

Д.В. ЧЕРКАШИН, С.О. ГУБСЬКИЙ, В.Л. ЧУХЛІВ

ТЕЛЕМЕТРИЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ВАЛАХ ТРАНСМІСІЙНИХ СИСТЕМ

У статті виконано огляд телеметричних систем, що застосовуються для вимірювання обертальних коливань у галузях промисловості. Показані переваги і недоліки різних принципів вимірювання і передачі вимірних даних з валів, що обертаються в лініях приводу прокатних станів та **трансмісійних систем**. Наведено опис розроблених цифрових телеметричних вимірювачів обертальних коливань у складі стаціонарної системи моніторингу динамічних навантажень з функціями діагностики зносу (кутових зазорів) за допомогою яких проводиться спостереження за крутним моментом, який допомагає запобігти поломки, дозволяє планувати технічне обслуговування і збільшує продуктивність.

Ключові слова: напруження, момент, датчики, привод, прокатний стан, редуктор, вал, динамічні удари, трансмісійна система.

D. CHERKASHYN, S. HUBSKYI, V. CHUKHLIV

TELEMETRY SYSTEMS FOR MONITORING DYNAMIC LOADS ON TRANSMISSION SYSTEM SHAFTS

The article provides an overview of telemetry systems used to measure rotational vibrations in industrial sectors. Indications advantages and disadvantages of various principles of measurement and transmission of measured data from shafts rotating in the drive lines of rolling mills and transmission systems. The article describes the developed digital telemetry meters of rotational vibrations as part of a stationary dynamic load monitoring system with functions for diagnosing wear (angular gaps), which are used to monitor the torque, which helps prevent breakdowns, allows you to plan maintenance and increases productivity.

Keywords: stress, moment, sensors, drive, rolling mill, reducer, shaft, dynamic beats, transmission system.

Вступ. Вимірювання крутного моменту дозволяє проводити моніторинг приводних систем прокатних станів. Проблеми, що виникають в процесі виробництва в компонентах трансмісії, проявляються переважно у вигляді коливань крутного моменту.

Система вимірювання крутного моменту є надійним способом вимірювання крутного моменту шпинделів прокатного стану та трансмісійних систем. Він забезпечує постійне вимірювання в режимі реального часу, засноване на принципі вимірювання за допомогою тензометричних датчиків. Датчики, встановлені на частинах стану, що обертаються, посилюють вимірювальні сигнали безпосередньо на сервер.

Аналіз факторів, що впливають на крутний момент.

Фактори які можуть впливати на крутний момент можна класифікувати за наступними категоріями:

- різні биття, а також зазори в підшипниках ковзання і кочіння;
- ексцентриситет і нерівноваженість валків, що впливають при наростанні швидкості;
- власні коливання подушок валків;
- дефекти прокату на попередніх технологічних стадіях;
- явища фрикційного характеру в підшипниках і редукторах.

Всі перераховані вище фактори, накладаються один на одного в широкому діапазоні частот, що в свою чергу, сприяє розвитку фази вібрацій (починають проявлятися автоколивання в механічній системі). Дані незатухаючі коливання, підтримувані самою системою з певною періодичністю, вельми згубно позначаються на всій конструкції стану. Зрештою, це може призвести до аварійних ситуацій, таких як пошкодження заготовки, пошкодження робітників і опорних валків, що викликають простої і надмірної витрати валків.

В даний час в різних країнах розробляють, виробляють і використовують телеметричні датчики крутильних коливань на обертових валах в наступних галузях промисловості:

- металургійної, в лініях приводу прокатних станів;
- суднобудівної, на установках із двигунами внутрішнього згоряння;
- автомобільної, при випробуваннях трансмісій машин;
- авіаційної, при випробуваннях приводів гелікоптерів.

Зубчасті колеса приводів є найпоширенішими видом з'єднання передачі крутного моменту. За час використання як з урахуванням зміни конструкцій, так і режимів експлуатації передач визначено основні найбільш типові види пошкодження зубчастих коліс, що є причинами виходу з ладу зубчастих передач або призводять до різкої зміни умов експлуатації і руйнування деталей [1].

Під певним навантаженням зубці коліс, що входять у зачеплення, деформуються, що призводить до руйнування зачеплення. Деформація зуба зазвичай кількісно визначається величиною жорсткості зуба, яка визначається як співвідношення навантаження до деформації. При проектуванні параметрів зубчастого колеса важливим кроком є зосередження на досягненні бажаної жорсткості зубів.

Вібрації від шестерень, що передаються на корпус коробки передач, є найбільш істотним джерелом шуму [2-6]. З фізичної точки зору причиною вібрацій є динамічна сила, яка може змінювати свою амплітуду, напрям або поле дії. При евольвентному зачепленні найбільш суттєвою зміною є амплітуда, основною причиною якої є змінна жорсткість зачеплення та удари при вході зубів у зачеплення через деформації та відхилення кроку та профілю зубів, які відрізняються від теоретичного кроку та профілю.

Також потрібно враховувати, що не можливо уникнути зношування, що викликає спотворення профілю зубця і може привести до істотного ослаблення ніжки зубця. Спотворення профілю викликає зростання динамічних навантажень біля основи зубця, а також зниження згинальної міцності *зубців*, що може привести до деформування зуба – рис.1.

