

Zastosowanie akustycznej fali powierzchniowej do pomiaru temperatury szyn prądowych

Streszczenie. W artykule przedstawiona została nowoczesna metoda diagnostyki temperatury torów prądowych w rozdzielniach elektrycznych. Monitorowanie stanu termicznego szynoprzewodów pozwala wykryć usterki montażowe i inne anomalie występujące w układzie przesyłu i rozdzielnia energii elektrycznej. Pomijanie tego aspektu może być przyczyną poważnych awarii urządzeń elektroenergetycznych i spowodować duże straty związane z przestojem, a czasem nawet doprowadzić do pożaru. System bezprzewodowych, bezbateryjnych czujników temperatury wykorzystujących technologię SAW (Surface Acoustic Wave) umożliwia ciągły monitoring temperatury pracy punktów krytycznych rozdzielni.

Abstract. The article presents a modern method of temperature diagnostics of current paths in electrical switchboards. Monitoring the thermal status of the busbars allows to detect assembly defects and other anomalies occurring in the transmission and distribution system of electrical energy. Skipping this aspect may cause serious power equipment failures and cause large losses due to downtime, and sometimes even lead to a fire. The system of wireless, battery-free temperature sensors using SAW technology (acoustic surface wave SAW) enables continuous monitoring of the working temperature of critical points of the switchgear. (**Application of acoustic surface wave to measure busbar temperature.**)

Słowa kluczowe: temperatura, szynoprzewód, diagnostyka, akustyczna fala powierzchniowa.

Keywords: temperature, busbar, diagnostics, surface acoustic wave

Wstęp

Systemy diagnostyczne wykorzystujące powierzchniową falę akustyczną (SAW) stosowane są od połowy lat 60 jako filtry i linie opóźniające w systemach telekomunikacyjnych. Powierzchniowe fale akustyczne wytwarzane są na podłożu piezoelektrycznym za pomocą urządzenia IDT, które przetwarza energię elektryczną w energię mechaniczną. Czujniki fal akustycznych i przetworniki zbudowane z materiałów piezoelektrycznych zaczęto powszechnie wykorzystywać po drugiej wojnie światowej.

Rozwój gospodarczy, który obserwujemy w ostatnich trzydziestu latach w Polsce, spowodował wzrost liczby urządzeń i obiektów energetycznych wymagających sprawnego zasilania w energią elektryczną. Jakość energii elektrycznej i niezawodność jej dostaw jest ważna zarówno dla operatora sieci przesyłowej jak i użytkowników podłączonych do tych sieci. Patrząc z perspektywy użytkowników energii elektrycznej, najistotniejsze problemy związane z niezawodnością dostaw i jakością energii elektrycznej to takie, które powodują straty produkcyjne i awarie urządzeń. Do wiadomości publicznej rzadko docierają informacje o awariach katastrofalnych, a jeszcze rzadziej podawane są koszty takich awarii, które liczone są w milionach dolarów. Konieczność wdrażania i ciągłego rozwoju systemów diagnozujących stan techniczny kluczowych urządzeń energetycznych dociera do świadomości coraz większej liczby użytkowników. Proces ten ze względu na wysokie nakłady inwestycyjne jest powolny, ale świadomość potencjalnych strat wywołanych brakiem systemu ciągłego monitorowania stanu technicznego urządzeń wytycza kierunek, w jakim powinno się podążać w tym obszarze. Aktualnie tylko niewielki procent sieci i rozdzielni NN, SN i WN wyposażonych jest w systemy ciągłego monitoringu, pomimo że krytyczne zagrożenia stanowią jedną z wiodących przyczyn wyłączeń lub awarii zasilania. Zagrożenia krytyczne są efektem wzrostu temperatury spowodowanej przeciążeniem, korozją, utratą połączenia galwanicznego oraz niekorzystnymi warunkami otoczenia. Efektem przekroczenia dopuszczalnych temperatur eksploatacji instalacji, sieci i urządzeń elektroenergetycznych jest starzenie się izolacji elektrycznej czego skutkiem są zwarcia elektryczne będące najczęściej przyczyną pożarów. Problemem technicznym monitorowania temperatury czynnych szyn prądowych jest

kontakt z elementami przewodzącymi czujników temperatury. Ten warunek eliminuje większość dostępnych na rynku czujników. Niedogodnością tej jest pozbawiona metoda pomiaru temperatury czujnikami wykorzystującymi technologię akustycznej fali powierzchniowej SAW (Surface Acoustic Wave-SAW).

