

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

## Materiały inteligentne - oraz zabudowane na nich systemy zespolone (ang. smart embedded systems) do zastosowania w lotnictwie

### Smart embedded systems based on intelligent materials

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Lotnictwa w Warszawie, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska

### Wyniki badań Results

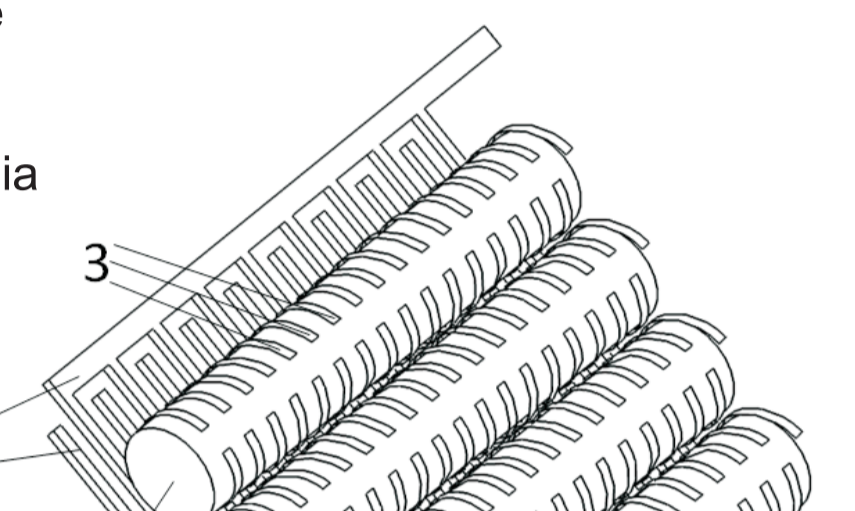
**Opracowanie technologii wytwarzania materiałów kompozytowych bazujących na piezo-włóknach**  
Development of technology for production of composite materials based on piezo-fibers

#### Nowy rodzaj czujnika piezoelektrycznego New design of piezoelectric sensor

Nowy rodzaj elektrod na piezo włóknach, pozwala na szybkie i naniesienie warstwy elektrod z zachowaniem powtarzalności odstępu między elektrodami przeciwnych znaków

A new design of electrodes on the piezoelectric fibers allows for quick layers application while maintaining repeatability electrode spacing between the electrodes opposite signs

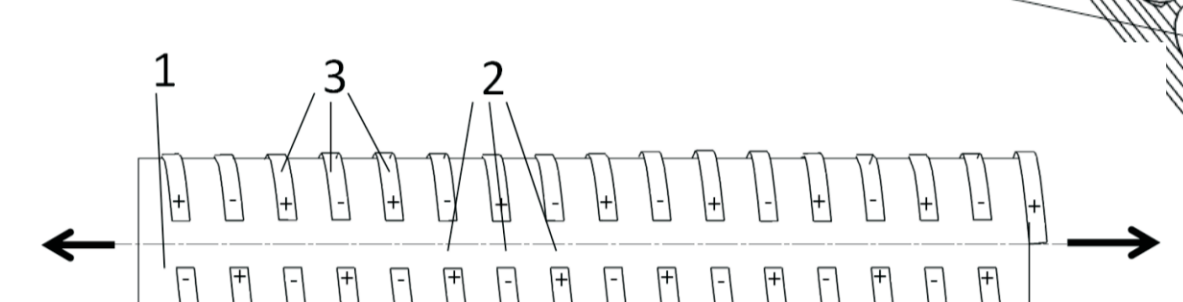
- 1 - Włókna piezoelektryczne okrągłe
- 2 - Usunięte części elektrody
- 3 - Elektrody spiralne
- 4 - Elektrody naprzemiennie zbierania



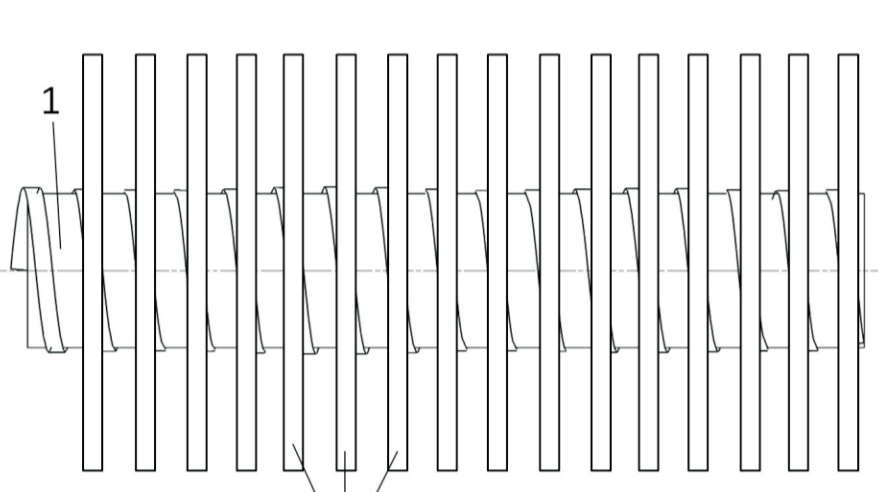
- 1 - piezoelectric round fibers
- 2 - removed part of electrode
- 3 - spiral electrodes
- 4 - interdigitated collecting electrodes

Rys.1. Poglądowy widok na czujnik z nowym układem elektrod

Fig.1. Schematic view of the sensor with a new design of electrodes



Rys.2. Widok z góry na pojedyncze włókno  
Fig.2. top view on single piezo fiber



Rys.3. Widok z dołu na pojedyncze włókno z fragmentami elektrod zbierających  
Fig.3. top view on single piezo fiber with part of collecting electrodes

Zgłoszenie w Urzędzie Patentowym RP pod numerem: P.409809  
The application in the Patent Office under number: P.409809

#### Cechy elektrod spiralnych i sposób ich wykonania Spiral electrodes description and manufacturing

- elektrody wykonywane w prostych i niewymagających kosztownej aparatury operacjach
- nie wymagane precyzyjne i kosztowne maski
- powtarzalność odstępu między elektrodami

- electrodes made simple and do not require expensive equipment operations
- does not require precise and expensive masks
- repeatability spacing between electrodes

- Sposób wykonania**
- na piezowłókno pokryte w całości materiałem z jakiego będą wykonane elektrody
  - zarys linii śrubowej naniesiony farbą na tokarce z posuwem liniowym
  - nie pomalowana część elektrod poddana trawieniu, w następnej operacji trawienia usuwane fragmenty linii śrubowej, aby powstały niepołączone ze sobą elektrody przeciwnych znaków
  - elektrody zbierające wykonane z metalu naniesionego na podkład poliimidowy
  - elektrody zbierające łączone z włóknami za pomocą mikrogrzewarki