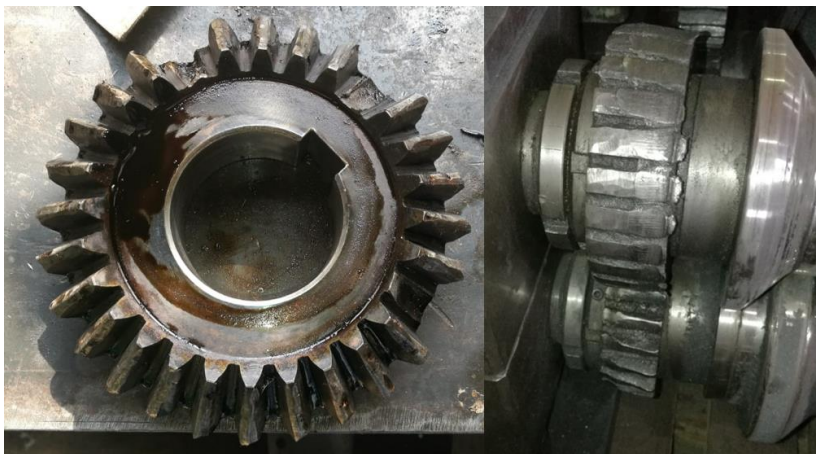


Рис. 1 – Руйнування зубця від великих динамічних ударів

Відмови через періодичні ударні навантаження можуть бути від *оберткових коливань*. Вплив - це один або кілька циклів вібрації, які зазвичай виникають під час запуску, зупинки, зміни швидкості або є результатом механіки процесу. Знову ж таки, величина напружень і частота їх виникнення визначатимуть втомну довговічність.

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є - здійснити аналіз існуючих систем фіксації крутних моментів та факторів, які впливають на нього. На основі здійсненого аналізу обрати напрямок подальших досліджень.

Технічні засоби та методи моніторингу динамічних навантажень. Запропоновані на ринку системи безконтактного вимірювання *оберткових коливань* мають високу вартість, а багато з них не пристосовані для роботи в умовах прокатного виробництва по діапазонах вимірювань та захисного виконання. Дослідження крутильних коливань у лініях приводу

багатьох прокатних станів дозволили розробити спочатку аналоговий, а останнім часом цифровий телеметричний вимірювач крутильних моментів з безконтактною передачею даних на основі тензорезистивних датчиків. Вимірювач може застосовуватися на різних об'єктах, як для тимчасових вимірювань при випробуваннях редукторів, так і у складі стаціонарних систем моніторингу [7]. При розробці вимірювача враховано всі особливості та недоліки зарубіжних аналогів із схемних рішень, конструктивного виконання. Однак, відсутня нормативна база проведення вимірювань *оберткових* коливань приводів клітей прокатних станів після їхньої модернізації або капітальних ремонтів. Це викликає протиріччя інтересів постачальників та замовників обладнання, гарантійним терміном експлуатації редукторів та шестеренних клітей.

Накопичення в системі моніторингу даних про цикли навантажень потребує розробки нових методів їхньої статистичної обробки для оцінки довговічності редукторів з урахуванням нелінійних ефектів. На відміну від амплітудного розподілу навантажень, що зазвичай застосовується, вхідні технологічні навантаження описуються спектрами (амплітудно-частотними розподілами), які враховують частоту наростання моменту на валках при захопленні металу. Динамічні навантаження у кожному пружному зв'язку трансмісії визначаються у час на основі передатних функцій. Відомо, що при близькості двох перших власних частот лінії приводу відбувається посилення коливань за рахунок биття. Для усунення цього ефекту шляхом «розведення частот» зазвичай пропонується змінювати конструктивні параметри ліній приводу, що складно реалізується на станах, що працюють. Ефект зниження динаміки може бути досягнутий також зміною спектра вхідного навантаження таким чином, щоб середнє значення частоти наростання моменту прокатки на основному сортаменті потрапляло між двома нижчими частотами лінії приводу, що може виконуватися перерозподілом обтискань по клітях в межах, що допускаються за технологією та навантажувальною здатністю обладнання. Це відповідає методу, відомому з теорії автоматичного управління, коли нулі передавальної функції (коріння полінома чисельника), відповідні вхідної дії, розміщують між полюсами (коріння полінома знаменника), що визначають динамічні властивості системи [8, 9].

При аналізі існуючих систем можна зазначити використання даних про крутний момент для визначення впливу навантаження на вимірювання вібрації, вимірювання крутного моменту також можуть використовуватися для попередження операторів про несприятливі умови. Коли амплітуда крутильних коливань вимірюється безперервно, можна підрахувати кількість випадків, коли амплітуда перевищує певний поріг, що дозволяє вжити коригувальні дії до виникнення втомного руйнування. Ці порогові значення можуть бути визначені на основі аналізу напруження компонента, що передає крутний момент, або на основі значення, кратного номінальному робочому крутному моменту, що вказує на ненормальні умови [10]. Приклад несприятливого крутильного коливання під час запуску та несприятливі крутильні коливання від збоїв в процесі роботи показані на рис. 2.

