

# **ZAŁĄCZNIK 3**

## **AUTOREFERAT PRZEDSTAWIAJĄCY OPIS DOROBKU ORAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH (W JĘZYKU POLSKIM)**

**1. Imię i nazwisko:** Paweł Żyłka**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:**

- Master of Science (M. Sc.) degree in Instrumental Analytical Chemistry for Environmental Monitoring and Process Quality Assurance with Distinction, Glasgow Caledonian University (Glasgow, Szkocja), 1995 (kopia dyplomu w Załączniku 9);
- magister inżynier inżynierii materiałowej, Politechnika Wrocławska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, 1996 (kopia dyplomu w Załączniku 9);
- doktor nauk technicznych, dyscyplina: Elektrotechnika, Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej, 2002, rozprawa: *Diagnozowanie uszkodzeń izolacji olejowej transformatorów z wykorzystaniem czujników gazów*, promotor prof. dr hab. inż. Bolesław Mazurek, recenzenci: prof. dr hab. inż. Hanna Mościcka-Grzesiak (Politechnika Poznańska), prof. dr hab. inż. Jerzy Skubis (Politechnika Opolska) (kopia dyplomu w Załączniku 1).

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:**

- od 2004: adiunkt naukowo-dydaktyczny w Katedrze (poprzednio Instytucie) Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej;
- od 1996 do 2004: asystent naukowo-dydaktyczny w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej;
- od 2001 do 2004: starszy specjalista naukowo-techniczny w Instytucie Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego we Wrocławiu.

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):****a) tytuł osiągnięcia naukowego:**

*Materiały i rozwiązania biomimetyczne w inżynierii elektrycznej – zagadnienia wybrane.*

**b) autor/autorzy, tytuł publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa:**

Podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika jest wymieniony poniżej cykl 15 publikacji\* powiązanych tematycznie (w nawiasach podano współczynnik Impact Factor IF z roku publikacji, wyznaczony na podstawie danych z serwisu JCR <https://jcr.incites.thomsonreuters.com>):

- C1. Adam Skopec, Leszek Moroń, Paweł Żyłka: *Time-domain temperature variations of a composite insulator surface exposed to arc discharges*. „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation”, 2004, vol. 11, iss. 2, pp. 369–377 (IF=0,872).
- C2. Paweł Żyłka: *Elastomery silikonowe o zwiększonej hydrofobowości uzyskiwane z mikrotrawionych matryc Si i Al*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2013, R. 89, nr 7, s. 327–329 (brak IF).
- C3. Paweł Żyłka, Leszek Moroń: *Akrylowe i silikonowe materiały dielektryczne o biomorficznej mikrostrukturze powierzchni*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2010, R. 86, nr 5, s. 279–282 (IF=0,242).
- C4. Paweł Żyłka: *Superhydrofobowość i jej utrata na przykładzie elastomerów silikonowych o biomimetycznej powierzchni*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2012, R. 88, nr 5a, s. 128–131 (brak IF).

---

\* oświadczenia wszystkich współautorów publikacji wieloautorских, określające indywidualny wkład każdego z nich w ich powstanie, przedstawiono w Załączniku 8.

- C5. Paweł Żyłka: *On the surface performance of superhydrophobic silicone rubber specimens fabricated by direct replica method*. „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation”, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 1183–1188 (IF=1,278).
- C6. Paweł Żyłka: *Biomimetic surface-conducting silicone rubber obtained by physical deposition of MWCNT*. „Smart Materials & Structures”, 2015, vol. 24, no. 6, pp. 1–12 (IF=2,769).
- C7. Paweł Żyłka: *Nanorurki węglowe i kompozyty guma silikonowa-CNT jako materiały elektrodowe dla techniki polimerów elektroaktywnych*. „Przegląd Elektro-techniczny”, 2010, R. 86, nr 2, s. 39–41 (IF=0,242).
- C8. Paweł Żyłka, Joanna Koprowska: *Attempt to apply surface-conductive PAN as a precursor for aPAN ionic electroactive polymer gel fabrication*. „Fibres & Textiles in Eastern Europe”, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 29–33 (IF=0,626).
- C9. Przemysław Kołodziej, Paweł Żyłka: *Experimental research of the adaptive building envelope (ABE)*. Proc. IASS 2013 Symposium „Beyond the limits of man”, 23-27 September 2013, Wrocław, Poland (eds. Jan Obrębski and Romuald Tarczewski), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2013. s. 1–4 (brak IF).
- C10. Paweł Żyłka, Paweł Janus: *Applicability of MEMS cantilever micro-dilatometer for direct transverse strain monitoring in electroactive polymers*. „Sensors and Actuators A-Physical”, 2010, vol. 163, no. 1, pp. 111-117 (IF=1,941).
- C11. Ryszard Kacprzyk, Paweł Żyłka: *Electrification of aerosol particles in supersonic atomizers*. „IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation”, 2011, vol. 18, no. 5, pp. 1353–1360 (IF=1,094).
- C12. Paweł Żyłka, Ryszard Kacprzyk: *Badanie skuteczności elektryzacji w naddźwiękowych głowicach elektro-aerolowych*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2010, R. 86, nr 11b, s. 9–12 (IF=0,242).
- C13. Ryszard Kacprzyk, Paweł Żyłka: *Indukcyjne ładowanie cząstek aerozolu wytwarzanego w naddźwiękowej głowicy rozpylającej*. „Przegląd Elektro-techniczny”, 2010, R. 86, nr 7, s. 142–144 (IF=0,242).
- C14. Ryszard Kacprzyk, Paweł Żyłka: *Wytwarzanie elektro-aeroli w naddźwiękowych głowicach rozpylających*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2010, R. 86, nr 11 b, s. 233–236 (IF=0,242).
- C15. Paweł Żyłka, Paweł Modrzyński, Paweł Janus: *Vortex anemometer using MEMS cantilever sensor*. „Journal of Microelectromechanical Systems”, 2010, vol. 19, no. 6, pp. 1485–1489 (IF=2,157).