Pomiar temperatury toru prądowego

Termografia i pirometria stosowane powszechnie do diagnostyki temperatury torów prądowych mogą być stosowane w przypadku powierzchni widocznych optycznie dla kamer oraz pirometrów. Ogranicza to możliwość stosowania tradycyjnych metod pomiarowych i utrudnia skuteczną diagnostykę zwłaszcza w miejscach niewidocznych dla obsługi i urządzeń pomiarowych. Wykonanie pomiarów w takich miejscach wymaga wprowadzenia obsługi pomiarowej do strefy o podwyższonym ryzyku porażenia prądem elektrycznym. Powoduje to konieczność czasowego wyłączenia rozdzielni z ruchu energetycznego, co skutkuje uciążliwościami dla systemu zasilania. Z tego powodu pomiary przy użyciu obsługi pomiarowej przeprowadzane mogą być okresowo (1 lub 2 razy na rok).

Ponadto badania termograficzne nie gwarantują wykonania prawidłowego przeglądu, zwłaszcza w przypadkach występowania zanieczyszczeń powierzchniowych lub lotnych w badanych obiektach.

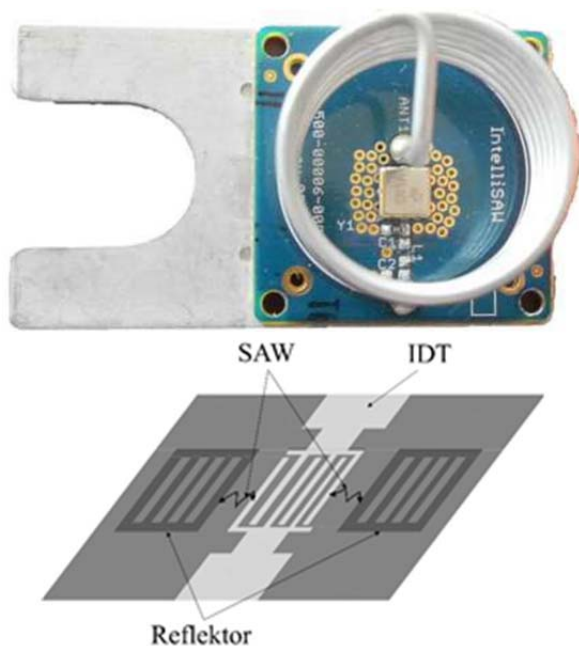
Czujniki temperatury SAW zapewniają wysokie bezpieczeństwo pomiaru ze względu na brak oprowadowania czujnika oraz odporność na silne pola elektromagnetyczne. Proces pomiaru temperatury nie wymaga obecności obsługi technicznej w pobliżu czynnych torów prądowych tak jak w przypadku termografii. Odczyt danych pomiarowych jest zdalny i łatwy do interpretacji bez konieczności zatrudniania wysoko wykwalifikowanych specjalistów.

Zasada działania czujnika SAW

Czujniki temperatury SAW firmy IntelliSAW są pasywnymi niewymagającymi przewodowego ani baterijnego zasilania czujnikami. Zasilane są sygnałem radiowym RF o częstotliwości w zakresie 425-442 MHz. Pasywność czujników SAW umożliwia ich eksploatację przez teoretycznie nieograniczony czas. W praktyce czas eksploatacji ograniczony jest starzeniem się materiałów, z

których wykonane są rezonatory i krystaliczne podłoże. Konstrukcja czujnika przedstawionego na rysunku 1 oparta jest na rezonatorze zawierającym przetwornik piezoelektryczny międzypalczasty IDT (*Interdigital Transducer*) bazujący na płytce krystalicznej np. LiNbO_3 , umieszczony między dwoma reflektorami odbijającymi generowaną przez przetwornik falę akustyczną [3].