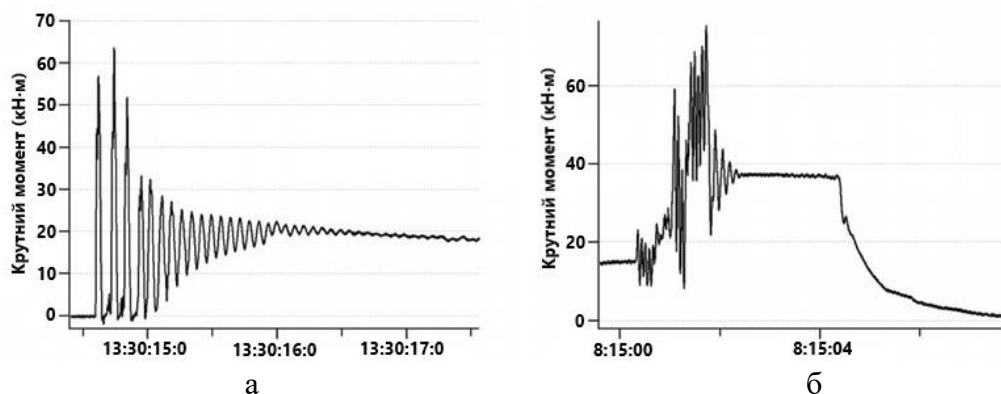


Рис. 2 – Різні типи несприятливих крутильних коливань:
а – які можуть виникати під час запуску; б – під час збоїв в процесі

Спектральні дані нададуть аналітику інформацію про частоти, присутні в осцилограмі. Умови процесу і кутові зазори, такі як люфт або знос, можуть викликати крутильні коливання всередині обладнання; проте, найчастіше можна побачити власні частоти системи в спектральних даних. Це частота, на якій вал коливається після ударного навантаження або коли робоча швидкість збігається з власною частотою кручення. У той час як для трансмісії існує нескінченне число власних частот кручення, цілком ймовірно, що спостерігаються тільки перші дві. Власні частоти вищих порядків набагато менш енергійні і важче збуджувати. Спектральні дані можуть бути використані для перевірки теоретичних розрахунків власних крутильних частот, щоб можна було правильно оцінити зміни робочих швидкостей для уникнення несприятливих умов. Крім того, емпіричні дані дозволять «нормалізувати» математичну модель трансмісії, забезпечуючи впевненість в оцінці будь-яких змін (модернізація двигуна, зміни кріплення і т.д.) в пропонованій механічній передачі для підвищення надійності і зниження ризику непередбачених проблем.

На головних приводах чотирьох клітей рельсобалкового стану фірми *Nucor-Yamato*. Стіл на верхньому та нижньому шпинделях встановлено вимірювальний пристрій - "електронний перетворювач крутного моменту" (ETC) [11]. Фірмою SMS Demag спеціально для прокатних станів розроблено систему спостереження RoCoCo [12] пізніше вдосконалену в PPMS (Plant & Process Management System).

Система базується на трьох окремих модулях:

- MiDaS (Mill Diagnostic System) – система спостереження за коливаннями у клітях;
- DTECT – система спостереження за підшипниками та діагностики редукторів;
- TAS (Torque Analyzing System) - система спостереження за крутильними моментами.

Система TAS призначена для спостереження за крутильним моментом у головних приводах клітей та моталок. Для цього використовуються тензометричні датчики, що наклеюються на вал. Частота реєстрації моменту до 1000 Гц, що більш ніж досить, враховуючи розрахунковий спектр своїх частот крутильних коливань (10-100 Гц). Програмне забезпечення дозволяє кожному циклу навантажень здійснювати частотний аналіз та запам'ятовувати максимальне і середнє значення. Повідомляється, що окупність капіталовкладень у систему може бути досягнута приблизно за 14 місяців.

Відомі виконані в даний час зарубіжні та раніш в Україні [13] дослідно-промислові розробки систем моніторингу навантажень прокатних станів. Знання крутильного моменту в часі відкриває широкі можливості вдосконалення режимів роботи обладнання та його діагностики:

- оптимізація деформаційно-швидкісного режиму по проходах або по клітях;
- реєстрація та подальший аналіз подій, які є причиною аварій;
- встановлення тенденцій для виявлення прихованих відмов обладнання;
- оцінка залишкового ресурсу деталей лій приводу.

Слід зазначити, що реалізація функції розрахунку залишкового ресурсу обладнання по всій лінії приводу за наявності тільки одного або двох вимірювачів, встановлених, наприклад, шпинделях або моторному валу, вимагає використання багатомасних динамічних моделей. Це пов'язано з тим, що відмінності в динаміці на різних ділянках ліній приводу, особливо редукторних, може становити 100-200 % і вносити неприйнятні для розрахунків циклів навантажень похибки у разі відсутності моделей. Поява нелінійностей при зносі устаткування, як кутових так і радіальних зазорів вимагає у свою чергу адаптації коефіцієнтів жорсткості в моделях, що може бути виконано лише з допомогою діагностики. Таким чином, завдання контролю динамічних навантажень в устаткуванні природно поєднуються із завданнями визначення його зношування на основі динамічних моделей і повинні бути реалізовані в діючих системах моніторингу.

Аналіз первинних перетворювачів та датчиків крутильних моментів, як правило, розробляється дослідницькими інститутами або невеликими фірмами, а великі фірми-

виробники обладнання, такі як SMS-Demag інтегрують їх у свої системи на прокатних станах та інших агрегатах. Відомі на сьогодні вимірювачі крутильних моментів у лініях приводу машин та механізмів та первинні датчики за принципом дії.

Магнітопружні датчики. Принцип дії датчиків заснований на ефекті магнітопружності - фізичному явищі, що проявляється у вигляді зміни магнітної проникності матеріалу в залежності від механічних напружень у ньому.

Магнітопружні датчики використовуються для вимірювання силових параметрів: зусиль; тиску; крутих і згинальних моментів; механічного напруження.