Kopie wszystkich artykułów cyklu [C1–C15] przedstawiono w Załączniku 7. Indywidualny wkład habilitanta w autorstwo prac cyklu przedstawiono w tabeli 1 na podstawie sygnowanych oświadczeń współautorów, których potwierdzone kopie zawarto w Załączniku 8.

Tabela 1. Zestawienie wartości Impact Factor, procentowego udziału habilitanta w publikacji oraz liczby cytowań pozycji [C1-C15] cyklu

Pozycja cyklu	Impact Factor IF	Udział habilitanta w publikacji (wg oświadczeń współautorów)	IF cząstkowy **	Liczba cytowań (bez autocytowań) według bazy		
				Web of Science	Scopus	Google Scholar
C1	0,872	50 %	0,436	2	4	6
C2	–	100 %	–	–	–	–
C3	0,242	90 %	0,218	–	2	–
C4	–	100 %	–	1	2	1

C5	1,278	100 %	1,278	9	8	9
C6	2,769	100 %	2,769	1	2	2
C7	0,242	100 %	0,242	2	2	1
C8	0,626	90 %	0,563	–	–	–
C9	–	50 %	–	–	–	–
C10	1,941	75 %	1,456	2	4	3
C11	1,094	40 %	0,438	1	3	3
C12	0,242	50 %	0,121	–	–	–
C13	0,242	50 %	0,121	–	–	–
C14	0,242	60 %	0,145	–	–	–
C15	2,157	70 %	1,510	8	8	11

\*\* Impact Factor uwzględniający procentowy udział habilitanta w publikacji.

### **Syntetyczna statystyka cyklu publikacji [C1-C15] (bez autocytowań):**

- sumaryczny IF: **11,947**;
- sumaryczny IF uwzględniający procentowy udział habilitanta (na podstawie oświadczeń współautorów wg Załącznika 8): **9,297**;
- łączna liczba cytowań wg serwisu Web of Science: **26**;
- łączna liczba cytowań wg serwisu Scopus: **35**;
- łączna liczba cytowań wg serwisu Google Scholar: **36**.

### **Syntetyczna statystyka dorobku naukowego habilitanta (po uzyskaniu doktoratu):**

- łączna liczba cytowań publikacji habilitanta wg serwisu Web of Science: **48**;
- łączna liczba cytowań publikacji habilitanta wg serwisu Scopus: **61**;
- łączna liczba cytowań publikacji habilitanta wg Google Scholar: **94**  
(źródło: <https://scholar.google.pl/citations?user=4NtWBUQAAAAJ&hl=en>);
- indeks Hirscha wg serwisu Web of Science: **4**;
- indeks Hirscha wg serwisu Scopus: **4**;
- indeks Hirscha wg Google Scholar: **4** (od 2013),  
(źródło: <https://scholar.google.pl/citations?user=4NtWBUQAAAAJ&hl=en>).

### **c) omówienie celu naukowego cyklu powiązanych tematycznie publikacji oraz osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:**

Celem cyklu powiązanych tematycznie publikacji [C1–C15] pod zbiorczym tytułem *Materiały i rozwiązania biomimetyczne w inżynierii elektrycznej – zagadnienia wybrane* jest przedstawienie wkładu naukowego habilitanta w wykorzystanie inżynierii bionicznej – czyli rozwiązań oraz inspiracji zaczerpniętych z natury – w szeroko rozumianej inżynierii elektrycznej, w tym w szczególności w inżynierii wysokich napięć. W cyklu artykułów [C1–C15] przedstawiono zagadnienia, które habilitant badał naukowo po zakończeniu doktoratu.