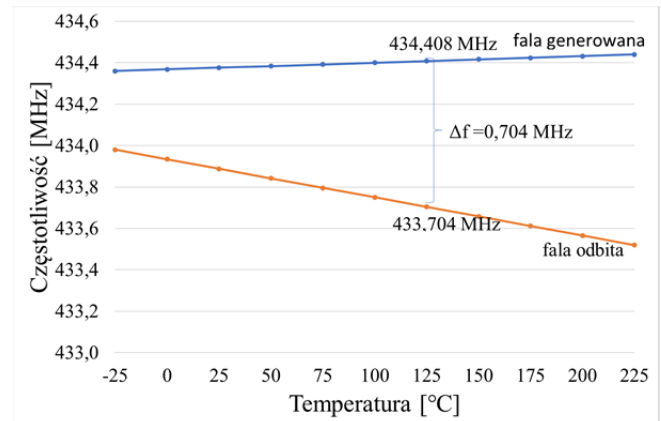
Sygnal akustyczny RF wysyłany przez przetwornik odbierany jest przez umieszczony w pewnej odległości koncentrator. Komunikacja jest dwukierunkowa i odbywa się za pomocą anten umieszczonych w czujniku oraz koncentratorze. Do jednego koncentratora może być podłączonych jednocześnie 12 czujników, które adresuje się kolejnym numerami. Przetwornik IDT przekształca odebrany sygnał radiowy RF emitowany przez koncentrator na akustyczną falę powierzchniową propagującą w kierunku reflektorów [2], [6]. Fale SAW po dotarciu do reflektorów są następnie odbijane w kierunku przetwornika IDT, w którym są przekształcane na sygnał RF i ponownie wysyłane do koncentratora.



Rys.1. Czujnik temperatury generujący SAW

Zmiany temperatury powodują rozszerzanie lub kurczenie się kryształu bazowego co wymusza zmianę prędkości propagacji fali SAW w kryształach, w efekcie powstaje opóźnienie w odbiorze fali odbitej, rejestrowanej w przetworniku IDT oraz zmiana jej częstotliwości [1], [3]. Wartość opóźnienia odbitego sygnału SAW zależna jest od naprężenia kryształu bazowego, które z kolei zależy od temperatury płytki bazowej przylegającej do badanej powierzchni szynoprzewodu. Warunkiem uzyskania dokładnego wyniku pomiaru jest znajomość czasu opóźnienia fali odbitej oraz jej częstotliwości w stosunku do fali generowanej przez przetwornik IDT [4], [8]. Odpowiednia kalibracja koncentratora umożliwia nałożenie na siebie przebiegów fali generowanej przez przetwornik i odbitej od reflektorów. Różnica częstotliwości obydwu fal jest linearyzowana w układzie przetwarzającym koncentratora [4], [5], a następnie wizualizowana na pulpicie operatorskim. W testowanym układzie pomiarowym spadek częstotliwości w stosunku do temperatury wynosił $0,0047 \text{ MHz} / ^\circ\text{C}$. W przykładowym pomiarze

przedstawionym na rysunku 2 uzyskano różnicę częstotliwości równą $0,704 \text{ MHz}$ co przekładało się na różnicę temperatury odniesienia (25°C) i temperatury mierzonej wynoszącej $149,8^\circ\text{C}$. Typowe czasy opóźnienia zwiernają się w przedziale od 2 do 20 μs i są znacznie dłuższe od czasów trwania sygnałów echa środowiskowego, które wynoszą poniżej 1 μs [2], [7], [9]. Koncentrator wyposażony w układ filtrów częstotliwościowych może łatwo wykryć sygnał echa i usunąć go z pasma sygnału SAW [2].



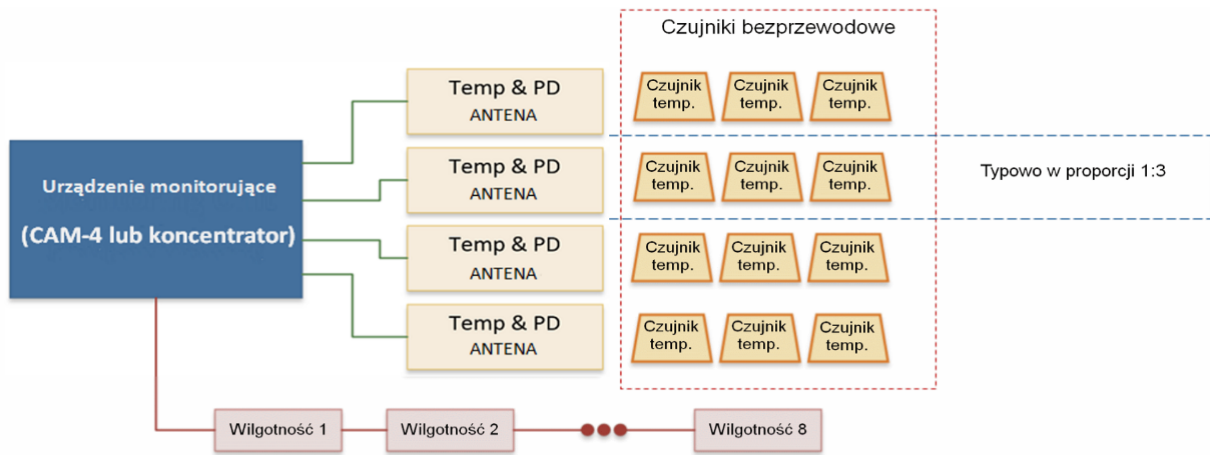
Rys.2. Rozkład częstotliwości po linearyzacji w pomiarze temperatury czujnikiem IntelliSAW

