

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-10-86-40>

УДК 62-799

Рудь К.К., Поліщук І.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**МОНІТОРИНГ ВІБРАЦІЇ У ПЕРЕДБАЧУВАЛЬНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ**

Анотація. В даний час виробники та експлуатуючі організації прагнуть вести експлуатацію газотурбінних двигунів (ГТД) в складі газоперекачувальних стацій з їх технічного стану. Це дозволяє знизити вартість експлуатації, збільшити міжремонтний ресурс, знизити трудовитрати на обслуговування, своєчасну постановку на ремонт. Велике значення в зв'язку з цим набуває оснащення агрегатів сучасними комплексами, що дозволяють проводити діагностику технічного стану в процесі їх роботи, серед яких особливе місце займає вібродіагностика з сучасними засобами аналогової і цифрової обчислювальної технікою. На відміну від авіаційних двигунів, турбоагрегати газоперекачувальних стацій є об'єктом, де вібродіагностика може бути реалізована у всій її повноті. Це пов'язано з роботою турбоагрегатів практично на одних і тих же режимах протягом тривалого часу, що дозволяє організувати так званий трендовий контроль за будь-якою ознакою або їх сукупності, використовуюваному в цілях діагностики. Несподівані несправності обладнання можуть бути дорогими та потенційно катастрофічними, що призводить до непередбачуваного простою виробництва, дорогої заміни деталей і безпеки та екологічних проблем. Прогнозоване обслуговування (PdM) – це процес моніторингу обладнання під час експлуатації з метою виявлення будь-яких погіршень, що дозволяє планувати технічне обслуговування та зменшувати експлуатаційні витрати. Підшипники кочення – це най-важливіші компоненти, що широко використовуються в обертовому обладнанні, і якщо вони несподівано вийдуть з ладу, це може призвести до катастрофічної несправності з суміжними високими витратами на ремонт та заміну. Моніторинг стану на основі вібрації може використовуватися для виявлення та діагностики несправностей машини та є основою стратегією прогнозованого обслуговування.

Ключові слова: прогнозування несправностей, предиктивний аналіз, моніторинг вібрації, підшипник, вібродіагностика.

Rud Kristina, Polishchuk Ihor

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**VIBRATION MONITORING IN THE PREDICTIVE MAINTENANCE**

Summary. Currently, manufacturers and operating organizations seek to operate gas turbine engines (GTE) as part of gas pumping stations from their technical condition. This allows you to reduce the cost of operation, increase the service life, reduce labor costs for maintenance, timely repair. Of great importance in this regard is the equipment of units with modern systems that allow you to diagnose the technical condition in the process of their work, among which a special place is occupied by vibration diagnostics with modern means of analog and digital computers. Unlike aircraft engines, turbine units of gas pumping stations are an object where vibration diagnostics can be implemented in its entirety. This is due to the operation of turbines in almost the same modes for a long time, which allows you to organize the so-called trend control of any feature or set of them used for diagnostic purposes. In some industries, maintenance is the second largest or even the largest element of operating costs and thus becomes a priority for cost control. Equipment failure affects not only the availability of the installation, but also the safety, environment and product quality. It can also affect customer service in terms of missed deadlines and loss of trust. The complexity and cost of modern installations and equipment means that monitoring the condition of installations is now a much more cost-effective option. Although many industries still respond to maintenance because there are no advanced costs, they pay a price due to increased downtime or loss of production. Vibration monitoring is still perhaps the most widely used method of predictive maintenance and, according to a rare with the exception, it can be applied to a wide range of rotating equipment. Vibration monitoring allows you to determine the condition of the equipment during its operation and to identify those elements that begin to show signs of wear before they really fail, sometimes catastrophically. With this approach, unplanned downtimes are reduced or eliminated, which increases the availability and efficiency of the installation and reduces costs in addition to an experienced vibration analyzer. However, in the case of rolling bearings, the characteristic vibrating signatures are often formed in the form of modulation of the basic frequencies of the bearings. This can be used to advantage, and vibration control software is often designed to detect these characteristics and provide early warning of an approaching problem. This usually takes the form of a demodulation of the signal and the envelope spectrum, indicating early deterioration of the rolling / sliding surface of the contact surfaces.