#### **4c.1. Wstęp**

Biomimetyka, inżynieria bioniczna, bionika to – w naukowo-technicznym kontekście – pojęcia pokrewne, odnoszące się do działań naukowych i inżynierskich zmierzających do eksploatacji innowacyjnego potencjału drzemącego w naturalnych modelach biologicznych. Inżynieria bioniczna to dział nauki zajmujący się obserwacją i badaniem natury w celu jej technicznego wykorzystania przez naśladowanie budowy i funkcjonowania jej wytworów. Celem takich form działalności naukowo-inżynierskiej jest poznanie praw i zasad rządzących działaniem rozwiązań biologicznych i ich techniczne wykorzystanie. A to z kolei pozwala na tworzenie nowych rozwiązań, procesów, lepszych materiałów i sprawniejszych maszyn, dzięki zaawansowanym – doskonalonym poprzez wieki ewolucji – wzorcom.

Natura była i jest dla człowieka nie tylko źródłem wiedzy, którą odkrywa, ale również prawdziwą skarbnicą inspiracji prowadzących do nowych, wzorowanych na naturalnych rozwiązaniach naukowych i technicznych. Fundamentalne osiągnięcie okresu prehistorycznego sprzed ponad 790 tys. lat, czyli umiejętność rozniecenia ognia za pomocą krzesiwa, to prawdopodobnie wynik obserwacji iskier wzniesionych przez spadające ze stoku i uderzające o siebie skały. Jest to wprawdzie nieudokumentowany i tylko prawdopodobny przykład bardzo wczesnej inżynierii inspirowanej naturą. Głębsza analiza zagadnienia pokazuje, że znaczny odsetek współczesnych rozwiązań technicznych i technologicznych w różnych dziedzinach czerpie inspiracje z naturalnych modeli. Pomimo (nie zawsze świadomego) trwającego od lat wykorzystywania zarówno w sztuce, jak i nauce oraz technice wzorce biologiczne są wciąż szeroko dostępne i praktycznie nieograniczone ilościowo. Czerpiemy z nich na różnych poziomach hierarchii i komplikacji – inspiracją stają się procesy biochemiczne, budowa oraz funkcjonowanie jednokomórkowców, tkanek, organów, organizmów aż po skoordynowane zachowania i strategie całych grup czy populacji. Ponadto, niejako w tle tego bogactwa świata ożywionego, funkcjonuje powolny ewolucyjny dobór naturalny i trwa ciągła adaptacja organizmów do zmieniających się warunków środowiska. Te dwa mechanizmy również są źródłem wiedzy i inspiracji do ich naukowej eksploatacji (jak np. algorytmy genetyczne). Wraz z rozwojem naszej wiedzy rozumiemy coraz więcej, a jednak – paradoksalnie – właśnie dzięki temu coraz częściej sięgamy po wzorce biologiczne. Tysiąclecia doboru naturalnego i ewolucji stworzyły bowiem doskonałe przykłady skutecznego rozwiązywania problemów, z którymi wciąż stykamy się w różnych dziedzinach nauki i techniki.

W dalszej części autoreferatu przedstawione zostaną wyniki badań naukowych habilitanta, związanych z wybranymi zastosowaniami inżynierii bionicznej w szeroko pojmowanej inżynierii elektrycznej. Dla ułatwienia lektury wprowadzono podział tekstu autoreferatu na podrozdziały, których tytuły wyjaśniają zarówno bioniczne źródło inspiracji, jak i jego zastosowanie w inżynierii elektrycznej. Tekst uzupełniono również o poglądowe rysunki i zdjęcia (poza jednym wyjątkiem wszystkie autorstwa habilitanta), ilustrujące te zagadnienia.

#### **4c.2. Termorecepcja bodźców cieplnych i zagadnienia odwrotne w termodynamice**

Zagadnienia odwrotne poruszane w publikacji [C1] są powiązane z mechanizmem odczuwania i interpretowania bodźców cieplnych przez zwierzęta i ludzi. Termoreceptory w postaci wolnych zakończeń nerwowych są zlokalizowane w skórze właściwej, czyli na pewnej głębokości pod powierzchnią skóry. Znajdują się również w głębokich partiach mięśni, w ścianach żył, a także w rdzeniu przedłużonym i podwzgórze. Termoreceptory wytwarzają impulsy nerwowe zależne od temperatury w miejscu ich lokalizacji, nie podlegają zatem bezpośrednio działaniu rzeczywistej temperatury zewnętrznej. Impulsy te są następnie przekazywane do kory czuciowej, gdzie na ich podstawie oraz przy użyciu osobniczych doświadczeń somatosensorycznych wyznaczana jest (jak w zagadnieniach odwrotnych) odczuwana temperatura powierzchni skóry, a tym samym – pośrednio – temperatura otoczenia.