Do wytwarzania płytek bazowych kryształów piezoelektrycznych wykorzystuje się najczęściej monokryształ niobianu litu (LiNbO_3) o masie cząsteczkowej 128 u. Związek ten charakteryzuje się temperaturą Curie około 1200°C [1], co umożliwia pomiar temperatur w zakresie nawet do 1000°C . Górny zakres temperatury ograniczony jest wytrzymałością termiczną konstrukcji czujnika. W rozwiązaniach konstrukcyjnych czujników SAW stosowanych przez producentów, zakres pomiarowy mierzonych temperatur wynosił od -30°C do 150°C .

Realizacja układowa systemu diagnostyki Układ monitorujący

System diagnostyczny IntelliSAW wdrażany przez firmę EMERSON umożliwia ciągły monitoring stanu termicznego szynoprzewodów oraz miejsc wytypowanych jako krytycznie zagrożonych w głównych rozdzielniach obiektów energetycznych. Układ monitorujący podzielony jest na trzy części: pomiarową, komunikacyjną oraz rejestrującą. W skład części pomiarowej wchodzi czujniki temperatury podzielone na cztery sekcje liczące po trzy czujniki, co daje możliwość podłączenia do 12 czujników do jednego koncentratora. Część komunikacyjna zawiera cztery anteny sekcyjne, z których każda może odebrać lub nadać sygnał do maksymalnie trzech czujników. Dane pomiarowe są rejestrowane przez koncentrator, a następnie przy pomocy magistrali komunikacyjnej ModBus TCP, DNP3 lub IEC-61850 przesyłane do nadrzędnego systemu typu SCADA. Na rysunku 3 przedstawiono konfigurację systemu monitorującego.

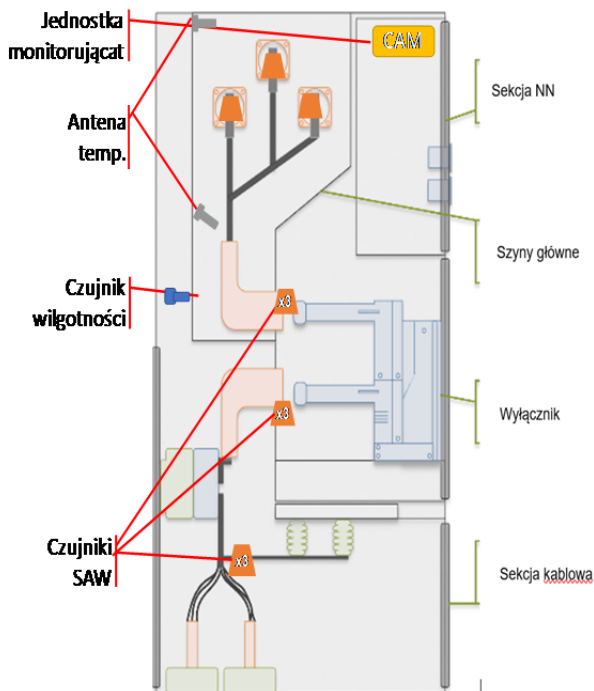
Zasięg anteny koncentratora IntelliSAW IRM-48 READER oraz sekcyjnej TPD wynosi 2 metry. Ograniczenie odległościowe czujników, anten TPD oraz koncentratorów wymusza zabudowę elementów całego systemu w obrębie obudowy rozdzielni, jak pokazano na rysunku 4.