Keywords: fault prediction, predictive analysis, vibration monitoring, bearing, vibration diagnostics.

Постановка проблеми. Оскільки більш-менш ставляться до існуючих активів у плані збільшення випуску продукції або підвищення ефективності, все більш важливою стає потреба зрозуміти, коли все починає йти не так. Додайте до цього зростаючу складність та автоматизацію обладнання, важливішим є правильне структурування та фінансування стратегії обслуговування.

Необхідно також зрозуміти роботу обладнання, щоб можна було покращити виробництво та ефективність виробництва. У сьогоднішньому більш конкурентоспроможному світі всі ці питання мають ключове значення, і їх можна досягти лише за допомогою належно структурованої та фінансованої стратегії обслуговування, що відповідає потребам бізнесу. Технічне обслуговування часто може бути

випадковістю, оскільки підприємства прагнуть заощадити витрати. Як часто ми чули слова "у нас не було проблем з моменту встановлення обладнання, тому нам не потрібно моніторинг стану". Це часто відбувається через незнання та не призводить до належної оцінки ризику для виявлення критичності існуючих активів, фінансованої стратегії обслуговування. Необхідність підвищити ефективність роботи заводу, але часто з меншою кількістю людей, чинить все більший тиск на всіх зацікавлених, коли обладнання виходить з ладу перед-часно. Коли обладнання виходить з ладу, часто це відбувається в найзручніший час, або посеред ключового процесу, у вихідні або посеред ночі, коли отримання запасних частин може бути складним, а витрати на оплату праці високі через понаднормовий час. Хоча ніколи не буває сприятливого часу для виходу з ладу обладнання, наявна на сьогоднішній день технологія визначає, що просто немає приводу для того, щоб не вжити необхідних заходів для захисту основних активів. Цього можна досягти, мінімізувавши ризик ранніх та несподіваних збоїв за допомогою належним чином структурованої та фінансованої стратегії технічного обслуговування, яка в кінцевому рахунку зменшить загальні експлуатаційні витрати. Витрати на відсутність надійної стратегії технічного обслуговування не слід недооцінювати. Це не слід розглядати просто як зайву вартість, а розглядати як інвестицію для захисту та захисту основних активів, зменшуючи потребу в дорогому ремонті та захищаючи вихід з ладу ключових процесів. У деяких галузях технічне обслуговування зараз є другим за величиною або навіть найбільшим елементом експлуатаційних витрат. Як результат, воно перемістилося майже з нізвідки на вершину ліги як пріоритет контролю витрат протягом останніх двох-трьох десятиліть.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Технічне обслуговування традиційно проводиться у встановлені часові інтервали, як так зване профілактичне обслуговування, або шляхом корективного обслуговування, коли фактично відбувається поломка або несправність. В останньому випадку як правило потрібно проводити дії з технічного обслуговування негайно, але в деяких випадках, це може бути відкладено залежно від критичності обладнання та наявності резерву. При передбачуваному технічному обслуговуванні дається вдосконалене попередження про майбутню проблему, а ремонт проводиться лише в разі необхідності і може бути запланований, щоб уникнути великих перебоїв.

