



*Юбилейна научна конференция
„40 ГОДИНИ КАТЕДРА АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ПРОИЗВОДСТВОТО”, 18 март 2011*

Anniversary Scientific Conference with International Participation

40 Years Department of Industrial Automation

PROCEEDINGS

BULGARIA, SOFIA
18.03.2011



INTERNATIONAL PROGRAM COMMITTEE (IPC)

Chairmen: M. Hadjiski

Vice Chairmen: K. Boshnakov

Members:

| | |
|----------------|--------------|
| Batchkova I. | Mladenov M. |
| Bratengeyer E. | Nenov T. |
| Velev K. | Nikolov E. |
| Voutchkov I. | Petkov P. |
| Vachkov, G. | Petkov M. |
| Garipov E. | Popchev I. |
| Damyantov Ch. | Richalet, J. |
| Djambov P. | Sgurev V. |
| Elenkov G. | Stoilov T. |
| Iliev Z. | Stoyanov S. |
| Yonchev, H. | Uyar E. |
| King, R. | Frey G. |
| Kocijan, J. | Fahri O. |
| Madjarov N. | Tzotchev V. |

NATIONAL ORGANIZING COMMITTEE (NOC)

Chairmen: V. Tzotchev

Vice Chairmen: I. Batchkova

Secretary: I. Antonova

Members:

Elenkov G.
Christova N.
Gocheva D.



ДИАГНОСТИКА НА ЛАГЕРИ

BEARING FAULT DIAGNOSIS

Н. Христова¹, В. Пожидаева²

¹Химикотехнологичен и металургичен университет-София, Бул. Св.Климент Охридски 8,
1756 София, E-mail: nikolinka@gmail.com

²Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”, 1700 София, E-mail: vpojidaeva@abv.bg

Abstract: Machinery malfunction problems are often sources of increased maintenance costs and disturbances in production activity across industry. Reliable diagnostic methodologies are needed to enable cost effective condition based maintenance. This paper presents the implementation of different techniques for bearing fault diagnosis, based on vibration data. Among the methods that can be employed for fault diagnosis, artificial intelligence approaches offer an appealing problem solving framework.

Key words: Bearing Fault Diagnosis, Vibration Analysis, Fuzzy Logic, Neural Networks, Hybrid AI Techniques.

ВЪВЕДЕНИЕ

Осигуряването на безавариен и непрекъсваем работен процес на минната механизация е основната дейност на механиците по техническо обслужване. Все по-голямо внимание се отделя на процесите на диагностика и контрол на състоянието в реално време за сметка на провеждането на скъпоструващи и ресурсо- и време-поглъщащи аварийни ремонти [1, 2].

Организацията на ремонта и техническото обслужване на машините определят като най-предпочитани в практиката системите за мониторинг на състоянието. Освен това трябва да се има предвид обвързаността на отделните машини в общ технологичен цикъл и негативните последици при евентуално спиране на отделно взета машина.

В последно време все по-често намират приложение мониторинговите системи, базирани на контрол и анализ на вибрациите. Характерно за вибрационния спектър на една машина е симптоматиката на отделните дефекти, изразена чрез промяна на амплитудата на определена честота [3, 4].

Интерпретацията на класическия вибрационен анализ чрез съвременните подходи за диагностика, базирани на средствата на изкуствения интелект (като размита логика, невронни мрежи и др.) [5, 6], повишават ефективността на диагностичния процес. В настоящата разработка са представени съвременни подходи за диагностика на лагери, базирани на приложението на интелигентни техники.

ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Различните типове системи за мониторинг на състоянието на машинното оборудване, с помощта на измервателните си модули и програмно осигуряване предоставят възможности за контрол в няколко аспекта:

- спектрален анализ на вибрациите;
- измерване интензивността на вибрациите (виброскорост или виброускорение) и сравняването им със стандартните стойности по ISO;

- обработка на вибрационен сигнал за контрол на специфичен диагностичен параметър.