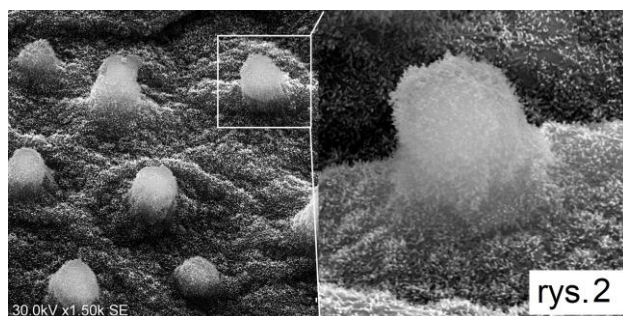
Publikacja [C1] dotyczy zastosowania zagadnienia odwrotnego do złożonego elektrotechnicznego problemu termodynamicznego, związanego z wyznaczeniem temperatury powierzchni materiału elektroizolacyjnego, nagrzewanego w wyniku wyładowań elektrycznych. Zagadnienie to jest bardzo ważne z punktu widzenia odporności wysokonapięciowych materiałów elektroizolacyjnych w warunkach długotrwałego, eksploatacyjnego narażenia na powierzchniowe wyładowania elektryczne. Bezpośrednie doświadczalne wyznaczenie rozkładu temperatury stricte na powierzchni próbki materiału ogrzewanej w ten sposób jest w zasadzie niewykonalne. Powodem tego są bardzo silne zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez wyładowania elektryczne. Dodatkowo promieniowanie termiczne powierzchni materiału jest również „przesłaniane” przez silne i szerokopasmowe promieniowanie samych wyładowań.

W rozwiązaniu tego problemu ma pomóc zaproponowany w pracy [C1] rozbudowany model matematyczno-fizyczny transportu ciepła w głąb pół-nieskończonego obiektu nagrzewanego od strony powierzchni zmiennym w czasie strumieniem ciepła. Dzięki tak opracowanemu modelowi i na podstawie znajomości przebiegów czasowych temperatury zarejestrowanych w określonych punktach w objętości materiału możliwe jest numeryczne wyznaczenie rozkładu czasowo-przestrzennego temperatury powierzchni. Model ten został następnie zweryfikowany doświadczalnie dla kompozytowych próbek epoksydowo-krzemionkowych, poddanych działaniu wysokonapięciowego, niskoprądowego łuku elektrycznego zgodnie z normą IEC 61621 (rys. 1). Opracowany model matematyczny oraz zaproponowana metodyka badań pozwalają na znacznie dokładniejsze wyznaczenie rozkładów czasowo-przestrzennych temperatur powierzchni niż metody dotychczas przedstawiane w literaturze (bazujące głównie na zmodyfikowanej metodzie Thomasa).



Z praktycznego punktu widzenia opracowana w publikacji [C1] metodyka pozwala na uzyskanie zwiększonej odporności na wyładowania powierzchniowe izolacyjnych materiałów kompozytowych w sposób inny niż klasyczny. W klasycznym podejściu jako wypełniacz stosuje się uwodniony tlenek aluminium (ATH), który podczas ogrzewania oddaje wodę, a ta parując, w efekcie obniża temperaturę materiału. Stosując jednak podejście zaprezentowane w pracy [C1] i sterując wybranymi właściwościami termokinetycznymi kompozytowego materiału elektroizolacyjnego (jak przewodność i dyfuzyjność cieplna), można uzyskać wydajne rozpraszanie energii cieplnej w objętości materiału. Prowadzi to w rezultacie do obniżenia temperatury jego powierzchni, co w bezpośredni sposób przekłada się na zwiększenie odporności materiału na wyładowania elektryczne. Takie podejście znajduje zastosowanie np. przy wytwarzaniu kompozytowych betonów polimerowych, używanych do produkcji wsporczych i przepustowych izolatorów elektroenergetycznych.

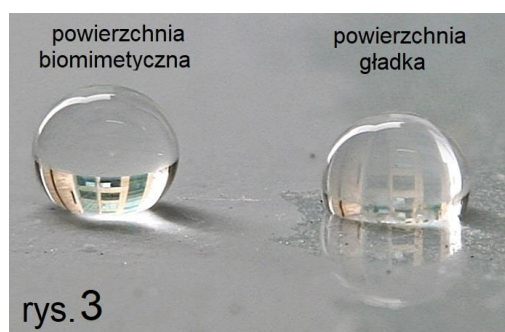
#### 4c.3. „Efekt lotosu” i elektrotechniczne materiały superhydrofobowe



