



MEDIÇÃO DIRETA DE TEMPERATURA DE ROTORES DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

M. R. Granado
CERTI

S. L. Avila e C. A. Penz
IFSC

G. Knolseisen
AUTOMATIC

Resumo

A saúde de uma máquina elétrica rotativa pode ser identificada pelo monitoramento dos vários fenômenos elétricos e mecânicos envolvidos. O diagnóstico da condição operacional da máquina fica mais fácil tendo mais informações e sabendo como as interpretar corretamente. Este artigo propõe uma bancada experimental para medição direta da temperatura para máquinas amplamente utilizadas na indústria. Além da contribuição relevante ao processo de ensino-aprendizagem de máquinas elétricas rotativas, esta bancada de testes também fornece pesquisas comparativas sobre técnicas de diferentes naturezas, como por exemplo, a análise de transientes na corrente de alimentação, a interpretação de vibrações mecânicas, o sistema de monitoramento não invasivo usando campo eletromagnético externo ou mesmo fenômenos acoplados em máquinas elétricas rotativas. Neste artigo, a principal contribuição é a comparação de sensores de temperatura com diferentes tecnologias.

Palavras chave

Temperatura; Rotor; Máquinas Elétricas Rotativas; Bancada de testes.

1 INTRODUÇÃO

Máquinas elétricas rotativas representam grande parte das cargas em plantas industriais. Manter a disponibilidade de máquinas e maximizar sua vida útil é essencial para garantir o retorno dos investimentos e a lucratividade do negócio.

O monitoramento de máquinas elétricas rotativas é um foco recorrente na engenharia de manutenção. O objetivo é migrar as políticas de manutenção para técnicas preditivas - baseadas nas condições do motor ou do gerador - em atividades periódicas ou mesmo corretivas.

Por possuírem um elemento rotativo, sofrem de algumas falhas comuns decorrentes, por exemplo, de vibração nos mancais, falta de lubrificação e falha no isolamento. Esses problemas podem reduzir a eficiência da máquina, danificando, além da própria máquina, todo o sistema em que está inserida.

Essas falhas produzem aumento de temperatura e, então, a aplicação de um método para medir a temperatura diretamente no rotor de motores e geradores têm um impacto positivo na antecipação de problemas [1]-[3]. Os principais benefícios são: redução na frequência de paradas programadas (para inspeção, manutenção e reparo); redução na frequência de paradas forçadas; redução da alocação de manutenção em horas-homem aumento da eficiência operacional da unidade; e redução do estoque de peças de reposição.

O principal objetivo aqui é estudar as tecnologias de medição de temperatura em rotores de máquinas elétricas rotativas. Uma bancada de ensaio experimental para avaliações diretas da temperatura do rotor foi construída. Além dos estudos educacionais, essa confiável bancada de testes também fornece pesquisas comparativas sobre técnicas como transientes de correntes [4], vibrações [5] ou análises eletromagnéticas [6] em máquinas elétricas rotativas.

2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Conforme dito, muitos fatores como por exemplo a vibração nos rolamentos, a falta de lubrificação e a falha no isolamento produzem aumento da temperatura. Como consequência, o desempenho da máquina diminui [7]. Esses fatores causam um aumento na quantidade de energia elétrica demandada e, conseqüentemente, a redução dos indicadores de eficiência.

Mesmo no processo de conversão eletromecânica de energia, ocorrem perdas [8]. Existem basicamente três tipos de perdas:

- Efeito Joule nos enrolamentos, resultando em aumento da temperatura e conseqüentemente deterioração do isolamento;
- Mecânica, caracterizada por atrito, e geralmente são percebidos em rolamentos, escovas e ventilação;
- e perdas por histerese magnética e correntes parasitas, resultantes da magnetização de materiais ferromagnéticos, causando o aquecimento da máquina.

A potência nominal das máquinas elétricas rotativas pode ser determinada por características mecânicas e térmicas. Por exemplo, a corrente máxima é determinada pela temperatura máxima de operação que o isolamento pode suportar sem danificar ou causar perda excessiva da vida útil.