Реактивне технічне обслуговування машин, яке часто називають підходом "запуск до відмови", передбачає виправлення неполадок лише після їх виникнення. Звичайно, це найпростіший і найдешевший підхід з точки зору перших витрат на технічне обслуговування, але часто призводить до затратних вторинних збитків разом з високими витратами, внаслідок незапланованого простою та збільшення витрат на оплату праці та запчастини. Оскільки немає перших витрат, це часто розглядається як просте рішення багатьох стратегій технічного обслуговування – або стратегії взагалі немає. У обладнанні, що обертається, підшипники кочення є одним з найбільш важливих компонентів як з точки зору їх первісного вибору, так і, що не менш важливо, з точки зору їх обслуговування. Виробники підшипників дають докладні вказівки щодо того, що потрібно для

техобслуговування, а це часто не береться до уваги. Та може мати катастрофічні наслідки з точки зору низької якості продукції, зниження ефективності установки або виходу з ладу обладнання. Тому необхідно стежити за станом підшипників кочення, а моніторинг на основі вібрації з більшою ймовірністю виявляє раннє виникнення несправності [1].

За допомогою превентивного технічного обслуговування (ПМ) обладнання регулярно ремонтується, незалежно від стану деталей. Зазвичай це стосується планування регулярних відключень машин/установок, незалежно від того, потрібні вони чи ні. Процес може усунути збої до того, як вони відбудуться, але це також призведе до збільшення витрат на технічне обслуговування, оскільки деталі замінюються, коли це не обов'язково потрібно.

Частим і прямим результатом профілактичного обслуговування є те, що значна частина технічного обслуговування проводиться тоді, коли в першу чергу немає нічого поганого. Якщо агрегат можна контролювати таким чином, щоб попередньо попереджати про проблему, значну економію витрат можна отримати, уникаючи зайвих ремонтних робіт. Такий підхід відомий як прогнозне обслуговування.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Підшипники кочення широко використовуються практично в кожному типі обертового обладнання, успішна і надійна робота яких в значній мірі залежить від типу підшипника, посадок підшипників і вимог до встановлення та технічного обслуговування, таких як повторне змащення. Основною проблемою є погіршення роботи підшипників кочення яке може призвести до відмов дорогого обладнання з високими пов'язаними витратами. Позапланові простої, дорога заміна обладнання, проблеми охорони здоров'я і безпеки та екологічні проблеми – все це потенційні наслідки стратегії планового технічного обслуговування, яка не в змозі відстежувати та прогнозувати проблеми з обладнанням до того, як вони перейдуть у більш серйозну ситуацію.

Мета статті. Головною метою даної статті є опис моніторингу стану на основі вібрації, який може використовуватися для виявлення та діагностики несправностей машини та є основою стратегією прогнозованого обслуговування. Стаття спрямована на створення основи для проектного рішення системи моніторингу стану на основі вібрації підшипників різного призначення з можливістю зберігання та обробки отриманих даних для прогнозування виходу з ладу обладнання. Ідея полягає в тому, щоб описати від чого залежить тип генерованого сигналу вібрації.

Виклад основного матеріалу. Прогнозне обслуговування (PdM) – це процес моніторингу стану машин під час роботи, щоб передбачити, які деталі можуть вийти з ладу та коли. Таким чином можна планувати технічне обслуговування і є можливість змінити лише ті деталі, які виявляють ознаки зносу або пошкодження. Основний принцип передбачуваного обслуговування полягає в проведенні вимірювань, які дозволяють передбачити, які частини будуть руйнуватися і коли. Ці вимірювання включають вібрацію машини та робочі дані установки, такі як витрата, температура чи тиск. Постійний моніторинг заздалегідь виявляє виникнення проблем із компонен-

тами, а це означає, що технічне обслуговування проводиться лише за потреби. При такому підході скорочується або усувається незапланований час простою і зменшується ризик катастрофічного збою. Це дозволяє замовляти деталі більш ефективно, тим самим мінімізуючи товарні запаси, а кількість робочої сили може бути запланована, тим самим підвищуючи ефективність та зменшуючи витрати на понаднормовий робочий день.

Основними перевагами PdM є:

- підвищена надійність машини за рахунок ефективного прогнозування відмов обладнання;
- скорочення витрат на обслуговування за рахунок мінімізації простоїв через планування ремонту;
- збільшене виробництво за рахунок більшої доступності машини;
- зниження споживання енергії;
- подовжений термін служби підшипника;
- поліпшення якості продукції.