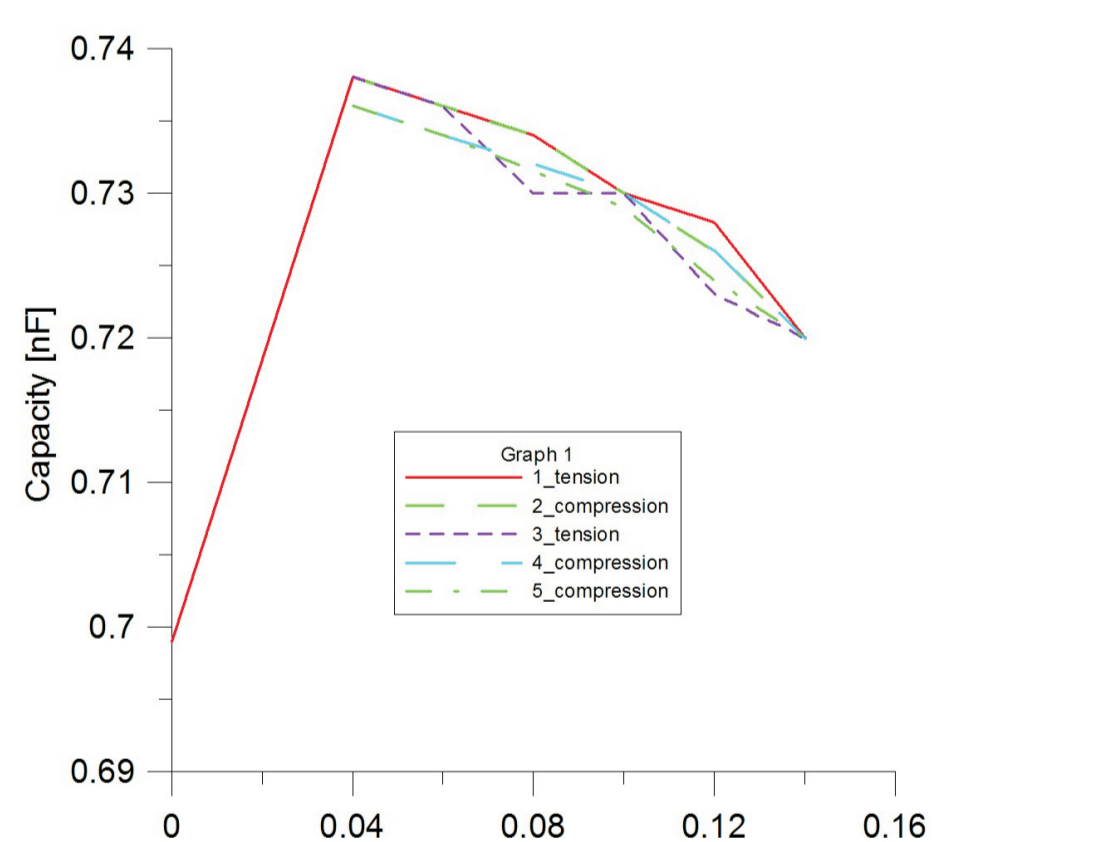
- Manufacturing**
- piezo fiber fully covered material from which the electrodes are made,
  - outline helix paint applied on a turning machine with the linear feed
  - unpainted portion of the electrodes subjected to the digestion, the next etching deleted portion of the helix to rise up unattached to each opposite signs electrode
  - collecting electrodes made of metal applied to a polyimide base
  - collecting electrodes connected to the fibers by micro bonding machine

### Podsumowanie Summary

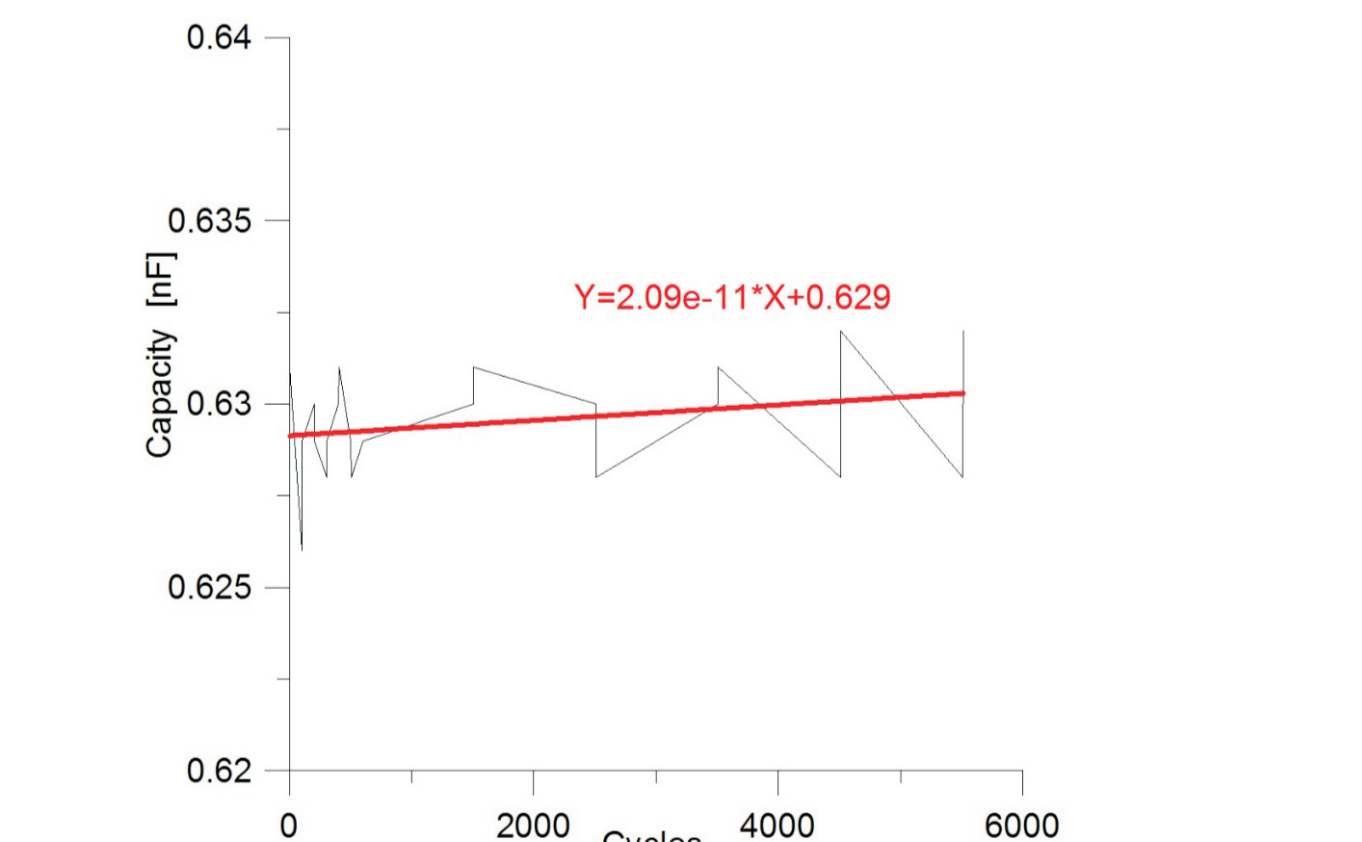
- konieczność dokładnego przebadania fizycznych modeli czujnika
- nowa konstrukcja pozwala na budowę tańszych czujników, bez naruszania obowiązujących praw patentowych