3 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DO ROTOR

Podem-se citar vários documentos normativos usados para padronizar procedimentos de medição de temperatura em máquinas elétricas rotativas, como IEC 60034-1: 2017, NEMA MG 1: 2016, IEEE 112: 2017 e ABNT 17094-3: 2018. Esses documentos revelaram métodos e estratégias muito semelhantes entre eles. Podem-se classificar os métodos em três categorias:

- Método de variação da resistência elétrica do enrolamento: a temperatura do enrolamento pode ser determinada a partir da medição da resistência do enrolamento, uma vez que a resistividade elétrica dos materiais condutores varia com a temperatura. Três técnicas possíveis: (a) medição direta (ohmímetro); (b) medição de corrente e tensão com sinais CC; (c) método de sobreposição. As (a) e (b) são realizadas logo após o uso da máquina. A (c) é realizada injetando um sinal CC ou CA sobre os sinais CA habituais;
- Método do sensor de temperatura embarcado: a temperatura é determinada usando sensores de temperatura, como termorresistores, termopares e termistores semicondutores. Esses sensores são colocados dentro da máquina no processo de construção, em pontos inacessíveis quando a máquina é montada.
- Método termométrico: a temperatura do enrolamento é estimada através de medições de temperatura em superfícies acessíveis da máquina, após a montagem. A medição pode ser realizada através de termômetros de bulbo, termopares, termistores e termorresistores. Os sensores de temperatura devem ser alocados em locais onde altas temperaturas são mais comuns, para considerar casos mais extremos.

Técnicas para avaliação da temperatura em estruturas estáticas e de fácil acesso, como o estator, são bem conhecidas [9]-[11]. Para a avaliação da temperatura do rotor, existem obstáculos que devem ser considerados. Além de o objeto estar em movimento, problemas associados a ruído, tipo de transdutor, fixação e campos eletromagnéticos intensos também dificultam a medição. Neste contexto, existem duas estratégias de medição: sensores com e sem contato com o rotor [12].

Técnicas de medição sem contato são alternativas óbvias onde o objeto a ser medido está em movimento [13]. Entre as opções disponíveis, pode ser usada, por exemplo, uma câmera infravermelha. Eles têm resultados aceitáveis para medir temperatura em ventiladores, anéis, estator, enrolamentos, quando não são pintados, caso contrário, podem apresentar erros significativos. Dificuldade extra aqui pode ser a alta velocidade. Outra alternativa disponível são os termômetros infravermelhos [14][15]. Diferente da câmera infravermelha, não há formação de imagem, mas a medição de uma temperatura média no campo de visão óptico relacionado ao transdutor.

As técnicas de medição com contato não deveriam interferir nas características físicas da máquina. Termopares e termoresistores de platina (RTD) são instrumentos bem conhecidos. Para medir a temperatura no rotor, uma técnica é abrir um orifício no local para alocação do sensor. Esses sensores são úteis para detectar mudanças rápidas de temperatura. No entanto, esses sensores são afetados pelo ruído, prejudicando as medições [16].

Outra técnica com contato que pode ser utilizada são os adesivos sensíveis à temperatura [17]. Existem várias desvantagens no uso desses adesivos, como por exemplo, a viscosidade na superfície quente e em movimento. Assim, os sensores devem ser substituídos com frequência. Semelhante aos adesivos pode ser usada tinta sensível à temperatura. Em geral, é afetada pelo tempo de exposição à temperatura.

Após o sensor realizar a medição, é necessário que os dados sejam transmitidos de alguma maneira. Existem algumas abordagens comumente usadas, como o uso de anéis coletores. A técnica alternativa é um sistema sem fio, por identificação por radiofrequência (RFID) ou links ópticos para transferência de dados. Não possuir movimento mecânico é vantajoso, mas os campos eletromagnéticos da máquina podem ser uma dificuldade.