Конструктивно магнітопружні датчики представляють магнітопровід з однією або декількома обмотками [14].

Прикладом використання ефекту магнітопружності є Torductor-S фірми АВВ (Швеція), який широко застосовується при випробуваннях та налагодженні автомобільних трансмісій (рис. 3) та судових приводах з двигунами внутрішнього згорання. Як чутливий елемент використовуються магнітопружні елементи, що наклеюються на вал за аналогією з тензOMETричними вимірюваннями [15].

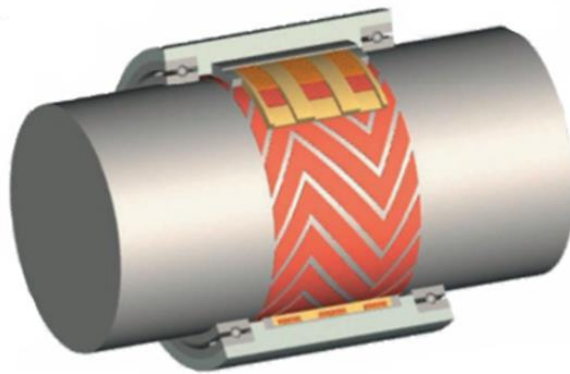


Рис. 3 – Магнітопружний датчик моментів

Досвід випробування магнітопружних датчиків, в тому числі і на прокатних станах, показав, що основним недоліком даного принципу вимірювань є великий рівень низькочастотних електромагнітних перешкод, що викликають амплітудну модуляцію корисного сигналу крутильних моментів в області низьких частот власних коливань ліній приводу (10-3 Гц).

Основні сфери застосування магнітопружних датчиків:

- датчики трансмісії;
- датчики рульового керування;
- аерокосмічні двигуни та управління польотами;
- торсіометри для гребних гвинтів у суднобудуванні;
- привода прокатних станів;
- датчики боксування електропоїздів та електровозів.

Переваги:

- забезпечення безконтактного контролю стану моменту;
- відсутність необхідності кріплення елементів безпосередньо на вал;
- простота конструкції;
- відсутність необхідності калібрування датчика протягом усього терміну експлуатації;
- можливість збільшення повітряного зазору між датчиком і валом, що дозволяє використовувати його в нестабільних системах, де є биття валу або провисання його під навантаженням.

Недоліки:

- при проектуванні необхідно враховувати матеріал валу;
- неможливо розрізнити який тип моменту прикладається до валу.

П'єзоелектричні датчики. Принцип дії п'єзоелектричних перетворювачів заснований на використанні прямого або зворотного п'єзоелектричних ефектів. Прямий п'єзоэффект полягає в здатності деяких матеріалів утворювати електричні заряди на поверхні при прикладанні механічного навантаження, зворотний - у зміні механічного напруження або геометричних розмірів зразка матеріалу під впливом електричного поля [16].

П'єзоелектричні датчики встановлюються всередині трансмісії машин або на торцях валів, що практично не реалізується в лініях приводу прокатних клітей – рис. 4.



Рис. 4 – Конструктивне виконання датчиків моментів

Крутний момент може визначатися також різницею кутових зміщень двох перерізів валу. Розмір моменту розраховується за відомим діаметром валу та його жорсткості. Між двома жорсткими хомутами, що встановлені в різних перерізах валу, монтується попередньо напружена (для вибірки люфтів) пластина з силовимірювальним елементом або індуктивним датчиком мікропереміщень, який реагує на кутові зміщення перерізів валу, що деформується. Використовується база вимірів трохи більше 100-150 мм у довжині валу, так як це впливає на загальну жорсткість конструкції вимірювача. Вали прокатних станів у зв'язку з великими діаметрами (300-900 мм) мають малі кути скручування, пропорційні діючим крутильним моментам, і вимагають збільшення бази вимірювань, а це в свою чергу знижує жорсткість конструкції хомутів і балок з'єднувальних датчика, що позначається при дії ударних навантажень та вібрації.

Простота експлуатації полягає в тому, що датчики майже завжди складаються тільки з одного блоку, їх легко знімати та чистити; мінімальна втрата енергії під час роботи [17].

Переваги: виготовлений з кристалів кераміки; відмінна ефективність при високих і низьких потужностях; простота поводження.

Недоліки:

- короткий термін експлуатації;
- досить дорогий;
- вимагає ретельного догляду і техобслуговування;
- поштовхи, падіння, сильна вібрація можуть пошкодити такий датчик;
- високі коливання температур можуть пошкодити кристали;
- п'єзоелектричний наконечник не можна піддавати впливу ультразвуку, який його зіпсує.

Тензометричні датчики. Тензодатчик, виконаний з дроту або фольги, перетворює механічну величину (силу або пропорційну їй деформацію) в електричний сигнал і широко використовуються в дослідженнях прокатних станів, як на нерухомих деталях, так і на валах, що обертаються [18] з використанням раніше струнних струмознімальних кілець. Основною перевагою тензометричних датчиків є їхнє встановлення на агрегати без зміни конструкції лінії

приводу. Недоліками при використанні тензодатчиків у стаціонарних системах моніторингу є повільний дрейф нуля при старінні клейового складу, який може бути скомпенсований за статичним навантаженням на моторному валу за допомогою сигналу струмового навантаження електроприводу.

Аналіз відомих датчиків вимірювань крутильних моментів та досвід їх використання показав, що найбільш прийнятними як первинні перетворювачі в умовах прокатного виробництва є тензорезистивні датчики.