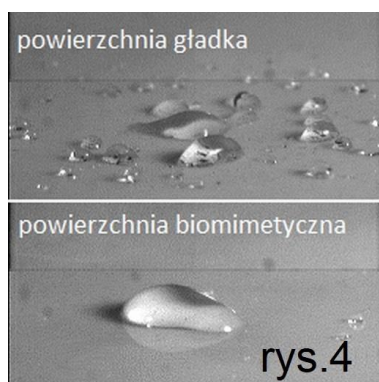
W terminologii naukowej materiał jest określany jako superhydrofobowy, gdy statyczny kąt zwilżania (CA) jego powierzchni przewyższa  $150^\circ$ , a histereza dynamicznego kąta zwilżania oraz kąt spływu są znikomo małe (rzędu kilku stopni). Zjawisko to jest często określane mianem „efektu lotosu”, wprowadzonym przez W. Barthlotta i C. Neinhuisa (1990, 1997) dla zilustrowania podstaw fizycznych superhydrofobowości i efektu samooczyszczania, zaobserwowanych na liściach lotosu orzechodajnego (łac. *Nelumbo nucifera*). Liście lotosu, pomimo wegetacji w błotnistych biotopach, nie brudzą się, gdyż zanieczyszczenia nie przywierają do ich powierzchni i są zmywane przez krople deszczu staczające się po nich w formie prawie kulistej. Istota tych zjawisk jest ściśle powiązana z mikrostrukturą powierzchni liścia lotosu. Jest ona pokryta nieregularnie rozmieszczonymi (co ok. 10–15  $\mu\text{m}$ ), stożkowatymi wybrzuszeniami o wysokości 5–10  $\mu\text{m}$ . Twory te są powleczone dodatkowo warstwą krystalicznych wosków epikutylarnych o subtelnej, submikronowej strukturze, przypominającej mech (rys. 2). Dzięki takiej dwupoziomowej, meandrycznej mikrostrukturze zwiększa się obszar dwufazowego kontaktu ciecz–gaz, a redukcji (nawet o 99 %) ulega

efektywna powierzchnia kontaktu ciecz–ciało stałe (opisuje to zmodyfikowany model zwilżania Cassie–Baxtera). W przyrodzie właściwości superhydrofobowe wykazują nie tylko liście lotosu, ale również wiele innych roślin (jak np. filantus czy brokuł) oraz ciała niektórych owadów i zwierząt (np. skrzydła motyli, pióra gołębi).

W publikacjach [C2–C5] przedstawiono zagadnienia związane z wytwarzaniem metodą repliki negatywowej elektroizolacyjnych kauczuków silikonowych o pożądanych superhydrofobowych właściwościach. W pracy [C2] wykazano doświadczalnie możliwość wykorzystania powierzchni duralowej matrycy o odpowiedniej mikrostrukturze (np. uzyskanej typową obróbką elektro-erozyjną EDM) do wytwarzania z kauczuku silikonowego LSR replik o właściwościach na



granicy superhydrofobowości (kąt CA ok.  $148^\circ$ ). Jest to wartość CA wyższa o ponad  $30^\circ$  od wartości uzyskiwanej dla typowej, gładkiej powierzchni osłony izolatora kompozytowego (CA ok.  $116^\circ$ ), wykonanej z tego samego kauczuku silikonowego LSR (rys. 3). Tak uzyskane biomimetyczne powierzchnie silikonowe wykazują jednak niewielkie pogorszenie (o ok.  $6^\circ$ ) dynamicznego zstępującego kąta zwilżania związane z brakiem prawidłowej, dwupoziomowej mikrostruktury powierzchni, jej wadami oraz niejednorodnością.



W pracy [C3] wskazano, że w przypadku biomimetycznej powierzchni gumy silikonowej LSR warunek superhydrofobowości ( $CA > 150^\circ$ ) wcale nie musi być spełniony, aby materiał ten wykazywał pozytywne cechy z punktu widzenia inżynierii wysokonapięciowej. W warunkach oddziaływania kropli deszczu podczas jej upadku nawet na powierzchnię o nieidealnych właściwościach superhydrofobowych (kąt CA ok.  $145^\circ$ ), dynamika zwilżania powierzchni jest znacznie lepsza niż w przypadku powierzchni gładkiej typowych silikonowych osłon izolatorów kompozytowych (rys. 4). Ilość kropli potomnych, wielkość obszaru pokrytego kroplami oraz

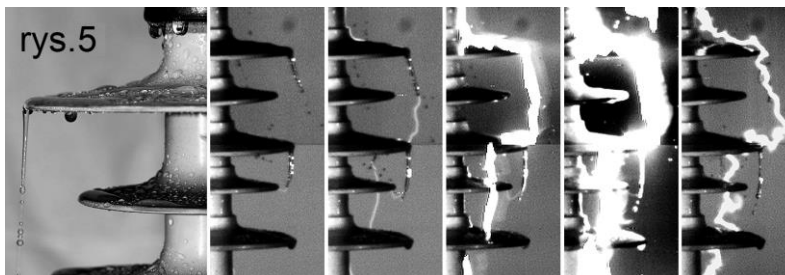
ostateczny kształt kropli w stanie ustalonym są znacznie korzystniejsza w przypadku powierzchni superhydrofobowej.