Outra abordagem dentro das opções de medição da temperatura é baseada no conceito de ondas acústicas de superfície (SAW) [18]. Um sensor SAW é criado por uma combinação de um transdutor interdigital (IDT) e múltiplos refletores em um monocristal piezoelétrico. O transdutor interdigital, conectado à antena, transforma, com a ajuda do efeito piezoelétrico inverso, o sinal recebido em uma SAW. Essa onda se propaga no cristal em direção aos refletores. Os refletores estão dispostos em um padrão específico que reflete partes da onda incidente. O que retorna ao IDT é uma série de ecos de alta frequência, que são transformados novamente em um sinal eletromagnético. O transdutor e os refletores são modificações feitas no substrato. O sensor opera em conjunto com uma antena.

4 BANCADA EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO ROTOR

Os objetivos são realizar a medição de temperatura do rotor monofásico usando diferentes sensores; comparar as medições; e verificar a robustez dos sensores e do sistema de aquisição.

A bancada experimental é composta por um centro de controle constituído por um Arduino Uno R3, no qual os dispositivos de controle, aquisição e proteção estão alocados. A bancada de trabalho também contém uma estrutura para a fixação dos sensores de temperatura. Os principais materiais são:

- Motor de indução CA monofásico de 1 kW;
- Logbox Novus AA / DA datalogger;
- Interface óptica IR-Link3 (USB / IR);
- Transmissor e receptor de módulo RF 433 MHz AM;
- Sensor de termoresistor de platina tipo PT100 Ultra Precise RTD;
- Sensor de infravermelho modelo OS136A-1-MV-F OMEGA; e
- Sensor infravermelho MLX90614 MELEXIS.

A Figura 1 mostra o esquema elétrico da bancada experimental de temperatura do rotor. Esse esquema visa facilitar o entendimento das conexões elétricas feitas na bancada de trabalho. Este esquema abrange o sistema como um todo, apresentando as conexões de comando, força e aquisição.

A estrutura de fixação dos sensores PT100 e OS136A foi feita com perfil estrutural de alumínio. O arranjo é feito para alinhar os sensores ao rotor. A Figura 2 mostra essa estrutura. Importante ressaltar que os campos de visão dos sensores infravermelhos (definidos nos respectivos catálogos) foram considerados na definição da distância.

