

Grzegorz Psuj, Michał Maciusowicz\*  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

# Wykorzystanie zależnej od czasu widmowej reprezentacji sygnału szumu Barkhausena na potrzeby nieniszczącej oceny elementów stalowych

## The use of time-dependent spectral representation of Barkhausen noise signal for the needs of non-destructive evaluation of steel elements

### ABSTRACT

The scope of applications of the magnetic Barkhausen noise observation (BN) method for non-destructive testing of the state or properties of magnetic materials is constantly increasing. Due to the stochastic nature of the Barkhausen effect, it is necessary to use advanced methods of analysis in order to quantify the observed relationships. Many factors can affect the various properties of BN signals expressed in the domain of time and frequency. Therefore, observation of changes in the dynamics of this phenomenon requires the analysis of both representations during the process of extraction of features. For this reason, it is preferable to use methods for transforming signals into time-frequency (*tf*) representation. In this article, a Short-Time Fourier Transform (STFT) was used to combine information provided in time and frequency. The analysis of *tf* representations of BN signals obtained for steel samples representing various degrees of damage was performed and the results were presented.

**Keywords:** *Magnetic Barkhausen Noise; spectral analysis; STFT; non-destructive testing*

### STRESZCZENIE

Zakres zastosowań metody obserwacji magnetycznego szumu Barkhausena (BN) do nieniszczącego badania stanu lub właściwości materiałów magnetycznych stale rośnie. Z uwagi na stochastyczną naturę efektu Barkhausena niezbędne staje się użycie zaawansowanych metod analizy w celu ilościowej oceny obserwowanych zależności. Wiele czynników może wpływać na różne właściwości sygnałów BN wyrażanych w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dlatego też obserwacja zmian dynamiki tego zjawiska wymaga analizy obu reprezentacji podczas procesu ekstrakcji cech. Z tego powodu korzystne staje się stosowanie metod transformacji czasowo-częstotliwościowych (*tf*) sygnałów. W tym artykule, w celu połączenia informacji dostarczonych w czasie i częstotliwości, zastosowano krótkoczasową transformatę Fouriera (STFT). Przeprowadzono analizę uzyskanych reprezentacji *tf* sygnałów BN otrzymanych dla próbek stalowych o różnym stopniu zniszczenia i przedstawiono wyniki.

**Słowa kluczowe:** *zjawisko szumu Barkhausena; analiza spektralna; krótkoczasowa transformacja Fouriera; badania nieniszczące*

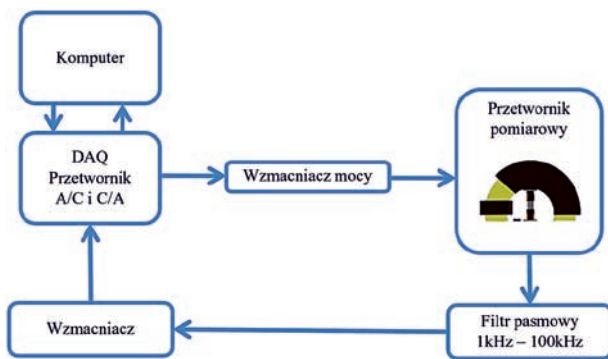
### 1. Wstęp

Wiele budowli powstających obecnie jest zbudowanych ze stali ferromagnetycznych. Jak wiadomo istnieje ścisłe powiązanie pomiędzy właściwościami mechanicznymi, a magnetycznymi tych materiałów [1]. Fakt ten pozwala na nieniszczące badanie stali przy użyciu metod magnetycznych. Jedną z nich jest metoda wykorzystująca zjawisko magnetycznego szumu Barkhausena (ang. Magnetic Barkhausen Noise, MBN) [2,3]. Zjawisko to zaobserwować można w wyniku oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego na badany element stalowy. Najczęściej jako przetwornik stosowana jest cewka nawinięta na rdzeń ferromagnetyczny, w którym wytwarzany jest strumień magnetyczny [4]. Cewka ta jest przykładana do materiału i obwód magnetyczny staje się quasi-zamknięty, co powoduje namagnesowanie się próbki. Wraz ze zmianą kierunku płynięcia zmiennego prądu w obwodzie cewki wzbudzającej następuje zmiana kierunku magnesowania. W wyniku tego dochodzi