- the need for an accurate testing physical models of the sensor
- new design allows you to build a cheaper sensors, without violating existing patent rights

#### Detekcja uszkodzenia czujnika piezo Piezo sensor failure detection



Rys.4. Wartość pojemności w zależności od odkształceń  
Fig.4. Capacity - strain relationship



Rys.5. Pojemność w zależności od ilości cykli  
Fig.5. Capacity in LCF testing

- Zależność pojemności piezoczuwnika od stanu obciążenia
- The dependence of the piezo sensor capacity of the load

- Różnice w pomiarach mniejsze niż 2%
- Brak związku między pojemnością czujnika, a ilością cykli
- Differences in measurements are less than 2%
- No connection between the capacity of the sensor and the number of cycles

### Wnioski Conclusions

- metoda może być używana do detekcji uszkodzeń czujnika
- metoda nie jest rozstrzygająca jeśli pomiary są przeprowadzane przy niejednakowych wartościach odkształceń
- trudności z porównaniem wyników dla różnych stanów obciążenia
- wymagana dokładna aparatura pomiarowa do pomiarów pojemności

- method can be applied to determinate damage of piezosensor
- method is not conclusive if the measurements are performed at different strain levels
- difficulties in comparison of measurements taken in different load condition
- Measuring apparatus with higher accuracy required for measuring capacity

#### Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

Czujnik odkształceń poszycia. Strain sensor.  
Aktywny tłumik drgań. Active vibration dumper.

#### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

#### Prace mgr, dr, hab., Prace doktorskie

- Michał Kalkowski "Delamination in structural composite waveguides" Promotor: Dr Emiliano Rustighi, Dr Timothy Waters. Obrońca 20.11.2014.
- Witold Rządowski "Badanie stanu odkształceń materiałów kompozytowych z zastosowaniem czujników piezoelektrycznych". Przewód doktorski otwarty w listopadzie 2012.

#### Prace magisterskie

- Tomasz Bońkowski "Badania eksperymentalne właściwości mechanicznych i elektrycznych czujników MFC". Praca magisterska obroniona.

#### Wnioski i zgłoszenia patentowe

- wniosek nr P.409809 - Sposób wytwarzania czujnika piezoelektrycznego i czujnik piezoelektryczny

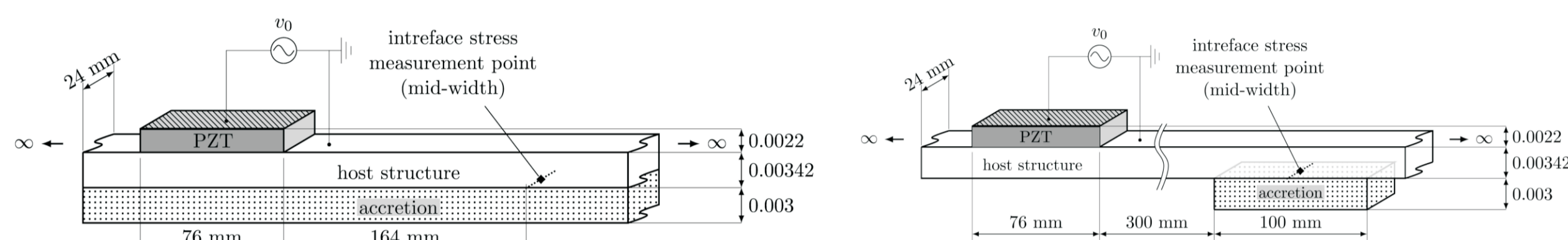
### Wyniki badań Results

**Analiza możliwości wykorzystania fal ultradźwiękowych do usuwania niepożądanych warstw osadzających się na strukturze (np. oblodzenie)**