Для передачі сигналів з валів, що обертаються, використовується кілька типів схем:

- контактні (струнні) струмознімальні кільця;
- рухомий ротор (на валу) та нерухомий статор (антена приймача);
- передача сигналів радіоканалу з використанням частотної (FM) або широтно-імпульсної модуляції схем (PCM);
- ємнісний метод передачі сигналу.

Контактні схеми не розглядаються, як застарілі й мають великі похибки, що дають, за рахунок зміни опору контактів. Серед безконтактних схем для застосування на прокатних станах найприйнятнішим є FM радіоканал. У разі використання індуктивної схеми живлення датчика на валу, як приймальної антени, одночасно використовується контур, що охоплює вал. Тому датчики не завжди можуть бути встановлені на шпинделях із великими ексцентриситетами за рахунок зносу вкладишів та порушеннях налаштування системи врівноважування. Закордонні стаціонарні системи вимірювання крутильних моментів встановлюються як правило, на карданних чи зубчастих шпинделях, які мають менші биття та більший термін служби, ніж на шпинделях з вкладишами ковзання. Максимальна відстань до валу не перевищує 50 мм. На схемі системи моніторингу (рис. 5) видно, що передача даних для реєстрації у віддаленому комп'ютері здійснюється аналоговим сигналом 0...10 В, а передача по радіоканалу відбувається цифровим модульованим сигналом.

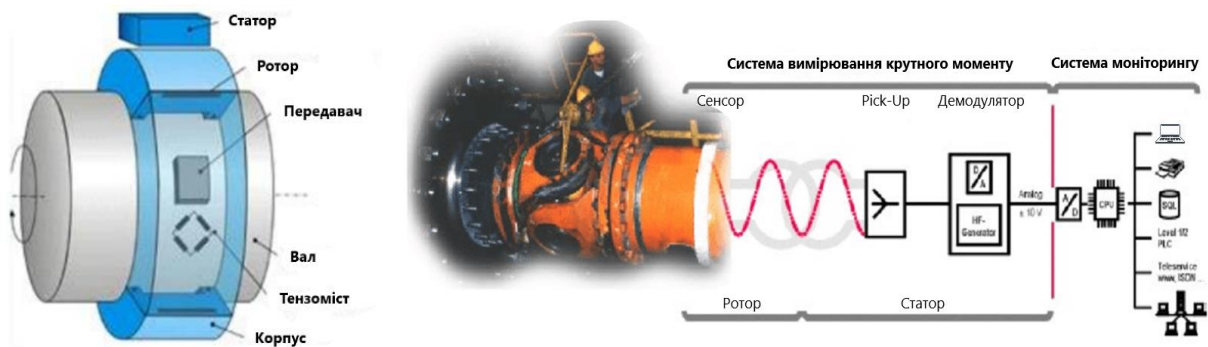


Рис. 5 – Схема системи моніторингу моментів (SMS Demag, Німеччина)

Тензometri з телеметричною (по радіоканалу) передачею даних є найпоширенішими засобами вимірювання деформації валу. Найбільш відомими фірмами-виробниками апаратури, в тому числі для прокатних станів є Binsfeld Engineering, Honeywell Sensotec, Advanced Telemetric International (США), Manner Sensortelemetrie, Kraus Messtechnik & Telemetrie, ACIDA Torqcontrol (Німеччина), Astech Electronics (Великобританія), Tateyama Electronics (Японія).

Безконтактний вимірювач моменту приводу – це датчик призначений для безперервного виміру крутного моменту ротора з механічним приводом. Вимірювання моменту скручування валу приводу здійснюється за допомогою первинного тензометричного перетворювача. Кріплення первинного перетворювача до валу здійснюється за допомогою шпильок, які монтуються на валу зварюванням з використанням спеціального технологічного пристрою. Живлення первинного перетворювача і передача його сигналу здійснюється системою

прийому-передачі сигналу, що складається з двох мікропроцесорних приймачів: одного, змонтованого на валу поблизу первинного перетворювача, і другого, змонтованого на кронштейні поблизу валу. Максимальна відстань живлення та передачі 70 мм, оптимальна 40 мм. Живлення первинного перетворювача та прийом його сигналу здійснюється і при зупинці валу [19].

За допомогою телеметричної системи моніторингу динамічних навантажень на валах можна проаналізувати фактори, що впливають на якість та кількість переходів при розробці схеми профілювання, відзначено неоднозначністю, наприклад, **фактору товщини металу**. Ці чинники поділені на підгрупи: геометрія, матеріал, інші операції у лінії, характеристики стану [20].

Серед інших розробок, раніше виконаних в Україні, відомий також радіотелеметричний пристрій [21] з тензометричними датчиками, що використовувався при дослідженнях прокатних станів, який також має низку експлуатаційних недоліків.

Також використовується телеметричний вимірювач аналогового типу [22], який застосовувався під час досліджень на багатьох прокатних станах України. Відсутність можливості відтворення вимірювача, виконаного на застарілих компонентах, та дрейф нуля у зв'язку з великим терміном служби елементів схеми не дозволяє використовувати його у стаціонарних системах вимірювання крутильних коливань.

Схемні вирішення вимірювача, що розробляється, передбачають усі технічні та експлуатаційні вимоги, обумовлені його застосуванням в умовах прокатного виробництва, а саме:

- висока завадостійкість по радіоканалу;
- температурна стабільність;
- мале енергоспоживання передавача на валу;
- захист від механічних пошкоджень, мастила, *мастильно-охолоджувальної* рідини, окалини;
- досить широкий діапазон частот вхідного сигналу.