Підшипники кочення часто є ключовим елементом у багатьох різних ти-пах обладнання та обладнання, що охоплюють усі сектори ринку. З одного боку, вони можуть бути стандартного дизайну, легко доступними та недорогими товарами з невеликою вартістю і призначені для звичайних вентиляторів, насосів і т.д. А з іншого боку, вони можуть бути спроектованими з тривалим часом експлуатації і коштують сотні тисяч доларів, наприклад, для вітрових турбін.

Однак у них є одна спільна риса: якщо вони несподівано вийдуть з ладу, вони можуть призвести до відключення обладнання, що призведе до втрати виробництва вартістю від кількох тисяч до багатьох мільйонів доларів. За допомогою стратегії передбачуваного обслуговування таких великих витрат можна уникнути, попередньо попереджаючи про потенційну проблему, що дозволяє планувати та вживати коригувальні заходи у зручний час.

Заміна підшипника в коробці передач є кращою, ніж заміна цілої коробки передач, а заміна підшипника двигуна краще, ніж необхідність відправляти двигун на перемотування, щоб зробити дорогий ремонт та замінити деталі.

В основі багатьох стратегій прогнозованого обслуговування лежить стан моніторингу, який виявляє потенційні дефекти критичних компонентів, наприклад підшипники, шестірні тощо на ранній стадії, таким чином дозволяючи планувати заходи по технічному обслуговуванню, економлячи як час, так і гроші та запобігаючи вторинному пошкодженню обладнання, що часто може бути катастрофічним.

Контактні підшипники кочення застосовуються майже в усіх типах обертових машин, успішна і надійна робота яких дуже залежить від обраного типу підшипника, а також від точності всіх пов'язаних компонентів, наприклад, вал, корпус, розпірки, гайки тощо. Інженери підшипників, як правило, використовують "втому" як звичайний режим відмови, якщо припустити, що підшипники правильно встановлені, експлуатуються та обслуговуються. Завдяки вдосконаленням технології виготовлення та матеріалів, тривалість стомлення, що пов'язана з поверхневими напруженнями, як правило, вже не є обмежуючим фактором і, ймовірно, складає менше 3% відмов у обслуговуванні. На жаль, багато підшипників виходять з ладу передчасно внаслідок забруднення, поганого змащування, нерівності,

температурних перевантажень, поганої підгонки/приспосовування, незбалансованості та нерівності. Всі ці фактори призводять до збільшення вібрації підшипників, а моніторинг стану застосовується протягом багатьох років для виявлення деградуючих підшипників, перш ніж вони катастрофічно виходять з ладу при пов'язаних з цим витратах простою або значних пошкодженнях інших деталей машини.

Підшипники кочення елементів невеликого та середнього розміру часто використовуються в електродвигунах для чутливих до шуму застосувань, наприклад, побутова техніка. Отже, вібрація стає все більш важливою як з точки зору навколишнього середовища, так і через те, що вона є синонімом якості.

Моніторинг вібрацій тепер став загальною частиною багатьох режимів прогнозування технічного обслуговування та спирається на добре відомі типові сигнали вібрації, які підшипники кочення демонструють у міру руйнування поверхонь кочення. Однак у більшості ситуацій вібрацію підшипника неможливо виміряти безпосередньо, і сигнатура вібрації підшипника змінюється структурою машини. Ця ситуація ще більше ускладнюється вібрацією іншого обладнання на машині, такого як електродвигуни, шестірні, ремені, гідравліка, конструктивні резонанси тощо. Це часто ускладнює інтерпретацію даних про вібрацію, окрім кваліфікованого фахівця, і, в деяких ситуаціях, може призвести до помилкового діагностування, що призводить до непотрібного простою машини та витрат.