do przemiany układu domen magnetycznych znajdujących się w testowanym materiale. W przypadku wystąpienia niejednorodności struktury krystalicznej ferromagnetyka swobodny przebieg tej modyfikacji jest blokowany, a cały proces zachodzi skokowo. W konsekwencji nieciągłe przemiany struktury domenowej powodują lokalne zaburzenia indukcji magnetycznej, które można następnie obserwować przy użyciu czujników pomiarowych. Takim elementem jest cewka zbierająca szum pochodzący z materiału. Ze względu na wpływ wielu czynników na intensywność powstawania przeszkód ograniczających proces przemiany domenowej, efekt Barkhausena znajduje zastosowanie do badania zarówno makro-, jak i mikrostruktury materiałów, w tym do badania stanu naprężeń, określania faz materiału czy poziomu utwardzenia. Zjawisko Barkhausena ma stochastyczny charakter. Dlatego też, w celu parametryzacji sygnałów pomiarowych, wymagane jest zastosowanie metod ich przetwarzania i analizy. Najczęściej operacje te odbywają się w dziedzinie czasu. W wyniku tych działań uzyskuje się wiele parametrów charakterystycznych i statystycznych dla

\*Autor korespondencyjny. E-mail: [michal.maciusowicz@zut.edu.pl](mailto:michal.maciusowicz@zut.edu.pl)

sygnałów, takich jak wartość skuteczna RMS, energia czy liczba impulsów [5,6]. Charakterystyka częstotliwościowa mierzonych sygnałów jest również wykorzystywana, szczególnie przy ocenie zmian właściwości w warstwie przypowierzchniowej materiału. Niemniej jednak te metody analizy nie dostarczają pełnej informacji pochodzącej z testowanego materiału. Aktywność szumu MBN zmienia się w trakcie okresu jego występowania. Co więcej, dynamika tego zjawiska zależy od wielu czynników. W efekcie, pojawia się potrzeba analizy reprezentacji sygnałów w połączonej dziedzinie czasowo-częstotliwościowej. W celu uzyskania większej ilości informacji zastosowanie znaleźć mogą zaawansowane metody cyfrowego przetwarzania sygnału. W tym celu stosuje się analizę zmian widma sygnału w kolejnych odcinkach czasu. Analiza ta obejmuje różne metody transformacji pozwalające na definicję reprezentacji typu czas-skala  $ts$  (reprezentacja wielorozdzielcza) [7] lub czas-częstotliwość  $tf$  (reprezentacja wielowidmowa) [8]. Przy pomocy krótkoczasowej transformacji Fouriera można uzyskać reprezentację sygnału w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej [8]. Wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej znajduje wiele zastosowań np.: do analizy tonalnej dźwięków audio [9] lub do analizy sygnałów pochodzących z badania elektromiograficznego [10]. Transformacja stosowana jest również do analizy i rozpoznawania podejście ilościowego opisu reprezentacji czasowo-częstotliwościowej do analizy sygnału szumu Barkhausena na potrzeby oszacowania stanu naprężeń w stalowych próbkach.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego.  
Fig. 1. Diagram of the measurement system.

## 2. Eksperyment

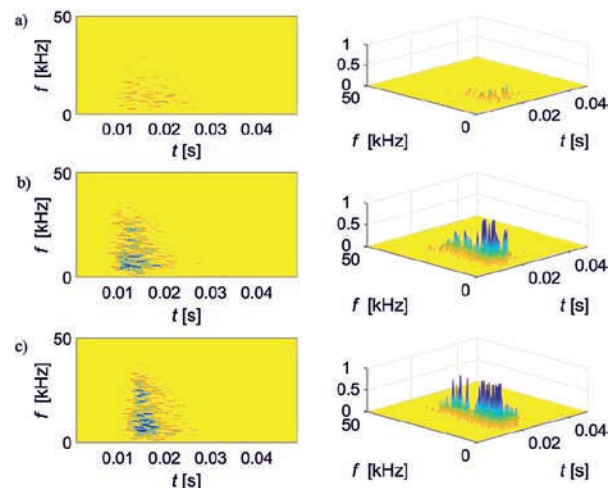
Eksperyment wykonano na próbkach ze stali konstrukcyjnej St3S, które poddano statycznemu rozciąganiu. Granica plastyczności tej stali mieści się w przedziale 185-235 MPa, a granica wytrzymałości na zerwanie w przedziale 340-520 MPa. Informacja o zachodzących zjawiskach w materiale była zbierana przy pomocy przetwornika umieszczonego tuż nad badanym elementem. Przetwornik pomiarowy składał się z: cewki magnesującej badane materiały i cewki pomiarowej. Próbkę były rozciągane przy użyciu maszyny hydraulicznej, dzięki czemu uzyskano wartości naprężeń w zakresie od 0 MPa (stan przed oddziaływaniem siły) do 350 MPa. Pomiar wykonywano w trakcie oddziaływania zadanej siły. Schemat systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Wykonano

pomiar dwóch próbek SW1 i SW2. W przypadku próbki SW1 uzyskano maksymalną wartość naprężenia równą 200 MPa, a w przypadku drugiej próbki 350 MPa.