Встановлення зв'язку між обертовим датчиком використовується FM-передавачем (рис. 6). Ці передавачі використовуються для віддаленого підключення будь-якого датчика, будь то сила або крутний момент, до його системи віддаленого збору даних шляхом перетворення сигналу датчика в цифрову форму і передачі його на FM-приймач, де він перетворюється назад в аналогову напругу.



Рис. 6 – Взаємодія датчиків і FM зв'язку

Для визначення крутного моменту вони зазвичай використовуються для спеціальних, унікальних в своєму роді датчиків, наприклад, коли тензодатчики прикладаються безпосередньо до компоненту в приводній лінії. Це може бути, наприклад, приводний вал або піввісь від транспортного засобу. Переваги датчика полягають у простоті монтажу на досліджувану конструкцію, оскільки він, як правило, просто кріпиться до вимірювального валу і його можна повторно використовувати для кількох користувачьких датчиків. Він має недолік необхідності джерела живлення на обертовому датчику, як правило, акумулятор 9 В, що робить його непрактичним для довгострокового тестування [23].

Правильне розуміння суті крутного моменту, що вимірюється, а також того, які фактори можуть впливати на цей момент при його вимірюванні, матиме значний вплив на вірність зібраних даних у додатках, які вимагають вимірювання динамічного крутного моменту і особливу увагу слід приділяти вимірюванню крутного моменту в належному місці, а також тому, щоб не впливати на крутний момент, демпфіруючи його за допомогою вимірювальної системи.

Струмознімальні кільця є економічним рішенням, але мають свої обмеження. Більш технічно просунуті рішення доступні для більш вимогливих випадків, але, як правило, будуть дорогими. Продумавши вимоги і умови конкретного застосування, можна з першого разу вибрати відповідну систему вимірювання крутного моменту.

Цифрова модель D^x телеметрія від CAEMAX DataSystems робить цю технологію доступною для вимірювання крутного моменту на приводних валах та інших обертових компонентах – рис. 7.



Рис. 7 – Використання тензометричних датчиків в автомобілебудуванні

Програма D^x телеметрична система широко використовується для вимірювання крутного моменту приводного вала в випробуваннях. Для цього застосовуються корпуси з половиною оболонки для швидкого та легкого монтажу. Корпус не тільки захищає застосування тензодатчика, але додатково містить електроніку телеметрії, а також вторинну котушку для індуктивного живлення.

Надзвичайно малий розмір встановленого міні-телеметричного блоку забезпечує практично необмежену роботу в обмеженому просторі (44 x 22 мм).

Тільки один модуль ротора телеметрії необхідний для передачі до чотирьох дискретних сигналів – двох Strain-bridge, однієї напруги і однієї температури. Крім того, в якості довідки також направляється температура навколишнього середовища в точці вимірювання. Частота дискретизації на канал - до 5 кГц. Напруга збудження індуктивно пов'язана з обертовим валом, що дозволяє довгостроково працювати без акумулятора і для короткострокового тестування (10 годин) може використовуватися потужність акумулятора.

D^x-приймальна станція може синхронізувати кілька незалежних передавачів, що працюють паралельно. Всі сигнали приймаються за допомогою телеметрії одночасно і буферизуються для подальшої передачі [24].

Висновки.

Визначення крутних моментів на валах, що обертаються є важливим науково-технічним завданням.

Крутний момент на валу прокатного стану є найважливішим енергосиловим технологічним параметром, який характеризує процес прокатки, визначає його енергетику і завантаження обладнання. За допомогою вимірювання моменту на валах клітей і механізмів прокатного стану забезпечується технологічний контроль роботи стану і створюється можливість його автоматизації.

На основі виконаного аналізу існуючих безконтактних засобів і методів вимірювань крутних моментів на валах, що обертаються, встановлено наступне - для умов прокатного виробництва найбільш прийнятною є тензометрична схема з передачею цифрових даних радіоканалу. Також розглянуто цифровий телеметричний вимірювач на основі тензодатчиків із безконтактним живленням, який може застосовуватися на прокатних станах у складі стаціонарних систем моніторингу навантажень. Для розрахунку залишкового ресурсу вузлів та деталей за даними вимірювання крутильних коливань в окремих точках лінії приводу необхідно використання в стаціонарних системах моніторингу багатомасних динамічних моделей, особливо в лініях редукторів приводу прокатних клітей та трансмісійної системи.