Rys. 3. Konfiguracja systemu diagnostycznego IntelliSAW [wg EMERSON]

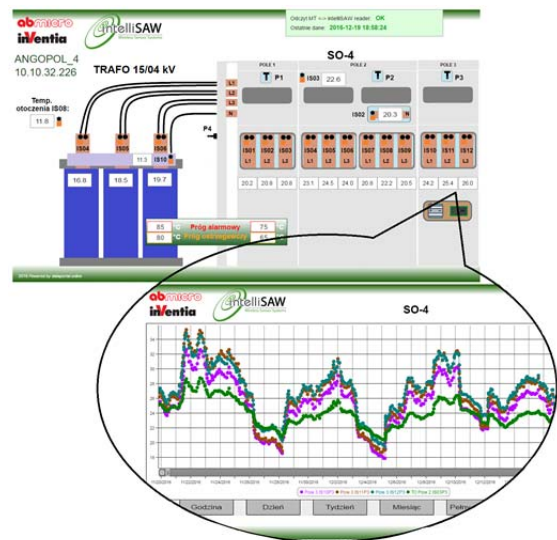
Miejscami szczególnie narażonymi na zagrożenia krytyczne w systemie elektroenergetycznym są:

- rozdzielnice NN, SN oraz WN,
- pola zasilające, sprzęgła i przyłącza,
- szynoprzewody,
- transformatory,
- wyłączniki generatorów,
- autotransformatory,
- stopy prostownicze,
- baterie kondensatorów.



Rys. 4. Przykład instalacji i rozmieszczenia elementów systemu IntelliSAW w rozdzielni SN [wg EMERSON]

Rejestracja danych z koncentratorów odbywa się w module telemetrycznym InVentia MT-101, który oprócz przesyłu danych przy użyciu magistral komunikacyjnych posiada również możliwość przesyłu danych sygnałem GPRS. Ta funkcjonalność pozwala na przesyłanie i gromadzenie zarejestrowanych danych pomiarowych w chmurze, rys. 5.



Rys. 5. Zdalny dostęp GPRS systemu IntelliSAW [wg EMERSON]

Czujniki oparte na technologii SAW znalazły zastosowanie głównie w energetyce. Są cenionym rozwiązaniem ze względu na wysoką niezawodność i wytrzymałość mechaniczną. Ze względu na brak ostrych krawędzi nie stwarzają zagrożenia wyładowań koronowych. Montaż do szynoprzewodów odbywa się poprzez trzpień śrub szynoprzewodów o średnicy trzpienia do 13 mm. W testowanych czujnikach dopuszczalne natężenie pola elektrycznego w bezpośrednim otoczeniu wynosiło do 95 kV/m, wytrzymałość zwarciova do 63 kA/3s. Dokładność pomiaru temperatury podawana przez producenta to $\pm 4^{\circ}\text{C}$, a rozdzielczość $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Podsumowanie

Pomiar temperatury w technologii SAW szynoprzewodów w rozdzielniach NN oraz SN jest nowym rozwiązaniem wprowadzonym do techniki monitorowania i diagnostyki w energetyce. Wysoka niezawodność i brak ingerencji w konstrukcję rozdzielni sprawia, że technologia SAW będzie rozwijana przez użytkowników świadomych zagrożeń krytycznych i wystąpienia potencjalnych strat związanych z awarią systemu zasilania zakładów produkcyjnych. W tabeli 1 przedstawiono porównanie dostępnych rozwiązań z zakresu monitoringu i diagnostyki zagrożeń termicznych metodami tradycyjnymi oraz przy użyciu technologii SAW.

Tabela 1. Porównanie metod monitoringu temperatury.

Porównanie metod monitoringu temperatury			
przewodowe	beprzewodowe	podczerwień	technologia SAW
ingeruje w konstrukcję	nie ingeruje w konstrukcję	nie ingeruje w konstrukcję	nie ingeruje w konstrukcję
monitoring ciągły – czas rzeczywisty	monitoring ciągły – czas rzeczywisty	brak monitoringu ciągłego	monitoring ciągły – czas rzeczywisty
zagrożenie łukiem w przypadku stosowania przewodów miedzianych	izolowane elektrycznie i	izolowane elektrycznie	beprzewodowe czujniki, izolowane elektrycznie
podwyższone ryzyko powstania wyładowań wzdłuż światłowodu	beprzewodowe czujniki zasilane aktywnymi bateriami	kosztowne oprzyrządowanie pomiarowe, wymaga dobrego pola widzenia	technologia pasywna
Wymagane zasilanie przewodowe lub bateryjne	wymagana okresowa wymiana baterii	wymagane zasilanie przewodowe lub bateryjne	czujniki zasilane bez użycia baterii
konieczność wyłączenia monitorowanych obwodów podczas konserwacji	konieczność wyłączenia monitorowanych obwodów podczas konserwacji	zabrudzenia powodują problemy z pomiarem, konieczność okresowej konserwacji ukł. optycznych	technologia Plug&Play nie wymagająca wyłączeń przy konserwacji

Technologia SAW jest odpowiednim rozwiązaniem problemu monitoringu i diagnostyki w trudnych warunkach otoczenia (np. dostęp, napięcie elektryczne). Obecnie prowadzone są badania nad zwiększeniem możliwości pomiaru temperatur nawet do 1000°C. Badania obejmują nowe rozwiązania konstrukcyjne czujników oraz nowe rodzaje podłoży krystalicznych na bazie GaPO₄, AlN, GaP oraz langasytu La₃Ga₅SO₁₄.