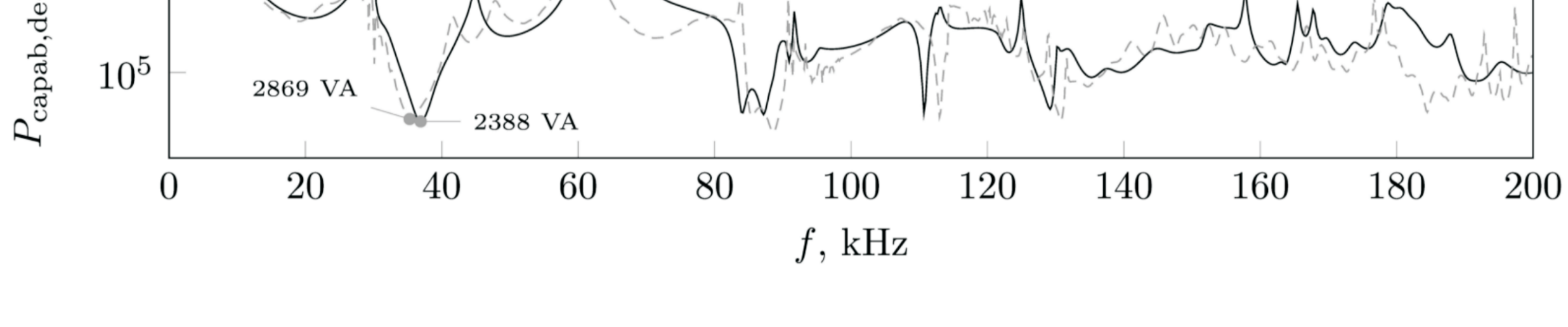
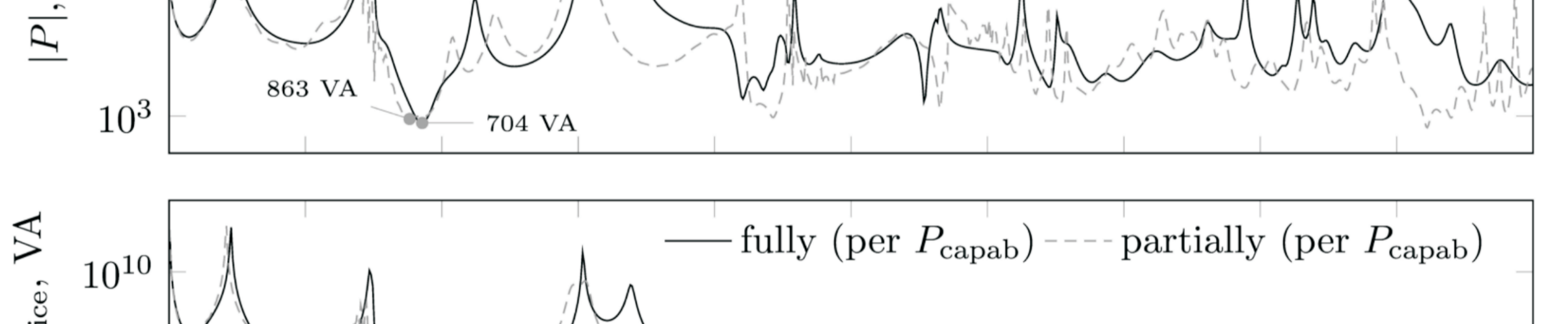
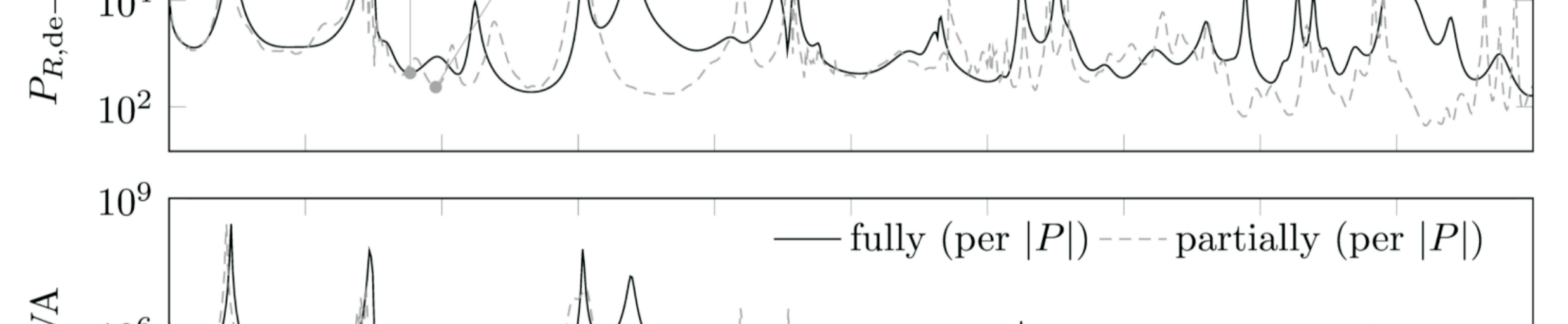
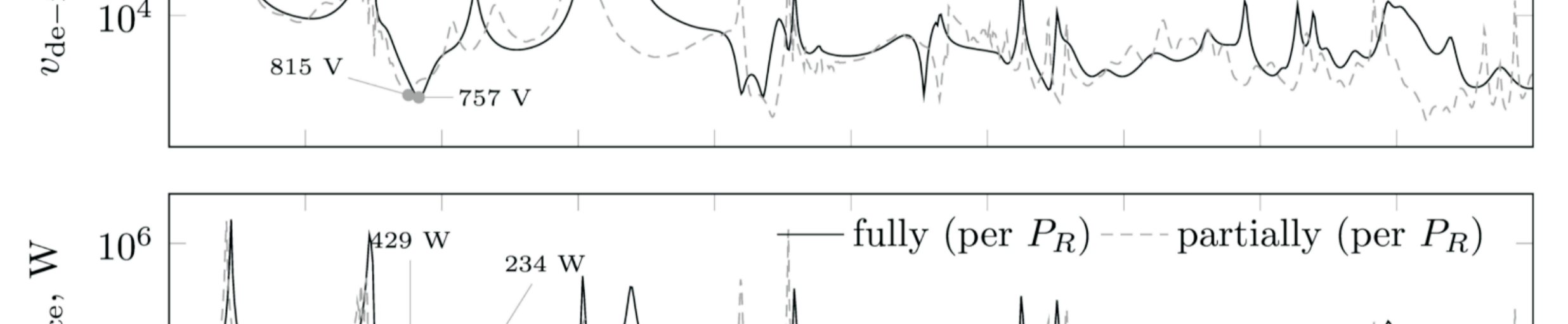
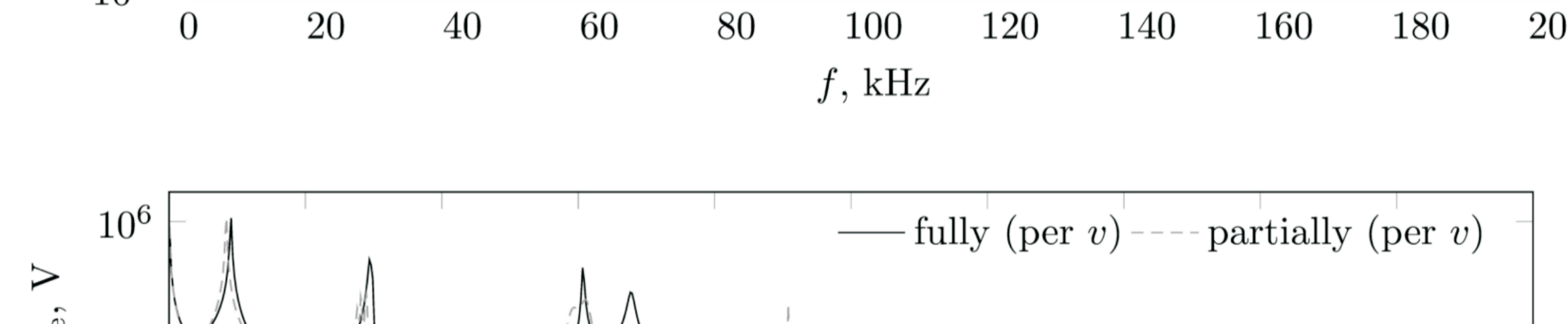
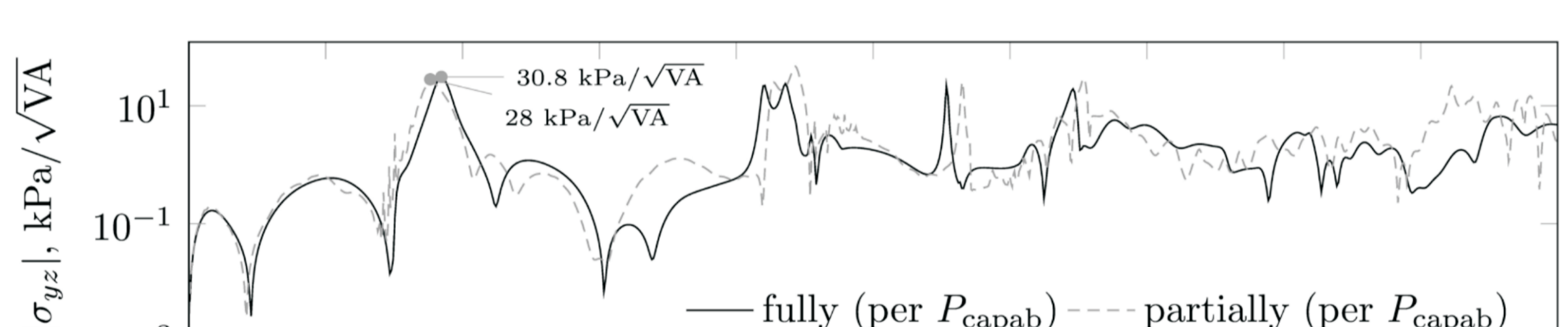