W artykule [C4] podjęto tematykę odporności biomimetycznej powierzchni kauczuku silikonowego, uzyskanej metodą repliki negatywowej, na oddziaływanie argonowej plazmy niskotemperaturowej. Taka symulacja laboratoryjna naśladuje warunki występujące np. podczas trwania na silikonowych osłonach izolatorów kompozytowych powierzchniowych wyładowań niezupełnych. Powierzchnia biomimetycznego kauczuku silikonowego LSR (wytwarzana podobnie jak w pracy [C3]) poddana działaniu modelowej, niskotemperaturowej plazmy argonowej wytwarzanej pod ciśnieniem atmosferycznym szybko staje się w zasadzie hydrofilna i dopiero po dłuższym czasie odzyskuje hydrofobowość, nie powracając jednak do początkowo obserwowanej superhydrofobowości.

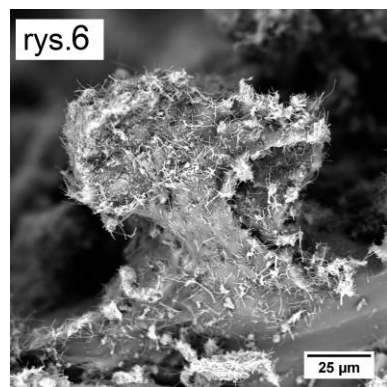
W pracy [C5], będącej znacznym rozszerzeniem prac [C2–C4], wykazano doświadczalnie, że uzyskanie metodą repliki trwałego efektu superhydrofobowego na powierzchni kauczuku silikonowego LSR w przypadku jej narażenia na działanie powszechnie występujących w izolacji napowietrznej wyładowań niezupełnych jest wątpliwe. Spowodowane jest to postępującą w czasie degradacją mikrostruktury powierzchni kauczuku silikonowego o właściwej, dwupoziomowej chropowatości, odpowiedzialnej za jej superhydrofobowość. Degradacja ta wynika z utleniania atomów Si w łańcuchach PDMS, które zachodzi w przypowierzchniowej warstwie kauczuku i prowadzi do tworzenia spękanych, bogatych

w kruchy  $\text{SiO}_2$ , obszarów o niekorzystnym rozkładzie chropowatości. Szczególnie ważnym czynnikiem jest jednak trawienie i wyrównywanie przez jony i wzbudzone cząsteczki, generowane podczas wyładowań ulotowych, nierówności powierzchni kauczuku, odpowiedzialnych za jej superhydrofobowość.

Możliwość wytwarzania superhydrofobowych silikonowych osłon izolatorów kompozytowych bezpośrednio w procesie ich produkcji jest bardzo ważna z aplikacyjnego punktu widzenia, tym bardziej za pomocą powszechnie stosowanej dzisiaj w przypadku kauczuków silikonowych LSR metody wtryskowej i duralowych form. Ten sposób modyfikacji powierzchni umożliwia jej samooczyszczanie, a przede wszystkim ogranicza zwilżanie oraz redukuje bardzo groźną w skutkach akumulację wody na krawędziach kloszy. Przy niekorzystnej koincydencji czasowej zrzutu strugi wody (rys. 5) z maksimum napięcia na izolatorze akumulacja ta może doprowadzić do pojawienia się wyładowania iskrowego, zwierającego dwa lub więcej kloszy. Prowadzi to w efekcie do przejścia w bardzo niebezpieczną fazę wyładowania łukowego, obejmującego cały izolator (jak w sekwencji 5 klatek filmowych na rys. 5).



W pracy [C6] poruszono pokrewne zagadnienie wytwarzania biomimetycznego, elastycznego materiału o właściwościach superhydrofobowych, wykazującego dodatkowo powierzchniowe przewodnictwo elektryczne. Opracowana unikalna, autorska metoda uzyskiwania takiej kompozytowej struktury materiałowej bazuje na fizycznym osadzaniu wielościennych nanorurek węglowych (MWCNT) na adhezyjnej powierzchni kauczuku silikonowego podczas jego sieciowania. Wielokrotne zderzenia aglomeratów MWCNT z lepką, półpłynną powierzchnią silikonu – co stanowi kluczowy aspekt tej metody – powodują powstawanie mikroskopijnych, biomimetycznych struktur powierzchniowych, odwzorowujących superhydrofobowe różyczki brokułu (rys. 6). Uzyskiwany w ten prosty, acz nietrywialny sposób materiał wykazuje statyczny kąt zwilżania przekraczający  $160^\circ$ , histerezę dynamicznego kąta zwilżania ok.  $11^\circ$  oraz kąt spływu ok.  $7^\circ$ .