Контактні підшипники кочення являють собою складну систему вібрації, компоненти якої, наприклад, елементи кочення, внутрішня доріжка, зовнішня доріжка та клітка взаємодіють для створення складних сигналів вібрації [2]. Хоча підшипники кочення виготовляються із застосуванням високоточних верстатів та під суворим контролем чистоти та якості, вони мають ступінь недосконалості, як і будь-яка інша виготовлена деталь, і створюють вібрацію, коли поверхні взаємодіють завдяки комбінації кочення та ковзання. Незважаючи на те, що амплітуди поверхневих недосконалостей зараз мають порядок нанометрів, вібрації все ще можуть вироблятися у всьому звуковому діапазоні частот (20 Гц-20 кГц). Оскільки шорсткість поверхні і хвилястість виникають безпосередньо в процесі виготовлення несучих компонентів, дискретні дефекти відносяться до пошкодження рухомих поверхонь внаслідок збирання, забруднення, експлуатації, монтажу, поганого обслуговування тощо.

Ці дефекти можуть бути надзвичайно малі і важко виявити, проте вони можуть мати значний вплив на обладнання, що має критичне значення вібрації, або можуть призвести до скорочення терміну експлуатації. Цей тип дефекту може приймати найрізноманітніші форми: відсутність, подряпини вздовж і поперек кочення поверхонь, ями, сміття та частинки мастила. Під час раннього розвитку несправності вібрація має тенденцію до імпульсивності, але змінюється в міру розвитку дефекту і збільшення.

Тип генерованого сигналу вібрації залежить від багатьох факторів, включаючи навантаження, внутрішній зазор, змащення, установку та тип підшипника. Оскільки дефекти внутрішньої кільцевої колії повинні проходити через ряд інтерфейсів, таких як мастильна плівка між внутрішньою кільцевою доріжкою кочення та елементами

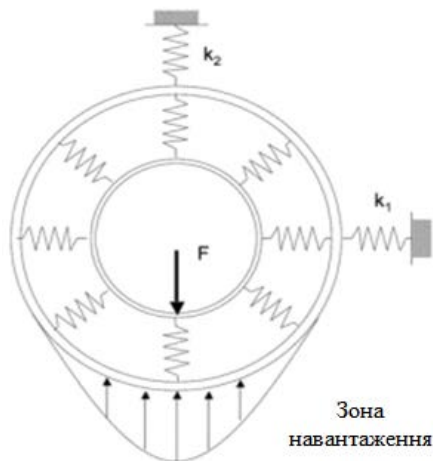


Рис. 1. Проста модель підшипника при радіальному навантаженні

кочення, між елементами кочення і зовнішньою колею та між зовнішнім кільцем та корпусом, вони мають тенденцію бути більш ослабленим, ніж дефекти зовнішнього кільця, і тому їх іноді може бути складніше виявити. Коли починається дефект, на частоті проходження кулі може формуватися одна спектральна лінія, і коли дефект стає більшим, він дозволяє переміщати вал, що обертається, і частота проходження кулі стає модульованою при швидкості обертання вала. Ця модуляція генерує бічну смугу при швидкості вала. Оскільки дефект збільшується в розмірах, може утворюватися більше бічних смуг, поки в якийсь момент частота пропускання кулі вже не може генеруватися, але виникає ряд спектральних ліній, розташованих на швидкості обертання вала. Дефектний елемент кочення може генерувати вібрацію з подвоєною швидкістю обертання, коли дефект стосується внутрішніх і зовнішніх доріжок кочення. Вібрація, створювана дефектною кулькою, може бути не дуже високою або взагалі не генеруватися, оскільки вона не завжди знаходиться в зоні навантаження, коли дефект потрапляє в доріжку кочення. Коли дефект контактує з доріжкою, він може часто модулювати інші частоти, тобто частоту дефекту кулі, частоту проходу кулі або частоту обертання вала, і відобразитися у вигляді бічної смуги. Частота обертання клітини може генеруватися від сильно зношеної або пошкодженої клітини. У кульковому підшипнику елементи кочення можуть ніколи не генерувати частоту обертання кулі або подвоєну частоту обертання кулі через поєднання кочення і ковзання і постійної зміни осі обертання кулі. В циліндричних підшипниках пошкодження часто відбувається по всій поверхні кочення, тому частота обертання кочення ніколи не виникає. Це відбувається при радіальних або нерівних навантаженнях, є при-