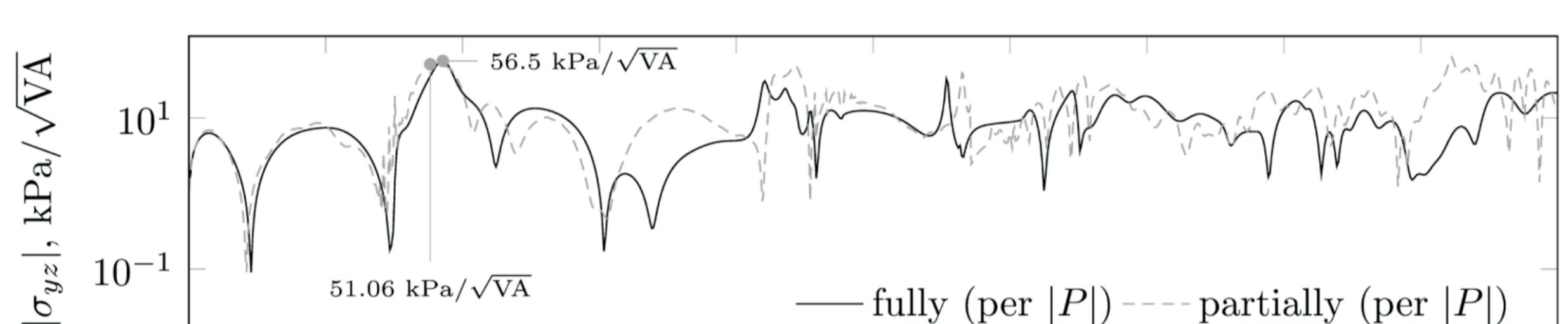
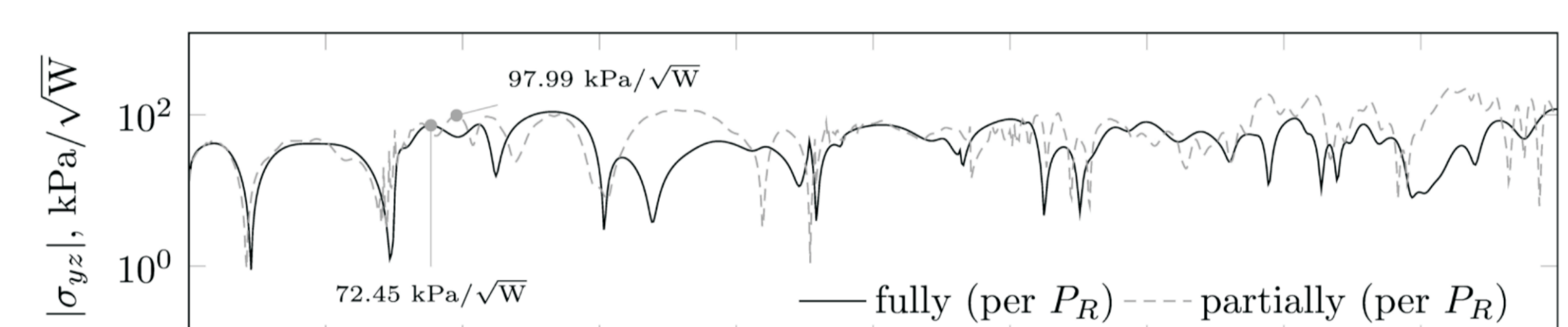
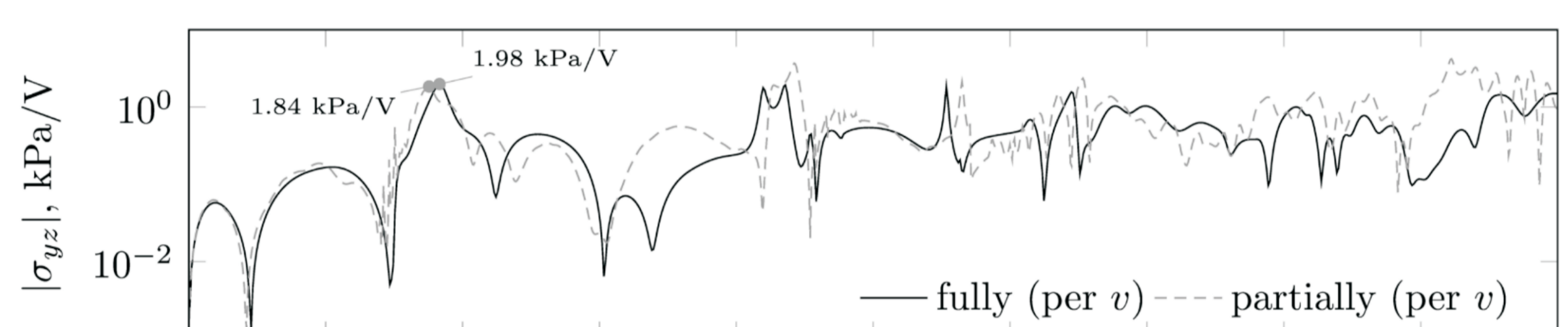
The general research aim is to investigate the feasibility of the ultrasonic de-icing