Список літератури

1. Maláková S., Puškár M., Frankovský P., Sivák S., Harachová D. Influence of the Shape of Gear Wheel Bodies in Marine Engines on the Gearing Deformation and Meshing Stiffness. *Marine Science and Engineering*, 2021, pp. 1-22.
2. Dong J., Pei W., Long H., Chu J., Ji H. Solution of Spur Gear Meshing Stiffness and Analysis of Degradation Characteristics. *Solution of Spur Gear Meshing Stiffness and Analysis of Degradation Characteristics*. ISSN 1392–1207. *Mechanika*. 2020 Volume 26(2): 153–160.
3. Maláková S., Puškár M., Frankovský P., Sivák S., Palko M., Palko M. Meshing Stiffness—A Parameter Affecting the Emission of Gearboxes. *Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice. Applied science*, 2020.
4. Jakubovicová, L.; Ftorek B.; Baniari, V.; Sapietová, A.; Potocek, T.; Vaško, M. Engineering Design of a Test Device. *Procedia Eng.* 2017, 177, 520–525.
5. Gkimitis, L.; Vasileiou, G.; Sakaridis, E.; Spitas, C.; Spitas, V. A fast, non-implicit SDOF model for spur gear dynamics. *Mech. Mach. Theory* 2021, 160, 104279.
6. Xiong Y., Huang K., Xu F., Yi Y., Sang M., Zhai H. Research on the Influence of Backlash on MeshStiffness and the Nonlinear Dynamics of Spur Gears. *Applied science*, 2019.
7. Vanyeyev S. M., Miroshnichenko D. V., Rodymchenko T. S., Protsenko M., Smolenko D. V. Data Measuring System for Torque Measurement on Running Shafts Based on a Non-Contact Torsional Dynamometer. *Journal of Engineering Sciences*, Volume 6, Issue 2 (2019), pp. 17–23.
8. Крот П.В. Проблемы динамики и диагностики редукторных линий привода прокатных станов. Сб. тр. международной н-т конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем и элементов их конструкций», 2-5 сентября 2008, Севастополь, СевНТУ. С. 310-318.
9. Григоров О., Губський С., Турчин О., Вишневецький Г. Теоретичне та експериментальне дослідження процесу пересування мостового крана з перекосом. *Збірник наукових праць. Машинобудування* 19, С. 7-17, Харків (2017).
10. RegalRexnord. Preventive and predictive methods for torsional vibration URL: <https://www.regalrexnord.com/brands/perceptiv/solutions/preventive-and-predictive-methods-for-torsional-vibration> (дата звернення 16.01.2023).
11. Хон В., Зеелер А., Тимтнер К. Контроль работы главных приводов клетей на современных рельсобалочных станах. // *Черные металлы*. Апрель 1996. – С.40-45.

12. Аренс М. RoCoCo-модульная система наблюдений за работой прокатных установок // Черные металлы. Март, 1999. - С.18-23.
13. Автоматизированная система контроля силовых параметров прокатки. / Гребенник В.М., Гордиенко А.В. и др. // Изв. ВУЗов черная металлургия. – 1984. - № 8. – С. 161-164.
14. Craig A. G., Somnath C. R., Sanju R., Qingyun C. Theory, Instrumentation and Applications of Magnetoelastic Resonance Sensors: A Review. Published online 2011 Mar 2. doi: <https://doi.org/10.3390/s110302809>.
15. ABB. ManualABB Torductor-S URL: <https://www.iea.lth.se/mek/mekatronikkursen%202006/Energy%20Flow%2006/Torductor.pdf> (дата звернення 16.01.2023).
16. Lebed A., Necib B., Sahli M. Analytical Modeling of a Piezoelectric Bimorph Beam. American Journal of Mechanical Engineering, 2016; 4(1): 7-10.
17. Young-Gyun Kim, Ji-Hyeon Song, Seongheon Hong, Sung-Hoon Ahn. Piezoelectric strain sensor with high sensitivity and high stretchability based on kirigami design cutting. Npj Flexible Electronics volume 6, Article number: 52 (2022).
18. Structural health monitoring in wireless sensornetworks by the embedded Goertzel algorithm / M. Bocca, J. Toivola, L. M. Eriksson, J. Hollmén, and H. Koivo // in Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs '11), pp. 206–214, IEEE, Chicago, Ill, USA, April 2011.
19. Крот П.В. Телеметрические системы мониторинга динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов // «Вибрация машин: измерение, снижение, защита». Научно-технический и производственный сборник статей. Вып. 1. – Донецк.: ДонНТУ, 2008. - С. 46-53.
20. Чухліб В.Л., Губський С.О., Окунь А.О. Формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при виробництві гнутих профілів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. № 2. 2020. С. 169-173.
21. Дудко В.Ф. Измеритель крутящих моментов, передаваемых вращающимся валом. Сб. тр. ИНФОРМТЯЖМАШ, Металлургическое оборудование, №3, 1971.
22. Подковырин Е.Я. Бесконтактный измеритель крутящего момента // Труды ИЧМ, 1969, №31, С. 159-161.
23. Winczner K. The Basics of Torque Measurement. Sensor Developments Inc. March 2006.
24. IndustrySearch. Hylec Controls - Telemetry system - CAEMAX DataSystems' Dx URL: <https://www.industrysearch.com.au/hylec-controls-telemetry-system-caemax-datasystems-dx/p/108365> (дата звернення 16.01.2023).

References (transliterated):