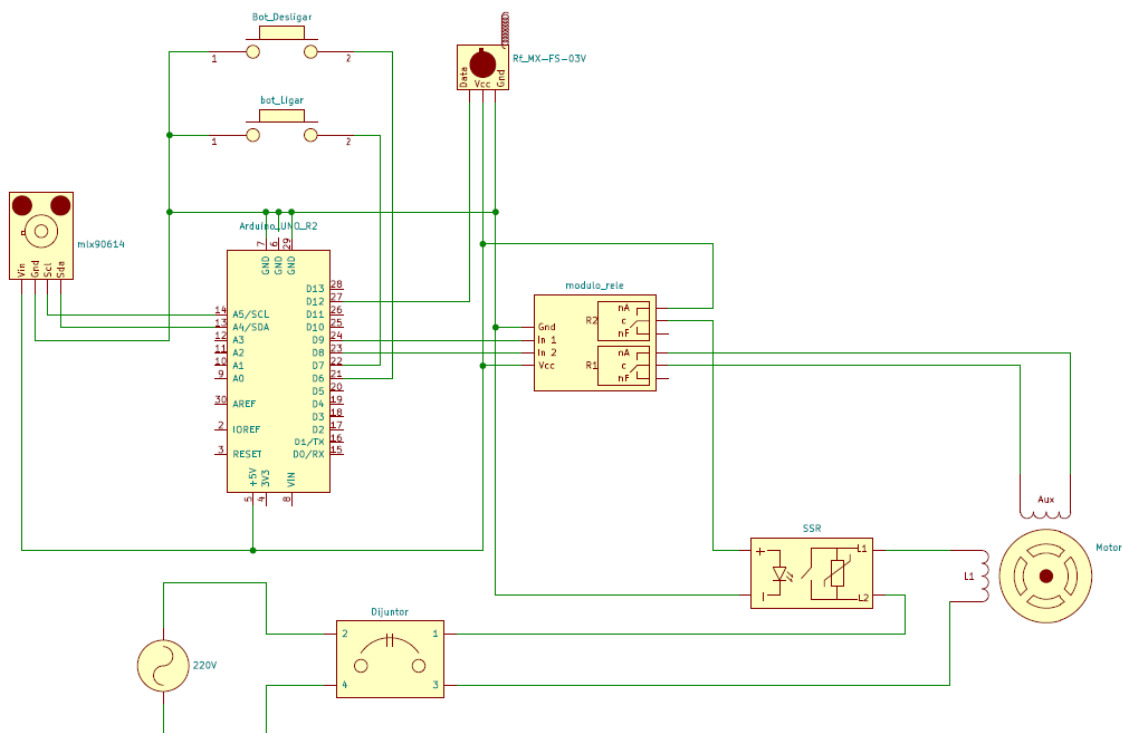


Figura 1. Esquema elétrico dos sensores PT100 e OS136A.

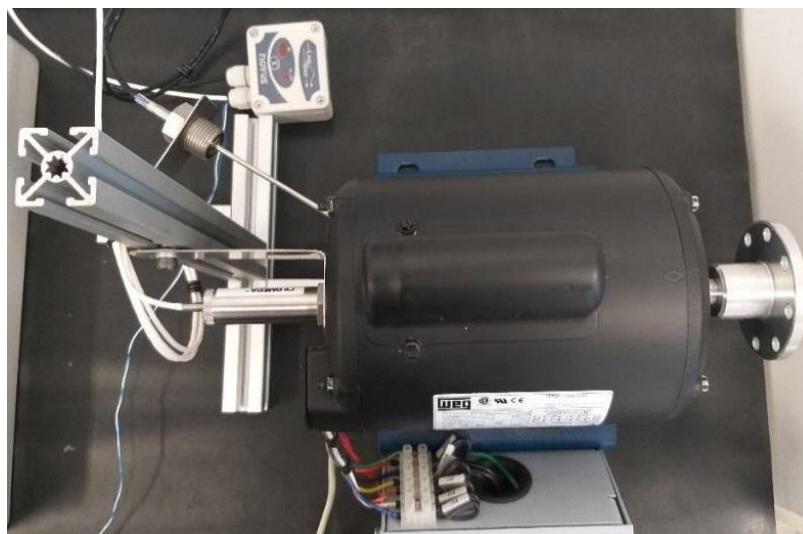


Figura 2. Montagem dos sensores PT100 e OS136A.

O dispositivo de aquisição LogBox foi configurado para medição do PT100. O sensor foi conectado ao canal 1 do sistema de aquisição e seu respectivo esquema de conexão é mostrado na Figura 3.

O sensor infravermelho OS136A possui quatro fios. Dois deles eram usados para alimentar o sensor, no qual uma fonte de 12 Vdc está conectada, e dois fios relacionados ao sinal de medição. O sensor OS136A foi conectado ao canal 2 da LogBox configurado como faixa de entrada de 0 a 10 V. O esquema de conexão é mostrado na Figura 3.

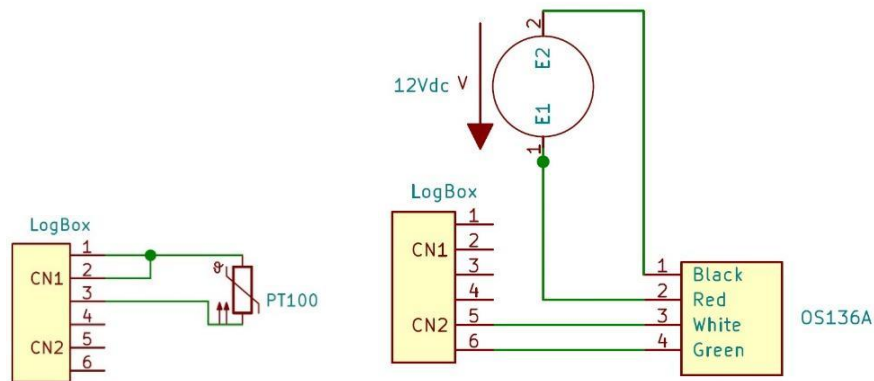


Figura 3. Esquemas elétricos de PT100 e OS136A.