#### 1. Analiza wpływu rozległości warstwy nadbudowanej na naprężenia międzywarstwowe generowane przy pomocy fal strukturalnych

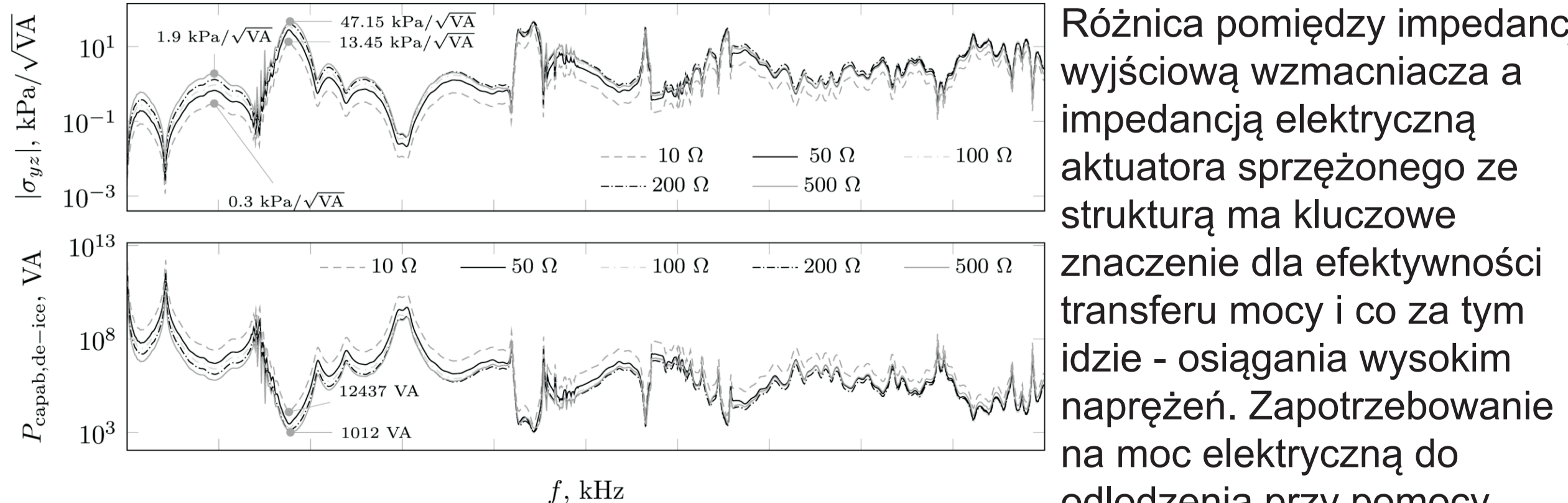
##### The influence of the area of the accretion on the interface shear stress associated with piezo-actuated structural waves



Rys. 1. Konfiguracje struktur użytych w porównaniu symulacyjnym przypadku pełnego oraz częściowego pokrycia struktury belkowej warstwą oblodzenia szklistego  
Fig. 1. Structural configuration for simulations of interface shear stress in a beam-like waveguide fully and partially covered with glaze ice accretion



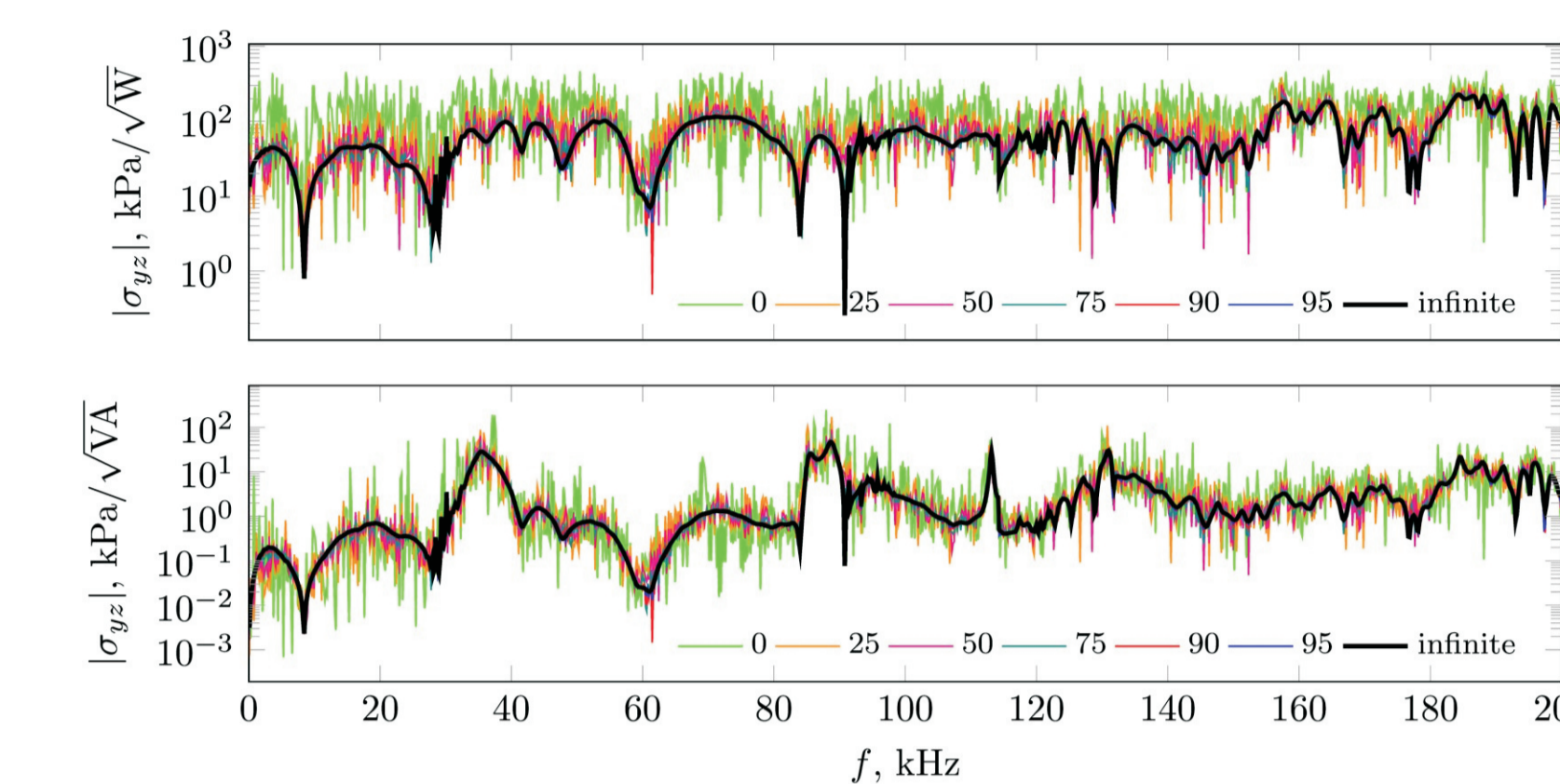
Rys. 2. Porównanie osiągalnych naprężeń międzywarstwowych (z lewej) oraz przewidywanego zapotrzebowania mocy elektrycznej do usunięcia oblodzenia (z prawej) przy pomocy propagującej fali dła struktury całkowicie lub częściowo pokrytej oblodzeniem (założona wytrzymałość wiązania lod-struktura 1.5 MPa).  
Fig. 2. Comparison of achievable interface shear stress (on the left) and power requirements (on the right) for wave-based de-icing of a waveguide (as used in the experiment) either fully or partially covered with 3 mm glaze ice accretion (assuming 1.5 MPa ice-structure bond strength).