Ten biomorficzny materiał posiada dodatkowo dotychczas nieopisaną w literaturze przedmiotu kombinację cech: trwałość mechaniczną, odporność na długotrwałe, 24-godzinne moczenie w wodzie oraz zdolność do zachowania przewodnictwa kontaktowego sieci nanorurek węglowych pomimo wielokrotnego i znacznego (ponad dwukrotnego) rozciągania. Co więcej, w pewnym zakresie odkształceń materiał ten wykazuje anomalną, ujemną względną zmianę rezystancji z wydłużeniem. W pracy [C6] zaproponowano również fenomenologiczny model tego zjawiska określanego jako efekt mieszkowy (*bellows effect*). Model ten bierze pod uwagę zmiany naprężeń zachodzące w przypowierzchniowej warstwie materiału podłożowego prowadzące do zaniku wybrzuszeń i zmniejszania – w pewnym zakresie odkształceń – rzeczywistej powierzchni materiału. Dobre przewodnictwo elektryczne w dużym zakresie odkształceń predysponuje uzyskany w ten sposób materiał m.in. do zastosowań jako elastyczna warstwa elektrodowa w technice polimerów elektroaktywnych mechanicznie EmAP, omówionych w następnym podrozdziale tego autoreferatu.

Zagadnienia związane z wykorzystaniem materiałów o właściwościach superhydrofobowych w elektrotechnice i inżynierii wysokich napięć były eksplorowane naukowo przez habilitanta



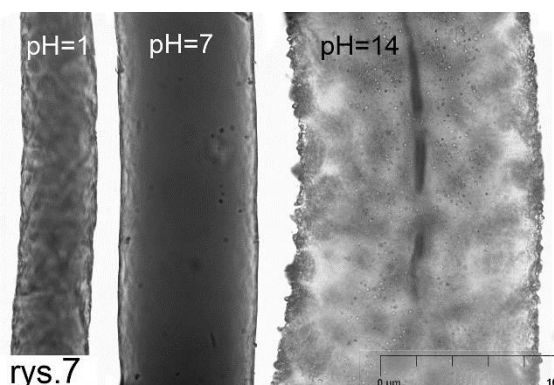
w ramach kierowanego przez niego projektu badawczego nr N N510 679040 *Nowe materiały multifunkcyjne w inżynierii wysokich napięć - dielektryki elastomerowe o biomimetycznej powierzchni wykazującej efekt lotosu*, realizowanego w latach 2010–2012.

#### 4c.4. Mięśnie naturalne i polimery elektroaktywne, czyli sztuczne mięśnie polimerowe

Mięśnie naturalne zbudowane są z tkanki mięśniowej składającej się z wydłużonych komórek (miocytów), odpowiedzialnych za mechaniczny skurcz w odpowiedzi na pobudzenie elektrycznym impulsem nerwowym oraz rozkurcz po jego ustaniu. Od dawna próbowano zbadać i opisać budowę naturalnych mięśni oraz poznać zasady ich funkcjonowania. Wciąż podejmowane są również próby opracowania materiałów i konstruowania biomorficznych sztucznych mięśni o działaniu odpowiadającym działaniu mięśni naturalnych. Biorąc pod uwagę obecny stan nauki i techniki, takie pełne odwzorowanie strukturalno-funkcyjne nie jest możliwe. Możliwe jest jednak otrzymywanie polimerowych, biomorficznych materiałów i struktur naśladujących mechaniczną reakcję mięśni naturalnych na pobudzenie elektryczne. Materiały te są określane jako polimery elektroaktywne (Electroactive Polymers, EAP) lub – co lepiej oddaje ich funkcję – polimery elektroaktywne mechanicznie (Electromechanically-Active Polymers, EmAP). W pracach [C7–C10] poruszane są zagadnienia związane zarówno z wytwarzaniem, jak i testowaniem takich aktywnych struktur materiałowych.

Podstawowym – wciąż nierozwiązanym od strony naukowej i aplikacyjnej – zagadnieniem z dziedziny biomimetycznych materiałów EmAP jest uzyskiwanie elastycznych elektrod. Muszą one być trwale związane z podłożem oraz utrzymywać dobrą przewodność elektryczną przy dużych odkształceniach mechanicznych bazowego materiału elektroaktywnego. Osiągnięcie takiego rezultatu staje się możliwe dzięki zastosowaniu wielościennych nanorurek węglowych MWCNT. Jak wynika z doświadczeń przeprowadzonych przez habilitanta i opisanych w pracy [C7], możliwe jest bezpośrednie wykorzystanie warstwy chaotycznie zorientowanych MWCNT, adhezyjnie związanych z lepka powierzchnią elastomeru (np. typowego materiału EmAP, jakim jest elastomer akrylowy PSA VHB). Innym sposobem wskazanym w pracy [C7] jest również wykorzystanie MWCNT jako dodatku w celu uzyskania elektroprzewodzącego, elastycznego kompozytu. Po wprowadzonego MWCNT do matrycy silikonowej jest ona nanoszona na powierzchnię bazowego materiału EmAP i tam dopiero poddawana sieciowaniu w formie cienkiego pokrycia. Dzięki właściwie dobranej, sprzyjającej uzyskaniu anizotropowego rozkładu nanorurek technologii przetwarzania i nanoszenia kompozytu na podłoże udało się uzyskać przekroczenie progu perkolacji przy zaledwie 0,5 % zawartości masowej MWCNT.