1. Maláková S., Puškár M., Frankovský P., Sivák S., Harachová D. Influence of the Shape of Gear Wheel Bodies in Marine Engines on the Gearing Deformation and Meshing Stiffness. Marine Science and Engineering, 2021, pp. 1-22.
2. Dong J., Pei W., Long H., Chu J., Ji H. Solution of Spur Gear Meshing Stiffness and Analysis of Degradation Characteristics. Solution of Spur Gear Meshing Stiffness and Analysis of Degradation Characteristics. ISSN 1392–1207. Mechanika. 2020 Volume 26(2): 153–160.
3. Maláková S., Puškár M., Frankovský P., Sivák S., Palko M., Palko M. Meshing Stiffness—A Parameter Affecting the Emission of Gearboxes. Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice. Applied science, 2020.
4. Jakubovicová, L.; Ftorek B.; Baniari, V.; Sapietová, A.; Potocek, T.; Vaško, M. Engineering Design of a Test Device. Procedia Eng. 2017, 177, 520–525.
5. Gkimisis, L.; Vasileiou, G.; Sakaridis, E.; Spitas, C.; Spitas, V. A fast, non-implicit SDOF model for spur gear dynamics. Mech. Mach. Theory 2021, 160, 104279.
6. Xiong Y., Huang K., Xu F., Yi Y., Sang M., Zhai H. Research on the Influence of Backlash on MeshStiffness and the Nonlinear Dynamics of Spur Gears. Applied science, 2019.
7. Vanyeyev S. M., Miroshnichenko D. V., Rodymchenko T. S., Protsenko M., Smolenko D. V. Data Measuring System for Torque Measurement on Running Shafts Based on a Non-Contact Torsional Dynamometer. Journal of Engineering Sciences, Volume 6, Issue 2 (2019), pp. 17–23.
8. Krot P.V. Problemi dinamiki i diagnostiki reduktornikh liniy privoda prokatnikh stanov. Sb. tr. mezhdunarodnoi n–t konferentsii «Dinamika, nadezhnost i dolgovechnost mekhanicheskikh i biomekhanicheskikh sistem i elementov ikh konstruksii», 2-5 sentyabrya 2008, Sevastopol, SevNTU. S. 310-318.
9. Hryhorov O., Hubsnyi S., Turchyn O., Vyshnevetskyi H. Teoretychne ta eksperymentalne doslidzhennia protsesu peresuvannia mostovoho krana z perekosom. Zbirnyk naukovykh prats. Mashynobuduvannia 19, S. 7-17, Kharkiv (2017).

10. RegalRexnord. Preventive and predictive methods for torsional vibration URL: <https://www.regalrexnord.com/brands/perceptiv/solutions/preventive-and-predictive-methods-for-torsional-vibration> (date of application 16.01.2023).
11. Khon V., Zeeler A., Timtner K. Kontrol raboti glavnikh privodov kletei na sovremennikh relsobalochnikh stanakh. // Chernie metalli. April 1996. – S.40-45.
12. Arens M. RoCoCo-modulnaya sistema nablyudenii za rabotoi prokatnikh ustanovok // Chernie metalli. Mart, 1999. - S.18-23.
13. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya silovikh parametrov prokatki. / Grebennik V.M., Gordienko A.V. i dr. // Izv. VUZov chernaya metallurgiya. – 1984. - № 8. – S. 161-164.
14. Craig A. G., Somnath C. R., Sanju R., Qingyun C. Theory, Instrumentation and Applications of Magnetoelastic Resonance Sensors: A Review. Published online 2011 Mar 2. doi: <https://doi.org/10.3390/s110302809>.
15. ABB. ManualABB Torductor-S URL: <https://www.iea.lth.se/mek/mekatronikkursen%202006/Energy%20Flow%2006/Torductor.pdf> (date of application 16.01.2023).
16. Lebid A., Necib B., Sahli M. Analytical Modeling of a Piezoelectric Bimorph Beam. American Journal of Mechanical Engineering. 2016; 4(1):7-10.
17. Young-Gyun Kim, Ji-Hyeon Song, Seongheon Hong, Sung-Hoon Ahn. Piezoelectric strain sensor with high sensitivity and high stretchability based on kirigami design cutting. Npj Flexible Electronics volume 6, Article number: 52 (2022).
18. Structural health monitoring in wireless sensor networks by the embedded Goertzel algorithm / M. Bocca, J. Toivola, L. M. Eriksson, J. Hollmén, and H. Koivo // in Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS '11), pp. 206–214, IEEE, Chicago, Ill, USA, April 2011.
19. Krot P.V. Telemetrycheskiye systemy monitorynha dynamycheskykh nahruzok v lynyakh pryvoda prokatnykh stanov // «Vybratsyia mashyn: yzmerenye, snyzhenye, zashchyta». Nauchno-tekhnycheskyi y proyzvodstvennyi sbornyk statei. Выр. 1. – Donetsk.: DonNTU, 2008. - S. 46-53.
20. Chukhlib V.L., Hubskiy S.O., Okun A.O. Formalizovani pidkhody do vyznachennia chysla tekhnolohichnykh perekhodiv pry vyrobnytstvi hnutykh profiliv. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR. № 2. 2020. С. 169-173.
21. Dudko V.F. Izmeritel krutyashchikh momentov,peredavaemikh vrashchayushchimsya valam. Sb. tr. INFORMTYAZHMASH, Metallurgicheskoe oborudovanie, №3, 1971.
22. Podkovirin Ye.Ya. Beskontaktnii izmeritel krutyashchego momenta // Trudi IChM, 1969, №31, S. 159-161.
23. Winczner K. The Basics of Torque Measurement. Sensor Developments Inc. March 2006.
24. IndustrySearch. Hylec Controls - Telemetry system - CAEMAX DataSystems' Dx URL: <https://www.industrysearch.com.au/hylec-controls-telemetry-system-caemax-datasystems-dx/p/108365> (date of application 16.01.2023).

Надійшла (received) 20.12.2022 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Черкашин Дмитро Володимирович (Cherkashyn Dmytro) – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; e-mail: sneyk74@gmail.com.

Губський Сергій Олександрович (Hubskiy Sergii) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

Чухліб Віталій Леонідович (Chukhlib Vitalij) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; e-mail: profndepro@gmail.com.