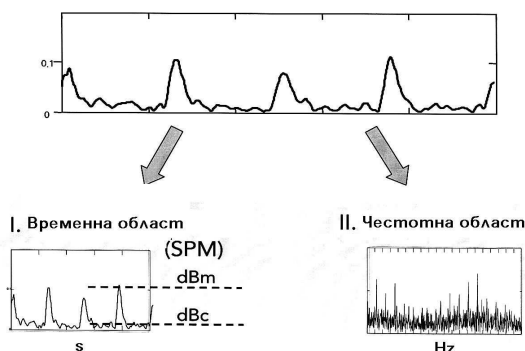
Обработка на вибрационния сигнал в реално време, се осъществява на базата на FFT-анализ чрез представяне на спектър във временната и в честотната област. Спектралният анализ осигурява възможност за установяване на вида и мястото на повредата. На базата на измерените сумарни стойности на виброскоростта или на виброускорението могат да се изчислят различни фактори, показателни за наличие на неизправности в конкретни елементи. Интерес представляват вибрациите, възбудени от ротационни сили и ударни взаимодействия. Контролът на тези вибрации може да бъде показателен за състоянието на търкалящи лагери, които притежават роторна честоти или честоти на зацепване над 10 Hz. Въпреки че преобразователите и апаратурата осигуряват възможност за регистриране и обработка на сигнали и с по-ниски честоти, многобройните експерименти с нискочестотните елементи от минната механизация показват недостатъчно стабилни резултати от измерванията, необходими за коректна диагностика. Обработката на вибрационния сигнал за контрол на търкалящи лагери обикновено се реализира в областта на резонансните честоти.

Така например патент на фирма SKF е методът SEE предназначен за контрол на вибрации в областта на ултразвуковата акустична емисия. На същия принцип, но в значително по-ниско честотен диапазон се получава обвиващата на вибрационния сигнал в апаратурата на Bvel and Kjaer. Измерването на обвиващата на честотния сигнал в областта на ниските честоти, предвижда филтрация на първичния сигнал породен от дефекти в контактните повърхности. При това отначало се филтрират нискочестотните хармоници, които съдържат голяма част от “шумовете” обусловени от вибрациите на машините. Енергията на импулсите, генерирани от дефекта, се намалява, но те се появяват в спектъра с определена периодичност, независимо от филтрацията на сигнала. Този метод е приложен за елементи с работна честота над 2 Hz [1, 3], като стабилни резултати се получават при работни честоти около и над 5 Hz.



Друг метод за диагностика на търкалящи лагери е *SPM* методът на фирма SPM-Instrument [1]. При него се изхожда от факта, че в допирните зони между металните лагерни елементи импулсните взаимодействия стимулират собствените колебания на контактните елементи. Именно тези резонанси, се контролират със специален датчик за ударни импулси с резонансна честота 32 kHz. На практика *SPM*-методът представлява спектър на обвиващата крива, представен във временната област (Фиг. 1). Ударно-импулсният метод ни предоставя две стойности за величината ударен импулс, взети от спектъра във временната област. Тези величини нямат аналог в честотния спектър и не са обвързани с типичните лагерни честоти.

През последните години фирмата разработи диагностичен подход *SPM*-Спектър, базиращ се на спектрален анализ на ударните импулси, приложим както при търкалящи лагери така също и при диагностиката на зъбни предавки. Получените честоти на повторение на ударните импулси се съпоставят с предварително пресметнати типични честоти на ударно взаимодействие на диагностираните елементи. Методът диагностира също наличие на дебаланс, несъсност и външни вибрации.



Фиг.1. *SPM*-версия на сигнал на обвиващата крива

Аналогичен на *SPM*-метода и *SPM*-Спектърът е Spike Energy на фирмата IRD Mechanical Analysis (Entek IRD, по настоящем RA Entek), който се реализира със специален преобразувател с резонансна честота 27 kHz.