Rys. 3. Wpływ impedancji wyjściowej wzmacniacza na naprężenia międzywarstwowe osiągane w strukturze belkowej częściowo pokrytej 3 mm oblodzeniem szklistym oraz moc wzmacniacza wymagana dla skutecznego odlodzenia.  
Fig. 3. The influence of the driving source output impedance on the generated interface shear stress in a beam-like waveguide partially covered with 3 mm glaze ice accretion and required driving source power capability for de-icing.

#### 2. Analiza wpływu warunków brzegowych na naprężenia międzywarstwowe generowane przy pomocy fal strukturalnych

##### The influence of the absorption at the boundaries on the interface shear stress associated with piezo-actuated structural waves



Rys. 4. Naprężenia międzywarstwowe generowane przez fale wzbudzone akuatorem PZT w strukturze z warunkami brzegowymi o różnym współczynniku absorpcji.  
Fig. 4. PZT induced interface shear stress in a waveguide with artificial boundary conditions; the values for the absorption coefficient are denoted in the legend.

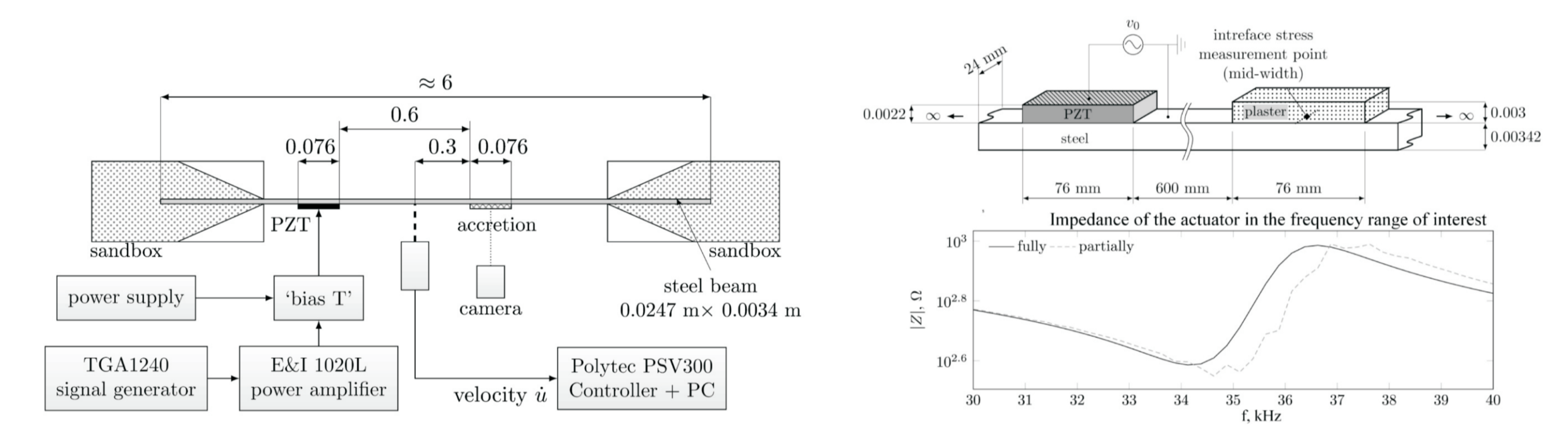
absorption at the ends	infinite (100%)	95%	90%	75%	50%	25%	0%
$\sigma_{yz} / \sqrt{P_{cap}}$ in kPa / $\sqrt{VA}$	96.7	102.8	107.8	124.4	163.2	198.8	500.7
$\sigma_{yz} / \sqrt{P_{cap}}$ in kPa / $\sqrt{VA}$	28.3	30.4	33.2	43.1	64.3	87.4	188.2
$P_{cap,abs}$ in W	240.6	213	194	145	85	57	9
$P_{cap,abs}$ in VA	2805	2431	2046	1212	545	294	64

Tab. 1. Maksymalne naprężenia międzywarstwowe osiągalne pomiędzy 30 a 40 kHz w strukturze belkowej częściowo pokrytej oblodzeniem szklistym dla różnych wartości współczynnika absorpcji w warunkach brzegowych.  
Tab. 1. The maximum interface shear stress achieved between 30 kHz and 40 kHz for the beam partially covered with glaze ice for different levels of wave absorption at the boundaries.

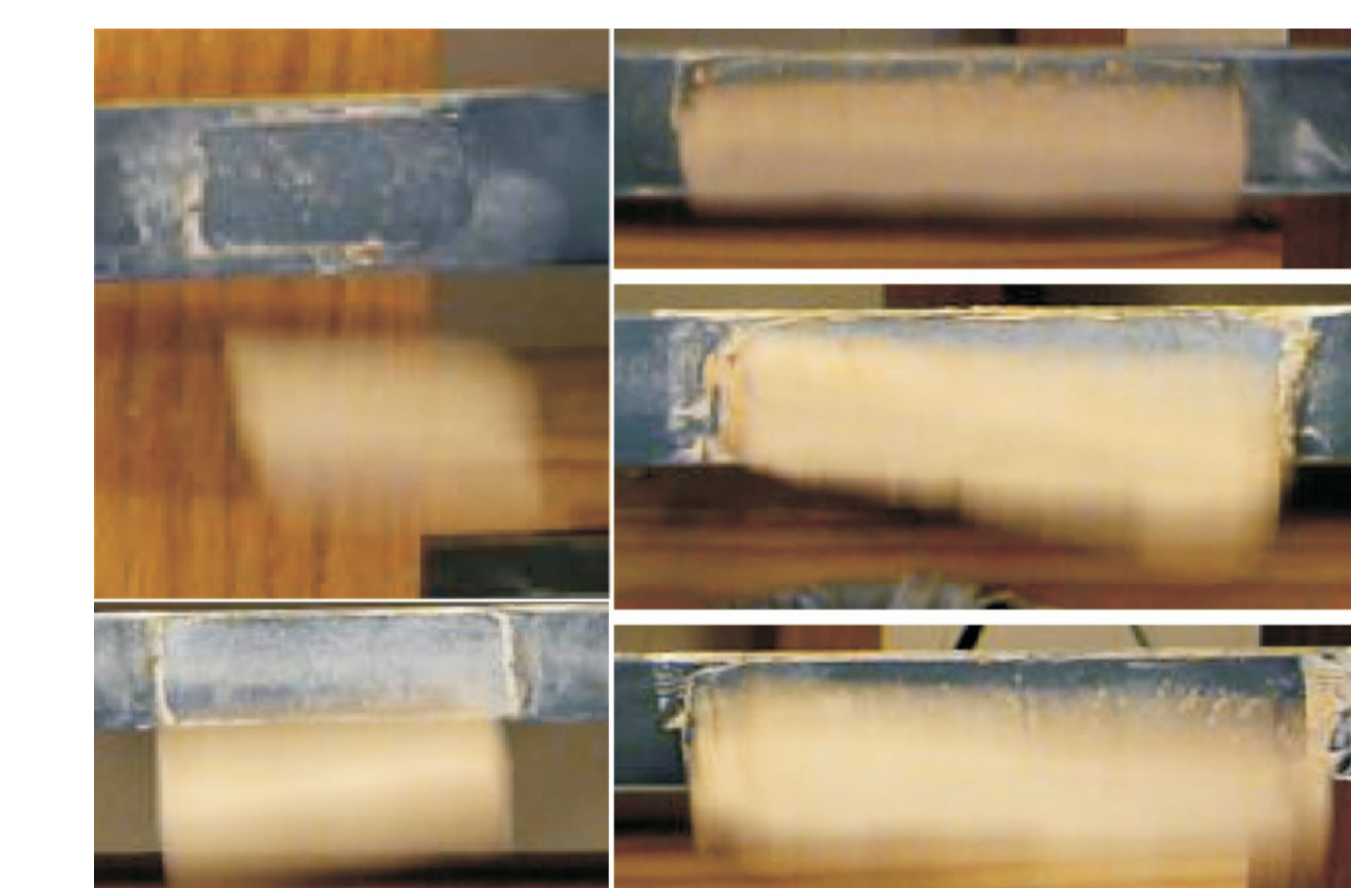
#### 3. Przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentów usuwania modelowych osadzeń na strukturze belkowej z emulowanymi nieskończonymi warunkami brzegowymi przy pomocy fal strukturalnych wzbudzanych akuatorem piezoelektrycznym