O sensor infravermelho MLX90614 foi instalado internamente no motor, como pode ser visto na Figura 4. O circuito de aquisição do sensor MLX90614 é composto por um Arduino Uno R3. A partir desse hardware, a energia e a aquisição do sensor são realizadas. O esquema de conexão é mostrado na Figura 1.

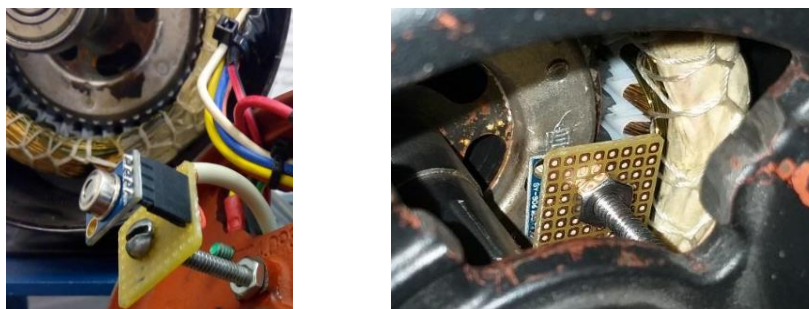


Figura 4. Montagem do sensor MLX90614.

5 RESULTADOS

Para obter dados da bancada de testes, foram realizadas as seguintes etapas:

- Medir a temperatura ambiente e do corpo do motor usando o dispositivo infravermelho de referência FLUKE;
- Dar partida no motor;
- Iniciar a aquisição de dados de temperatura através da porta serial LogBox e Arduino;
- Registrar as leituras do FLUKE no rotor a cada 5 minutos;
- Aguardar o atingimento da temperatura nominal da máquina;
- Desligar o motor;
- Registrar os dados até a temperatura próxima a ambiente.

A Figura 5 apresenta um ensaio completo. No exemplo aqui apresentado, as 14h é realizado a medição da temperatura ambiente (25 °C) e o motor é ligado. Percebe-se a subida da temperatura até o seu valor nominal e estabilidade. As 15h o motor é desligado e, por consequência, também a sua ventilação forçada. Percebe-se uma elevação abrupta da temperatura. Mais uma hora de medições é realizada até o que motor volte a algo próximo da temperatura ambiente. Em verde é representado as leituras do sensor OS136A, em lilás a do sensor MLX90614 e em azul a do PT100.