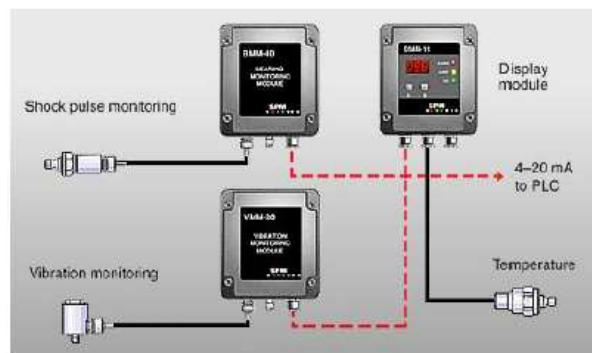
Специално за търкалящи лагери фирма SCHENCK е разработила метод *BCU* – Bearing Condition Units, за контрол чрез измерване на резонансна честота. Диапазонът, в който се контролират лагерите, е от 2 kHz до 10 kHz.

МЕТОДИЧЕН ПОДХОД ЗА СТРУКТУРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ВИБРОКОНТРОЛ

Дългогодишната практика от приложението на различни видове апаратура и методи за вибрационен контрол на минната механизация и по-специално на вградените търкалящи лагери, недвусмислено е доказала преимуществото на *SPM* (Shock Pulses Method) метода. Съществуват два варианта на *SPM* метода (Метод *dBm/dBc* и Метод *LR/HR*), които използват еднакви *SPM* преобразуватели, но се различават по оценката и анализа на ударните импулси. На тази база са изградени и различни модулни системи за непрекъснат контрол на търкалящи лагери.

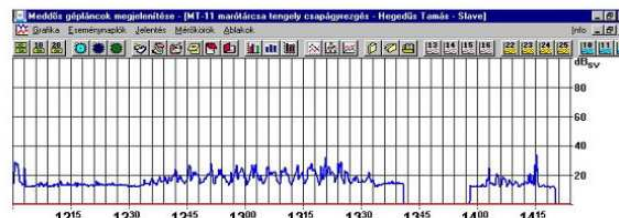
Метод *dBm/dBc*: *dBm* е максимално ниво за малко на брой ударни импулси, които са с висока амплитуда. То е индикатор за повреда в лагера. *dBc* е долно ниво за много на брой, но по-слаби ударни импулси (около 200 импулса/секунда). То е индикатор за състоянието на мазане. Двете стойности се измерват по нормализирана децибелна скала, което означава, че скалата се настройва индивидуално за всеки лагер, чрез определяне на начално ниво *dB_i*, след въвеждане на данни за лагера, а именно диаметър на вала (*d*) и честота на въртене (*rpm*). По този начин след измерване, стойностите на *dBm* и *dBc* са вече оценени и показват действителното състояние на конкретния лагер. Методът *dBm/dBc* се използва за оценка състоянието на търкалящи лагери в модулната система *CMM* (Фиг. 2), която се състои от едноканални и двуканални модули, които конвертират сигналите от преобразувателите на ударни импулси (*SPM*) и вибрационните преобразуватели в универсален токов сигнал 4-20 mA. Предназначен е за:

- Непрекъснато следене състоянието на търкалящи лагери по *SPM* метода *dBm/dBc*;
- Измерване нивото на вибрациите, съгласно ISO 10816;
- Измерване на температура и аналогови сигнали.



Фиг. 2. Система *CMM*

При *CMM* системата като информация за състоянието на всеки лагер, се получава единствено графиката на нивото *dBm* (Фиг. 3). По тренда на максималното ниво на ударните импулси се съди за развиваща се повреда в лагера. Недостатък на този вариант е липсата на информация за мазането на лагера.



Фиг. 3. Ниво *dBm*

По-прецизен анализ на състоянието на търкалящи лагери предоставят възможностите на другия вариант на *SPM* метода – **Метод *LR/HR***. Този метод ползва системата *CMS*. Нивото *LR* (low rate of occurrence) е средно ниво на силните, но по-рядко регистрирани импулси, докато *HR* (high rate of occurrence) е средно ниво на по-слабите, но по-често появяващи се импулси (около 1000 импулса/сек). Този метод също използва "нормализирани" измервания и изисква повече данни за лагера – номер по ISO или делителен диаметър, честота на въртене и тип на лагера



по *SPM*. След измерването се получава и по-подробна информация за състоянието на лагера, а именно:

1. CODE A, B, C, D – обобщена информация за лагера, илюстрираща състоянието на мазане и на работните повърхнини.

2. LUB номер – предоставя информация за дебелината на масления филм, независимо какво е мазилното вещество (смазка или масло).