## 3. Analiza reprezentacji czasowo-częstotliwościowej sygnałów MBN

Analiza sygnału przy pomocy krótkoczasowej transformacji Fouriera (z ang. Short-Time Fourier Transform – STFT) pozwala na jednoczesną analizę sygnału w czasie i częstotliwości. Obliczenia realizowane są poprzez dzielenie sygnału na partie składające się z  $N$ -liczby próbek (okna sygnału), a następnie poprzez wykonywanie na tym zestawie próbek szybkiej transformacji Fouriera FFT. Po złączeniu otrzymanych reprezentacji i poddaniu ich operacji tworzącej spektrogram otrzymuje się zmianę widma sygnału w czasie  $S_{BN}(t,f)$ .

Na rys. 2 zaprezentowano przykładowe spektrogramy  $BN_{TF S} = |S_{BN}(t,f)|^2$  szumu Barkhausena uzyskane w trakcie badań próbek przy różnym poziomie zadanych naprężeń.



Rys. 2. Spektrogramy sygnału szumu Barkhausena dla próbki SW2 przy naprężeniach: a) 0 MPa b) 160 MPa, c) 350 MPa; wszystkie wartości znormalizowano.

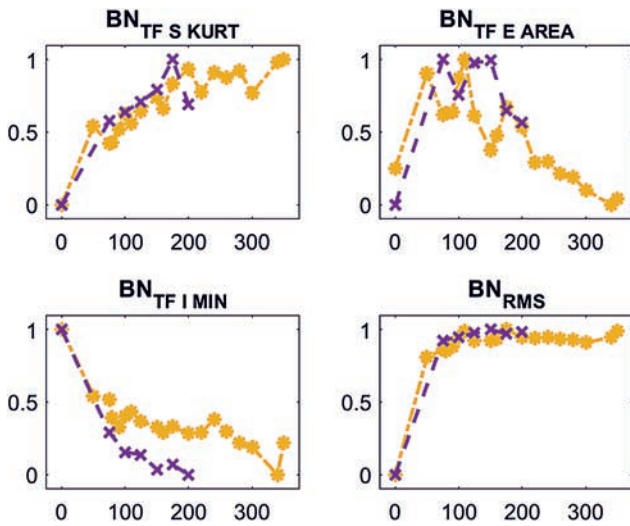
Fig. 2. Spectrograms of Barkhausen Noise signal obtained for SW2 sample at stress: a) 0 MPa, b) 160 MPa c) 350 MPa; all results were normalized.

Jak można zauważyć, widmo sygnału w czasie zmienia się wraz ze zmianą naprężenia. Przed procesem obciążania badanej próbki gęstość widmowa osiąga stosunkowo niskie wartości, a jej rozkład jest raczej jednorodny w większości płaszczyzny  $tf$ . Następnie rośnie aktywność w zakresie niskich częstotliwości (do 10 kHz) i blisko początku okresu występowania sygnału MBN (rys. 2.b). Natomiast dla poziomu naprężeń zbliżonego do stanu granicznego można zaobserwować przesunięcie największej aktywności na osi czasu w kierunku przedziału czasowego odnoszącego się do wystąpienia maksimum pola magnesowania (rys. 2.c). W celu liczbowego wyrażenia informacji zawartej w spektrogramie należy przeprowadzić analizę i ekstrakcję cech uzyskanych rozkładów [8]. W wyniku analizy otrzymano zestawienie 36 cech. Przebieg wybranych parametrów w funkcji naprężenia został przedstawiony na rys. 3. Parametr  $BN_{TF S KURT}$  reprezentuje standardowy parametr statystyczny – kurtozę

$$BN_{TF S KURT} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (BN_{TF S i,j} - BN_{TF S MEAN})^4}{N \cdot M \cdot BN_{TF S SD}^4} \quad (1)$$

gdzie:  $BN_{TF S MEAN}$  to wartość średnia, a  $BN_{TF S SD}$  to standardowe odchylenie rozkładu spektrogramu  $BN_{TF S}$ .