##### Experimental demonstration of the wave-based removal of model accretions from a beam-like waveguide with emulated anechoic terminations

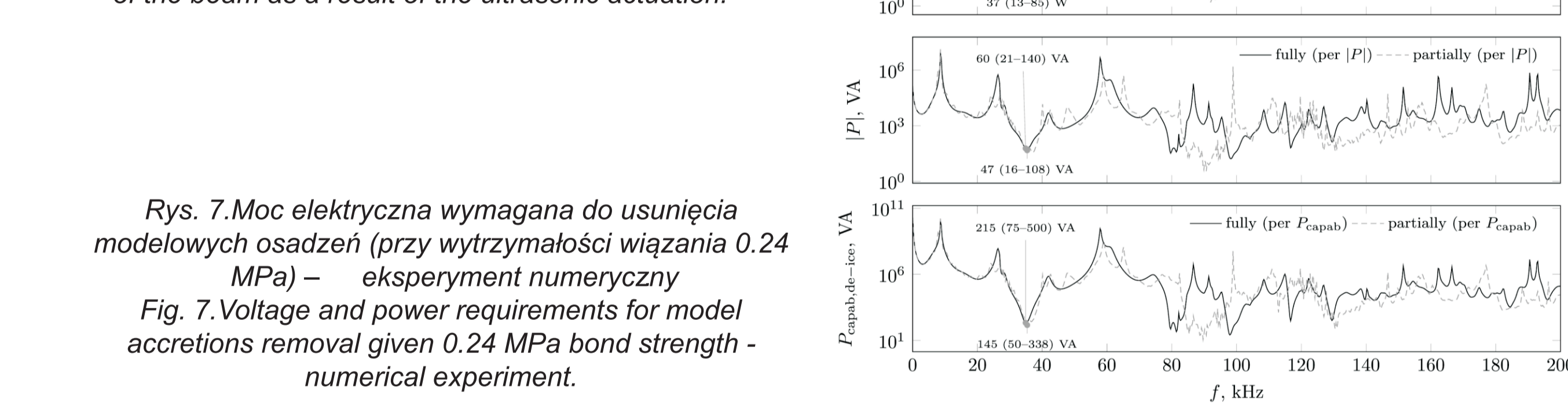
Impedance of the actuator in the frequency range of interest



Rys. 5. Schemat stanowiska do demonstracji koncepcji usuwania niepożądanych osadzeń przy pomocy fal strukturalnych wzbudzanych akuatorem PZT.  
Fig. 5. Experimental setup for the demonstration of concept of unwanted accretion removal with piezo-actuated structural waves.



Rys. 6. Przykładowe klatki wideo obrazujące moment przerwania wiązania struktura-osadzenie za pomocą fal strukturalnych.  
Fig. 6. Video snapshots showing the plaster patches falling of the beam as a result of the ultrasonic actuation.



Rys. 7. Moc elektryczna wymagana do usunięcia modelowych osadzeń (przy wytrzymałości wiązania 0.24 MPa) - eksperyment numeryczny.  
Fig. 7. Voltage and power requirements for model accretions removal given 0.24 MPa bond strength - numerical experiment.

#### Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

projektowanie systemów odlodzeniowych dla struktur lotniczych  
design of ultrasonic de-icing systems for aircraft structures

### Wnioski Conclusions

- opracowany model falowy wykorzystano do predykcji naprężeń międzywarstwowych w strukturach całkowicie i częściowo pokrytych oblodzeniem. Przedstawiono również znaczenie dopasowania impedancji źródła do zależnej od częstotliwości zespolonej impedancji układu akuator-struktura dla efektywności wymuszenia i wartości wzbudzanych naprężeń.
- wskazano wpływ malejącego współczynnika absorpcji na granicach struktury na wartość osiągalnych naprężeń międzywarstwowych.
- przygotowano i przeprowadzono udaną demonstrację koncepcji usuwania niepożądanych osadzeń przy pomocy fal strukturalnych wzbudzanych akuatorem piezoelektrycznym. Predykcje z eksperymentów numerycznych są w dobrej zgodności z obserwowanym poborem mocy podczas udanych prób laboratoryjnych, co dodatkowo potwierdza użyteczność opracowanej metodologii modelowania.
- the developed wave model was used for predicting interface shear stress in waveguides both partially and fully covered by accretions. The effect of impedance mismatch between the driving source and the actuator on the efficiency of power transfer was highlighted,
- the influence of residual reflections was analysed indicating their contribution to diminishing power requirements for de-icing,
- finally, a demonstration experiment was designed and conducted. Model accretions were successfully removed from a waveguide with emulated anechoic terminations using piezo-actuated structural waves. The observed power requirements were in good agreement with the predictions from numerical experiments.