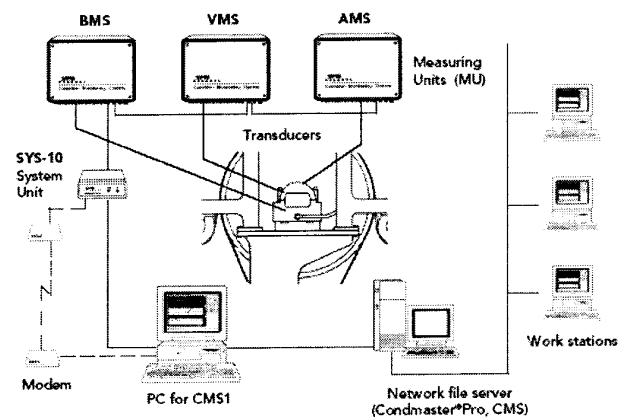
3. COND номер – дава информация за степента на механична повреда в лагера.

Системата отчита всички описани по-горе параметри (*LR/HR*, *LUB*, *COND* и *CODE*) с които се анализира състоянието на лагера. В системата са заложили следните измервателни методи:

- **Измерване на ударни импулси по метода LR/HR (SPM)** – за оценка състоянието на търкалящи лагери чрез прецизна информация за общо-техническото състояние на лагера и мазането през целия експлоатационен живот.
- **Измерване силата на вибрациите (VIB)** – най-широко използвания, препоръчан от ISO стандартите, метод за оценка на общо-техническото състояние на машините.
- **Измерване на аналогови сигнали** – за следене на различни процеси и параметри (температура, налягане, ел. товар и др.).
- **Спектрален анализ на вибрациите (Метод EVAM®) и ударните импулси от търкалящите лагери (Метод SPM Spectrum®).**

Системата *CMS* е изградена от следните основни компоненти (Фиг. 4):

- **Преобразуватели на сигнали** - 4 вида :
 - Преобразувател на ударни импулси (SPM) - SPM 40000/42000;
 - Вибрационен преобразувател (VIB) - TRV10;
 - RPM преобразувател - за измерване честота на въртене;
 - Преобразуватели с аналогов изход - за измерване на процесни параметри;
- **Измервателни модули** - многоканални измервателни устройства с памет за измерване и съхраняване на измерваните резултати. Системата разполага с четири типа измервателни модули:
 - BMS - 16 канала за измерване състоянието на търкалящи лагери;
 - VMS - 8 канала за измерване нивото на вибрациите;
 - RPM платка - 4 канала за измерване честотата на въртене;
 - AMS платка - 16 канала за измерване на аналогови сигнали;
 - VCM20 - до 168 канала за прецизен спектрален анализ на вибрации.



Фиг. 4. Система *CMS*

- **Системна единица SYS-10** - предназначена е за връзка между измервателните модули и анализиращия софтуер Condmaster Pro. *SYS10* се свързва директно с кабел към комуникационния порт на компютъра, а като алтернатива може да използва и модемна връзка (радио, GSM).

ПОДХОДИ, БАЗИРАНИ НА ТЕХНИКИ НА ИЗКУСТВЕНИЯ ИНТЕЛЕКТ

Диагностичните методи, базирани на размита логика, притежават предимството на вграденото лингвистично знание и способността за логически извод при вземането на решение. Размитата логика, предложена от Л. Заде [5], ефективно се прилага при качествено описание на знанието. Създаването обаче на такава система, силно зависи от експертния опит на разработчиците и способността им да дефинират оптимални функции на принадлежност и база размити правила за различни технологични режими на работа на машините. Освен това, системите с размита логика не притежават способност за самообучение, което се изисква за системите за диагностика в реално време. В [7] е представен размит модел за състоянието на търкалящ лагер. Би трябвало да се отбележи, че функциите на принадлежност на лингвистичните променливи са дефинирани евристично на базата на експертни знания. Използването на интелигентни средства за оптимизация като невронни мрежи или генетични алгоритми при дефинирането на функциите на принадлежност ще подобри точността на предлаганите от модела решения. В [7] е представен и подход за диагностика на състоянието на лагери с ефективното използване на изкуствени невронни мрежи (ANN) като диагностичен модел.