Parametr ten opisuje rozkład punktów w spektrogramie względem ich wartości średniej. Kolejnym zaprezentowanym parametrem jest pole powierzchni ( $BN_{TF E AREA}$ ) obwiedni spektrogramu  $BN_{TF E}$ , określonej na podstawie wartości górnej granicy zakresu występowania szumu w danym odcinku czasu [8]. Parametr  $BN_{TF E AREA}$  związany jest ze zmianą szerokości pasma częstotliwościowego sygnału w czasie. Wraz ze zmianą naprężenia zmienia się wyraźnie wartość pola powierzchni obwiedni. Wartość tego parametru świadczy o poziomie koncentracji spektrogramu. Natomiast parametr  $BN_{TF I MIN}$  odnosi się do wartości minimalnej części urojonej transformaty  $\mathfrak{I}(S_{BN(t,f)})$ . Parametry te względem siebie mają różne trendy, ale w przypadku obu próbek są one zachowane, co świadczy o powtarzalności otrzymanych obserwacji. Dla porównania jakości informacji niesionej przez reprezentację czasowo-częstotliwościową otrzymane rozkłady parametrów porównano z rozkładem wartości skutecznej szumu MBN ( $BN_{RMS}$ ).



Rys. 3. Parametry obliczone w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej i w dziedzinie czasu.

Fig. 3. Parameters in time-frequency representation and in time domain.

#### 4. Wyniki i dyskusja

Parametry reprezentacji czasowo-częstotliwościowej charakteryzują się monotoniczną zmianą (z wyłączeniem wyników uzyskanych dla próbki nieobciążonej). W przypadku przebiegu  $BN_{RMS}$  zauważyć można wzrost parametru

w zakresie do ok. 200 MPa, po czym następuje jego spadek, by od 300 MPa ponownie niewiele wzrosnąć. Otrzymane charakterystyki reprezentacji  $tf$  stwarzają zatem większą szansę na poprawną identyfikację stanu badanego materiału. Nie mniej jednak niezbędne jest przeprowadzenie szerszego eksperymentu obejmującego większą liczbę badanych elementów i szerszą bazę uzyskanych parametrów.

#### 5. Literatura/References

- [1] D. Jiles, "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", CRC, Press, 2015
- [2] K. Miesowicz, W. J. Staszewski, T. Korbiel, "Analysis of Barkhausen noise using wavelet-based fractal signal processing for fatigue crack detection", *International Journal of Fatigue*, vol. 83, 2016, pp. 109-116
- [3] L. Piotrowski, B. Augustyniak, M. Chmielewski, Z. Kowalewski, "Multiparameter analysis of the Barkhausen noise signal and its application for the assessment of plastic deformation level in 13HMF grade steel", *Measurement Science and Technology*, vol. 21, 2010, 115702, 7pp, DOI:10.1088/0957-0233/21/11/115702
- [4] P. Lopato, G. Psuj, M. Herbko, M. Maciusowicz, "Evaluation of stress in steel structures using electromagnetic methods based on utilization of microstrip antenna sensor and monitoring of AC magnetization process", *Inf. Cntrl Meas. Econ. Environ.*, vol. 6, No. 4, 2016, pp. 32-36, DOI: 10.5604/01.3001.0009.5186
- [5] X. Kleber, A. Vincent, "On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel", *NDT & E International*, vol. 37, no. 4, pp. 439-445, Sept. 2004, DOI: 10.1016/j.ndteint.2003.11.008
- [6] S. Ding, G. Tian, G. Dobmann, P. Wang, "Analysis of domain wall dynamics based on skewness of magnetic Barkhausen noise for VOLUME XX, 2017 9 applied stress determination", *J. Magn. Magn. Mat.*, vol. 421, pp. 225-229, Jan. 2017, DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.08.030
- [7] C. Kownacki, "Wavelet Analysis of Barkhausen Noise in Reconstructing Distributions of Residual Stress", *Solid State Phenomena*, vol. 144, pp. 112-117, Sept. 2008, 10.4028/www.scientific.net/SSP.144.112
- [8] G. Psuj, M. Maciusowicz, "Analysis of time-frequency representation of Magnetic Barkhausen Noise for the need of damage evaluation of steel elements" *IEEE Xplore*, 2018.
- [9] T. J. Wilczyński, L. Gelman, P. Kleczkowski, "Spectral Features of the clarinet sound revealed by the set of STFT-Based parameters". 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 Apr 2012, Durban, South Africa. Available on 15th Aug. 2018: [https://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/479\\_wcndt\\_final00479.pdf](https://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/479_wcndt_final00479.pdf)
- [10] A. Tsai, J. Luh, T. Lin, "A novel STFT-ranking feature of multi-channel EMG for motion pattern recognition", *Expert System with Applications*, vol. 42, no.7, pp. 3327-3341, May 2015, DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.044
- [11] K. Paliwal, Leigh D. Alsteris, "On the usefulness of STFT phase spectrum in human listening test". *Speech Communication*, vol. 45, no. 2, pp. 153-170, Feb. 2005, DOI: 10.1016/j.specom.2004.08.001