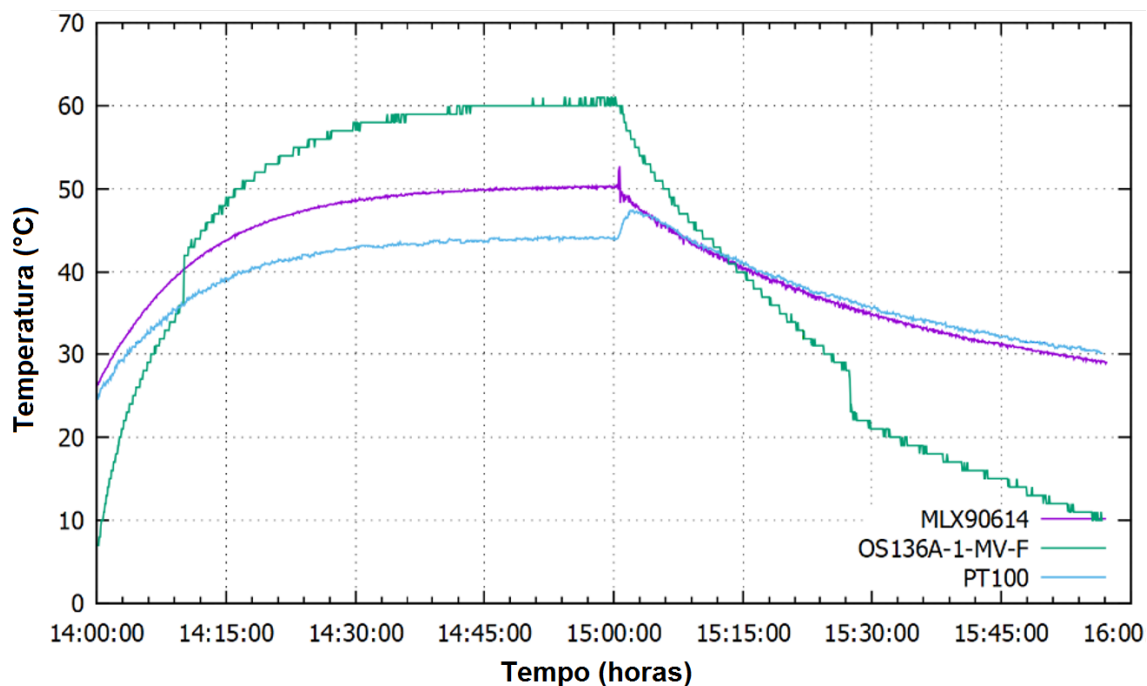


Figura 5. Comparação da medida direta da temperatura utilizando três tecnologias diferentes.

Os três sensores apresentaram leituras discrepantes. PT100 e MLX90614 possuem comportamentos que podem ser considerados adequados, com certa cautela. As leituras do OS136 não representam de forma adequada o ensaio realizado.

Como forma de quantificar esta diferença, foi obtido o desvio padrão das medições entre os sensores. Fica claro que as leituras do PT100 e do MLX90614 estiveram bastante próximas, apresentando um desvio padrão pequeno ao passo que as medidas envolvendo o sensor OS136A apresentaram um desvio padrão maior.

Quadro 1 - Valores máximos e mínimos de desvio padrão entre os sensores

Ensaio 1					
PT100-OS136A		PT100-MLX90614		OS136A-MLX90614	
Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor
10,20	0	4,195	0,325	10,685	0,005

Essas diferenças ocorrem pela natureza dos três sensores. Algumas considerações podem ser feitas:

- o PT100 deveria estar em contato com o alvo, mas, na verdade, ele foi instalado o mais próximo possível, uma vez que o objeto a ser monitorado está em movimento. Esta distância provoca erro na medição;
- o OS136A não se mostrou adequado nem como indicativo de tendência para temperaturas abaixo dos 40 °C.
- Para os sensores de infravermelho, OS136A e MLX90614, deve-se ter atenção também quanto ao possível erro de leitura devido a emissividade do material do objeto a ser monitorado. A emissividade de um material está relacionada à sua superfície e ao seu acabamento, varia de acordo com a temperatura em que o objeto se encontra e com o comprimento de onda da radiação emitida.
- Cabe destacar também o tamanho e a simplicidade de instalação do sensor MLX90614, o qual fica interno ao motor.

De acordo com os ensaios realizados e levando-se em conta os apontamentos aqui feitos, percebe-se um desempenho superior do sensor MLX90614 frente aos demais testados para a situação aqui proposta.

6 CONCLUSÃO

Muitos fatores produzem aumento da temperatura em máquinas elétricas rotativas, como por exemplo a vibração nos rolamentos, a falta de lubrificação e a falha no isolamento. Como consequência, o desempenho da máquina diminui e também a sua vida útil. Monitorar a sua temperatura é, portanto, uma das opções para diagnósticos preditivos em ambiente industrial.

Discutiu-se aqui técnicas para a medição de temperatura em rotores de máquina elétricas rotativas. Após considerações sobre técnicas comumente usadas, e considerando o desejo de uma medição direta da temperatura e de baixo custo tanto nos sensores como na sua instalação, três tecnologias foram aqui testadas: sensor de termoresistor de platina tipo PT100, sensor de infravermelho OS136A e sensor infravermelho MLX90614.

Dado o contexto dos ensaios, ficou demonstrado que o sensor MLX90614 obteve os resultados mais adequados. Destaca-se aqui também o seu tamanho menor e a sua simplicidade de instalação, quando comparado aos outros dois. A sua instalação no interior da máquina é um diferencial positivo para aplicações em ambientes industriais.