Невро-размитата адаптивна система ANFIS (Adaptive Network based Fuzzy Inference System) [5] е мощна хибридна система между ANN и размита система, обединяваща предимствата на двете технологии. Тя вгражда размити правила в невронната мрежа и използва подобен на алгоритъма на обратно разпространение на грешката за фина настройка на параметрите на TS-тип размит модел с един изход.

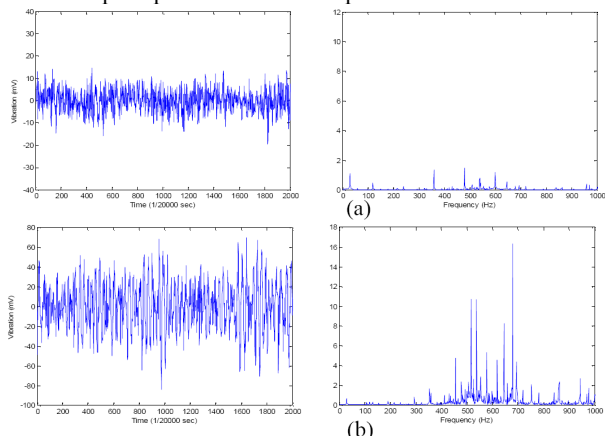
Представен е невро-размит модел за диагностика на състоянието на лагера, основащ се на вибрационен анализ. Използваните за обучението данни са вибрационния сигнал във времевата и в честотната област. Входните данни за невро-размития модел са максималната амплитуда на вибрационния сигнал във времевата област и сумата от амплитудите на честотите на



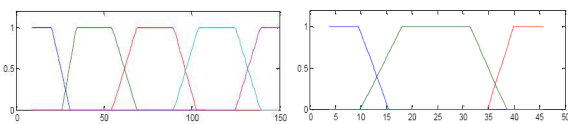
лагера. Изходът е само един и описва двете състояния на лагера – без и с наличие на дефект, съответстващи на бинарните стойност 0 и 1. Вибрационните сигнали във времевата и в честотната област за двете изследвани състояния на лагера (изправен и дефектирал) са представени на Фиг. 5 а) и б). Изследвани са структури на невро-размития модел с различен брой и форма на функциите на принадлежност на лингвистичните променливи за входовете, както и различна степен на полинома за изхода.

Най-добри резултати са получени при 5 трапецовидни функции на принадлежност за първия вход и 3 трапецовидни функции на принадлежност за втория вход (Фиг. 6) и константа за изхода.

Параметрите, дефиниращи формата и параметрите на функциите на принадлежност се определят чрез ANN алгоритъм, докато параметрите на модела като типове, брой и параметри на функциите на принадлежност се оптимизират чрез генетичен алгоритъм.



Фиг. 5. Вибрационни сигнали



Фиг. 6. Функции на принадлежност

Този метод комбинира предимствата на размитите и ANN техниките и допуска лингвистични променливи като входни за системата, като по този начин се осъществява подходяща обработка на наличните данни.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА РЕАЛИЗАЦИЯ