W artykule przedstawiona została nowoczesna metoda diagnostyki temperaturowej torów prądowych w rozdzielni elektrycznych. Monitorowanie stanu termicznego szynoprzewodów pozwala wykryć usterki montażowe i inne anomalie występujące w układzie przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Ograniczeniem proponowanej technologii jest niewielki kilkumetrowy zasięg radiowy oraz wrażliwość na zakłócenia od zewnętrznych pól elektromagnetycznych występujących w pobliżu szyn prądowych, powodujących tłumienie sygnału radiowego z rezonatora. Jednak pasywny system czujników temperatury wykorzystujących technologię SAW umożliwia ciągły monitoring temperatury pracy punktów krytycznych rozdzielni co znacznie ułatwia diagnostykę stanu termicznego szyn i poprawia stan bezpieczeństwa obsługi systemu elektroenergetycznego obiektu.

Autorzy: mgr inż. Bogdan Perka, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Email: bogdan.perka@wat.edu.pl; dr inż. Marek Suproniuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Email: marek.suproniuk@wat.edu.pl; mgr inż. Karol Piwowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Email: karol.piwowski@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Li F., Xiang D., Chiang S., Tittmann B. R., Searfass C., Wireless Surface Acoustic Wave Radio Frequency Identification (SAW-RFID) Sensor System for Temperature and Strain Measurements, 2011 IEEE International

- Ultrasonics Symposium Proceedings*, 0.1109/ULTSYM.2001.0201, 822-825
- [2] Kalinin W, Passive Wireless Strain and Temperature Sensors Based on SAW Devices, T3A.1 2004 IEEE, 187-190
- [3] Aubert T., Elmazaria O., Assour M.B., Wireless and batteryless Surface Acoustic Wave sensors for high temperature Environments, *ICEMI'2009 The Ninth International Conference on Electronic Measurements & Instruments* IEEE2009, 2-890 – 2-898
- [4] Saitoh A., Nomura T., Wireless sensor system using Surface Acoustic Wave devices, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2359-2362
- [5] Nowek A., Wykorzystanie zjawiska powierzchniowej fali akustycznej w aplikacjach systemów mikroprzepływowych – przegląd rozwiązań, *Materiały elektroniczne*, T.41, Nr 4/2013, 27-33
- [6] Avramescu V., Bostan C., Serban B., Georgescu I., Costea S., Varachiu N., Cobianu C., Surface Acoustic Wave Devices And Their Sensing Capabilities, 2009 IEEE, 27-36
- [7] Simko M., Sebok M., Chupac M., Korneciak D., Gutten M., Piotrowska K., Żukowski P., Kołtunowicz T. N., The delay line with a surface acoustic wave for an oscillator of electric signals in some sensors, *Przegląd Elektrotechniczny*, (94) 2018, Nr 3, 193-196
- [8] Simko M., Chupac M., The theory of asymmetrical delay line with the surface acoustic wave for non-electric sensors, *Przegląd Elektrotechniczny*, (95) 2019, Nr 1, 182-185
- [9] Simko M., Gutten M., Chupac M., Korenciak D., The application of the theory of synthesis of a delay line with a surface acoustic wave for a single-mode oscillator of electric signals in signal in some sensors of nonelectrical quantities, *Polish Academy of Science Metrology and Measurement System* Vol. 24 (2017), No 3, 563-576
- [10] Pawłowski M., Suproniuk M.: The effect of model adequacy error of the correlation method for studies of defect centres photoinduced transient spectroscopy, *Przegląd Elektrotechniczny*, Volume 87, Issue 10, 2011, Pages 230-235
- [11] Suproniuk M., Kamiński P., Miczuga M., Pawłowski M., Kozłowski R., An intelligent measurement system for diagnostic of semi-insulating materials by photoinduced transient spectroscopy, *Przegląd Elektrotechniczny*, volume 85, Issue 11, 2009, Pages 93-98