тамною особливістю підшипників кочення і абсолютно не залежить від якості. Радіальні або нерівні навантаження підтримуються декількома елементами кочення, обмеженими вузькою областю, а радіальне положення внутрішнього кільця щодо зовнішнього кільця залежить від пружних прогинів на контактному елементі/контактах колі, рис. 1. Зовнішнє кільце підшипника зазвичай підтримується гнучким корпусом, який, як правило, має властивості асиметричної жорсткості, описані лінійними пружинами різної жорсткості.

В міру обертання підшипника окремі кульки навантажуються, а отже, і еластичні прогини змінюються для створення відносного руху між внутрішнім і зовнішнім кільцем. Рух має форму локосу, який є двовимірним і міститься у радіальній площині під радіальним навантаженням, тоді як він тривимірний при нерівності. Рух також є періодичним, з базовою частотою, рівною швидкості, з якою прокатні елементи проходять через зону навантаження. Частотний аналіз руху дає базову частоту і ряд гармонік. Таким чином, навіть геометрично досконалий підшипник створюватиме вібрацію через відносний періодичний рух між внутрішнім і зовнішнім кільцем через пружні прогини колі. Змінна вібрація сильно залежить від кількості елементів кочення, що підтримують зовнішнє навантаження, чим більша кількість звантажених елементів кочення, тим менше вібрація. Для радіально навантажених або нерівних підшипників "ходовий зазор" визначає ступінь області навантаження, отже, змінна відповідність зазвичай збільшується при радіальному внутрішньому зазорі. Розрізняють "ходовий зазор" і радіальний внутрішній зазор (РВЗ). При встановленні на машину "ходовий зазор" зазвичай менший, ніж РВЗ, через диференціальне теплове розширення та перешкоди для кільця. На високих швидкостях застосування слід враховувати також ефект відцентрової сили. Змінні рівні вібрацій відповідності можуть перевищувати рівень, що виникає внаслідок шорсткості та хвилястості поверхонь, що котяться. Однак у випадках, коли вібрація є критичною, її можна знизити до незначного рівня, використовуючи кулькові підшипники з правильним рівнем осевого попереднього навантаження.

Висновки і пропозиції. Запровадження моніторингу вібрацій який є найбільш широко використовуваним методом прогнозного технічного обслуговування і за рідкісним винятком, може застосовуватися до широкого кола обертового обладнання. Моніторинг вібрації дозволяє визначити стан обладнання під час його роботи і виявити ті елементи, які починають проявляти ознаки зносу до того, як вони дійсно виходять з ладу. При такому підході незаплановані простої скорочуються або усуваються, що збільшує доступність і ефективність установки і знижує витрати.

Список літератури:

1. Резник Д. О., Поліщук І. А. Система вібродіагностики, прогнозування відмов та оцінки стану турбогенератора. *Молодий вчений*. 2019. № 11(75). С. 694–697.
2. Лейсі С.Дж. Огляд аналізу вібрації підшипника. 2008. № 23. С. 32–33.

References:

1. Rezyuk, D.O., & Polishchuk, I.I. (2019). Systema vibrodiahnostyky prohnouzuvannya vidmov ta otsinky stanu turbogeneratora [Vibrodiagnostic and failure prediction system of turbine installation]. *Molodyi vchenyi*, vol. 75, no. 11, pp. 694–697.
2. Lacey, S.J. (2008). Ohliad analizu vibratsii pidshyynyka [An Overview of Bearing Vibration Analysis], vol. 23, pp. 32–33.