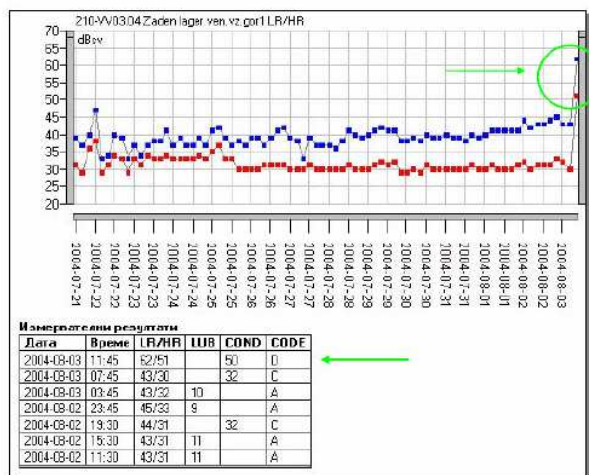
Следящи системи от двата типа *SMM* и *CMS* за следене на тежко натоварените лагери, бяха инсталирани на задвижни станции на лентов транспортър в рудник Трояново-3 на “Мини Марица-изток” ЕАД. Системата *SMM* беше изградена до ниво дисплейни модули DMM10, с алармена сигнализация при повреда и възможност за връзка към PLC система. Така структурирана системата *SMM*, работи съвместно с програма Condmaster®Pro 46, Версия 1.11. Като информация за състоянието на всеки лагер, на екрана на дисплейните модули се получават в цифров вид контролираните нива *dBm/dBc*. По тренда на максималното ниво на ударните импулси се съди за развиваща се повреда в лагера. Недостатък на този вариант е липсата на информация за мазането на лагера,

което не позволява да бъде реализирана изпреварваща диагностика със съответна ремонтна намеса за удължаване на лагерния живот.

Системата *CMS* беше експериментирана чрез измервателни модули VMC и комуникация с Condmaster®Pro, чрез системната единица SYS 10. Графиката на Фиг. 7 показва повреда на търкалящ лагер, регистрирана от *CMS* системата. В случая, ясно се вижда краткото време на предизвестие за настъпваща повреда, което обуславя необходимостта от непрекъснат контрол. Освен това, проследяването на тренда и на двете стойности *LR* и *HR*, осигурява категоричност на диагнозата и дава възможност на механика за своевременна ремонтна намеса .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акцентът на тази разработка е диагностика, базирана на размити технологии, невронни мрежи и хибридна система, комбинираща невронна мрежа и размита логика. Този подход позволява да се идентифицира лагерът поелементно за настъпили повреди. Прилагайки невро-размитата диагностична система, е възможно да се сведе неособено информативната детайлна диагностика до комплексна диференциална оценка на състоянието на обекта, на базата на която да се разработват нормирани системи за прогнозиране на остатъчния ресурс при голям процент достоверност . Диагностичната система ANFIS може да дублира, да допълва или изцяло да замени предложената система за непрекъснато следене на техническото състояние с автоматична оценка на измервателните резултати от типа CMS.



Фиг. 7. Дисплей на *CMS* системата

Съвременните подходи за създаване на системи за мониторинг и диагностика интегрират техники за мониторинг с интелигентни методи за диагностика, което допринася за редуциране на броя на внезапните и много често скъпо струващи аварии на производственото оборудване.

БЛАГОДАРНОСТ



Изследванията са финансирани по проект № ТК-01-485/08 „Интелигентни системи за диагностика и вземане на решения в технологични процеси”, Фонд “НИ”, МОМН.

ЛИТЕРАТУРА

1. A Method for Industrial Machine Condition Monitoring, SPM-Instrument AB, 71536.B, Sweden, 1997.
2. Frank Gagnon, Spike Energy Diagnostics (and Similar Techniques) History, Usefulness & Future Outlook, *Canadian Machinery Vibration Association, Vibra K Consultants Ltd.*, October, 2006.
3. *Nondestructive Testing and Diagnostics*, Handbook Edited by V. Klyuev and G. Zusman, Russian Society for Nondestructive Testing and Technical Diagnostics, Moscow, Russia, Metrix Instrument Co., Houston, USA 2004.
4. Rao, J. S., *Vibratory Condition Monitoring of Machines*, Alpha Science International Ltd., 2000.
5. Jyh-Shing, R. J., ANFIS: Adaptive- Network-Based Fuzzy Inference System, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No.3, 1993.
6. Changzheng Ch., M. Changtao, A method for intelligent fault diagnosis of rotating machinery, *Digital Signal Processing*, vol.14, pp. 203- 217, 2004.
7. Христова, Н., Интелигентни методи за вибродиагностика, *Автоматика и Информатика*, бр. 3, 29-34, 2010.