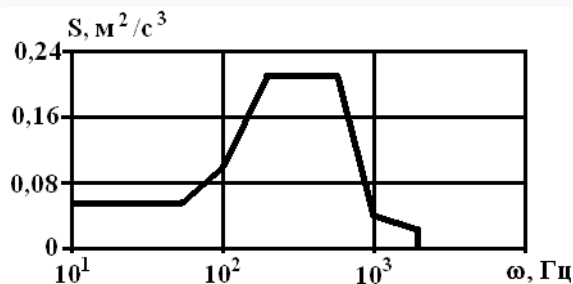


Рис. 2 – Спектральна щільність

На першому етапі у межах кореляційної теорії за допомогою методу скінчених елементів вирішується задача випадкових коливань аналізованої конструкції. Використовуючи співвідношення теорії пружності та методу скінчених елементів, отримуємо ймовірнісні характеристики напружень в окремих елементах конструкції. Визначивши найнебезпечніші з них, переходимо до другого етапу, який полягає у прогнозуванні надійності цих елементів [2]. Як правило, для даного класу конструкцій параметри напружено-деформованого стану видаються у вигляді суперпозиції квазігармонійних випадкових процесів, більше того, одна з форм коливань є домінуючою, що дозволяє для вирішення задачі надійності використовувати вузькосмуговий випадковий процес

$$y(t) = \lambda(t) \cos[\omega t + \varphi(t)],$$

(у загальному випадку необхідно за вибраним методом схематизації здійснити приведення вихідного процесу до еквівалентного за дією пошкодження вузькосмугового [1]).

На цьому етапі використовують наступні імовірнісні характеристики:

- одновимірну щільність імовірності  $f(\lambda)$  кривої, що огинає,  $\lambda(t)$  (амплітуди напружень);
- несучу частоту  $\omega$ ;
- кореляційну функцію  $K_y(\tau)$ .

Задача надійності вирішується з урахуванням різних чинників, у тому числі, імовірнісному завданні кривих втомленості матеріалу. Останнє дозволяє врахувати мікроструктурну неоднорідність матеріалу і отримати точніші в порівнянні з використанням детермінованої кривої втоми показники надійності конструкцій.

Розрахунки проводилися для системи, яка після скінченоелементної дискретизації налічувала 14 елементів, 15 вузлів. У системі є трійник 3, приварений до трубок, а також два з'єднання – 2, 4. Зовнішній діаметр трубок зліва від трійника  $d=0,022$  м, праворуч  $d=0,02$  м, для інших  $d=0,01$  м, товщина трубок  $h=0,001$  м, модуль пружності  $E=7 \cdot 10^4$  МПа, густина  $\rho=2,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Закріплення трубопроводу імітується за допомогою лінійних і кутових пружин кінцевої жорсткості.

Аналізуючи поведінку конструкції, оцінюючи вклад кожної з форм коливань, було розраховано середньоквадратичні відхилення напружень в елементах конструкції і визначені найбільш небезпечні з точки зору напружено-деформованого стану точки. При вказаній зовнішній дії найбільш небезпечною є 3-а і 4-а форма коливань системи, вклад інших форм в напружено-деформований стан значно (на один-два порядку) менший.

Розрахунки проводилися для різних значень дисперсії напружень  $\sigma_\lambda^2$  (МПа)<sup>2</sup>, що обумовлено введенням масштабного коефіцієнта для спектральної щільності. Для розрахунку імовірнісних характеристик міри ушкодження використовувалося кінетичне рівняння, що відповідає лінійній гіпотезі накопичення пошкоджень. Крива втомленості (шматково-постійна), що отримана експериментально на зразках конструкції, представлена на Рис. 3 (суцільна лінія) в координатах  $lg\lambda - lgN$  (тут  $N$  – число циклів) і має характеристики ( $m$  – показник кривої втоми)

$$m = \begin{cases} 6, & N < 2,5 \cdot 10^5, \lambda > 161,9 \text{ МПа} \\ 10, & 2,5 \cdot 10^5 \leq N < 5 \cdot 10^6, 120 < \lambda \leq 161,9 \text{ МПа} \end{cases}$$

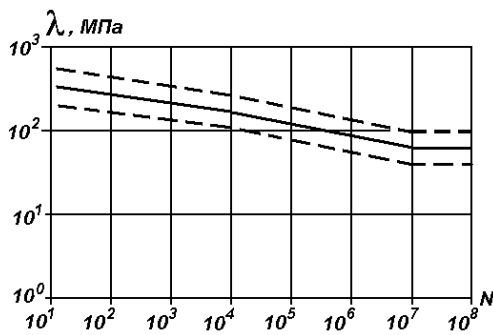


Рисунок 3 – Крива втомленості

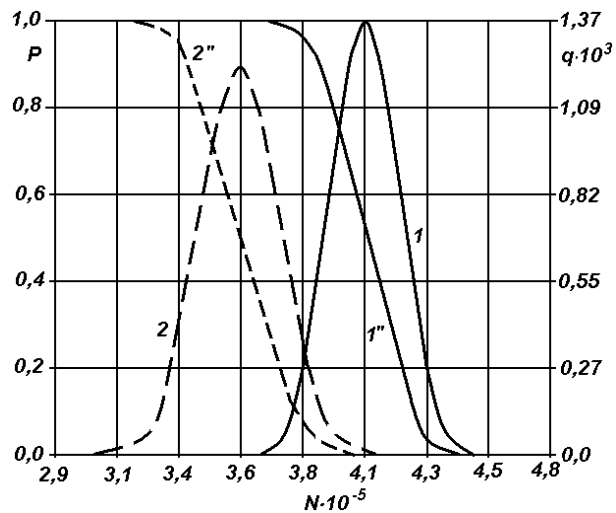


Рисунок 4 – Імовірність безвідмовної роботи та щільність імовірності відмов

Таким чином, можна визначити одновимірну щільність імовірності міри пошкоджень  $f(z, t)$ , за якою визначаються усі основні показники надійності для кумулятивних моделей накопичення пошкоджень: імовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  і щільність імовірності відмов  $q(t)$

$$P(t) = \int_0^1 f(z, t) dz ; \quad q(t) = -dP(t)/dt = -\int_0^1 df(z, t)/dt dz,$$

а також середній час  $m_T$  і дисперсія часу  $\sigma_T^2$  до руйнування

$$m_T = \int_0^{\infty} tq(t)dt ; \quad \sigma_T^2 = \int_0^{\infty} t^2q(t)dt - m_T^2.$$

У елементах трубопровідної системи відбувається накопичення пошкоджень від втоми, що може привести до її руйнування і відмови. У роботі наводяться чисельні дослідження за визначенням показників надійності вказаних конструкцій при випадковій кінематичній дії. Імовірнісне завдання кривої втоми дає занижене в порівнянні з детермінованою значення середнього ресурсу, що є важливим при оцінці працездатності об'єктів.

### Література

1. Гусев, А.С. Расчет конструкций при случайных воздействиях [Текст] / А.С. Гусев, В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
2. Жовдак, В.А. Прогнозирование надежности элементов конструкций с учетом технологических и эксплуатационных факторов [Текст] / В.А. Жовдак, И.В. Мищенко. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 120 с.