As análises feitas neste trabalho são de grande valia no contexto do monitoramento de máquinas elétricas rotativas. Além disso, a bancada construída permite comparações com outras técnicas de diagnóstico, como por exemplos transientes de correntes [4], vibrações [5], análises eletromagnéticas [6] ou ainda modelos com acoplamento físico de grandezas diferentes [19][20]. Além disso, estudos futuros versarão sobre a identificação de tipos e classificação de severidade de problemas que resultem no aumento da temperatura do rotor, usando técnicas de inteligência artificial.

Agradecimentos

Este estudo envolve a empresa privada AUTOMATIC e o IFSC, com apoio financeiro da FAPESC 2018TR422.

Bibliografia

- [1] Loiselle R., Xu Z. and Voloh I. (2018) Essential Motor Health Monitoring: Making Informed Decisions About Motor Maintenance Before a Failure Occurs. IEEE Industry Applications Magazine, 24(6):8–13.
- [2] Cheng Y., Wang Z. and Zhang W. (2019) A Novel Condition-Monitoring Method for Axle-Box Bearings of High-Speed Trains Using Temperature Sensor Signals. IEEE Sensors Journal, 19(1):205-213.
- [3] Lynn C. (1939) Effects of temperature on mechanical performance of rotating electrical machinery. Electrical Engineering, 58(10):514-518.
- [4] Sapena-Bañó A. M. et. al (2015) Fault diagnosis of rotating electrical machines in transient regime using a single stator current's FFT. IEEE Trans. Instrum. Meas. 64(11): 3137-3146.
- [5] Finley W. R. et. al (2015) Motor vibration problem: How to diagnose and correct vibration errors. IEEE Ind. Appl. Mag., 21(6): 14–28.
- [6] Tsytkin M. (2017) The origin of the electromagnetic vibration of induction motors operating in modern industry. IEEE Trans. Ind. Appl. 53(2): 1669-1676.
- [7] Matsushita O. et al. (2017) Vibrations of rotating machinery, 1st ed., Springer, ISBN 9784431554561.
- [8] Umans S. D., Fitzgerald A., Kingsley C. (2016) Electric machinery, 7th ed., McGraw-Hill Science, ISBN 0073380466.
- [9] Toliyat H et. al (2017), Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis, 2 ed., CRC Press, ISBN 9781138073975.

- [10] Hey J. et. al (2016) Online monitoring of electromagnetic losses in an electric motor indirectly through temperature measurement. *IEEE Trans. Ener. Conv.* 31(4): 1347-1355.
- [11] Henao H. et al (2014) Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 8(2): 31-42.
- [12] Prasad D. and Nath V (2018). An Overview of Temperature Sensors, Part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series (LNEE, volume 476), Springer.
- [13] Optris Infrared Sensing, Basic principles of non-contact temperature measurement, https://www.optris.com/applications?file=tl_files/pdf/Downloads/Brochures%20US/optris-basic-brochure.pdf (2019, accessed 25 February 2019).
- [14] Ganchev M., Umschaden H. and Kappeler H. (2011) Rotor temperature distribution measuring system. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, 2006-2011.
- [15] Goumopoulos C. (2018) A High Precision, Wireless Temperature Measurement System for Pervasive Computing Applications. *Sensors MDPI* 18(10)3445:1-23.
- [16] Liu G. et al. (2018) Evaluation of different calibration equations for NTC thermistor applied to high-precision temperature measurement. *Measurement*, 120(1)21-27.
- [17] Chang H. et al. (2018) Preparation and characterization of the double-side adhesive tape with reactive properties and high thermal conductivity for electronic package. 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Shanghai, 319-323.
- [18] Morales-Rodríguez M. E. et al. (2018) Fabrication of low cost surface acoustic wave sensors using direct printing by aerosol inkjet. *IEEE Access* 6(1):20907-20915.
- [19] N. J. Batistela, et al. (2017) Non-invasive monitoring system of synchro-nous generator using external field. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* 16(1):70-89.
- [20] Mukundan S. et al. (2018) Parameter determination of PMSM using coupled electromagnetic and thermal model incorporating current harmonics. *IEEE Transactions on Magnetics* 54(11):1-5.