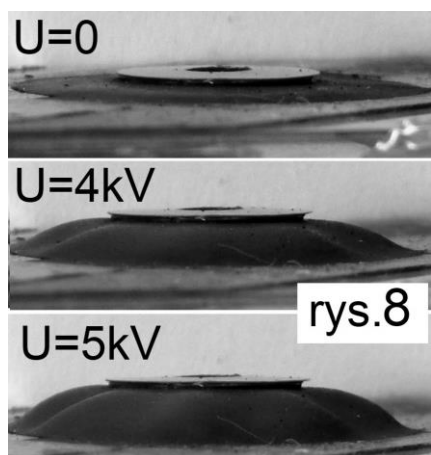
W artykule [C8] przedstawiono eksperymentalne podejście do uzyskania powierzchniowo elektroprzewodzących włókien aktywowanego poliakrylonitrylu (aPAN). aPAN jest typowym jonowym, hydrożelowym polimerem EmAP, zmieniającym w znaczny sposób (nawet o ponad 300 % – rys. 7) swoje wymiary geometryczne przy zmianie pH. W celu elektrycznego pobudzenia zmian geometrii aPAN zmiany pH uzyskuje się na drodze elektrochemicznej. W takim układzie włókno



aPAN stanowi nośnik dla elektrody jednego z półogniw elektrochemicznych. W klasycznym podejściu na włóknie aPAN wytwarzana jest warstwa elektrycznie przewodząca – najczęściej platyny osadzonej na drodze chemicznej. Dotychczas nierozwiązanym problemem jest jednak trwałość tak uzyskanych warstw elektrodowych. Ze względu na hydrożelowy charakter aPAN ulegają one bowiem delaminacji już nawet po kilkudziesięciu cyklach elektro-pobudzania.

W pracy [C8] zaproponowano zatem wytwarzanie aPAN z prekursora w postaci włókna NitrilStatic. Jest to włókno PAN pokryte warstwą miedzi siarczku CuS o metalicznym charakterze przewodnictwa, dodatkowo powiązanego koordynacyjnie ze strukturą PAN, co zapewnia bardzo dobrą mechaniczną trwałość takiej warstwy. Doświadczalnie wykazano, że tak zmodyfikowany powierzchniowo prekursor umożliwia uzyskanie prawidłowej struktury aPAN, reagującej na zmiany pH. Niestety jednak w procesie aktywacji podczas utleniania termicznego dochodzi do przemiany fazowej dobrze przewodzącego CuS w półprzewodzący  $Cu_xS$  ( $x=1,8-2$ ) o dziurowym charakterze przewodnictwa. Wykazano też, że odtworzenie trwałej warstwy CuS na aPAN jest niemożliwe ze względu na deficyt grup funkcyjnych –CN, odpowiedzialnych za koordynacyjne wiązanie CuS do powierzchni PAN.

W multidyscyplinarnej pracy [C9] zaprezentowano ideę adaptacyjnych membran architektonicznych (Adaptive Building Envelope, ABE) bazujących na wykorzystaniu biomorficznych polimerów EmAP. ABE to innowacyjna alternatywa dla klasycznych, litych ścian, czyli cienkie, aktywne, matrycowe pokrycie powierzchni zewnętrznych budynków. Podstawową funkcją ABE jest również aktywna zmiana jej struktury w celu uzyskania rozproszonej regulacji mikroklimatu i komfortu wewnątrz zamkniętych nią przestrzeni. Aby umożliwić uzyskanie polimerowej, matrycowej struktury ABE o elektrycznie sterowanej, rozłożonej funkcji transpiracyjnej, niezbędny jest podstawowy aktywny element elektroregulacyjny, zaprezentowany w pracy [C9]. Jego biomimetyczne funkcjonowanie oparto na wzorcu w postaci aparatu szparkowego roślin, odpowiedzialnego za wymianę gazową i transport pary wodnej. Ten skomplikowany, biologiczny model w uproszczonej formie odwzorowano funkcjonalnie w postaci miniaturowego zaworu przeponowego o budowie planarnej. Zaproponowana konstrukcja umożliwia uzyskanie wertykalnego ruchu niewielkiego

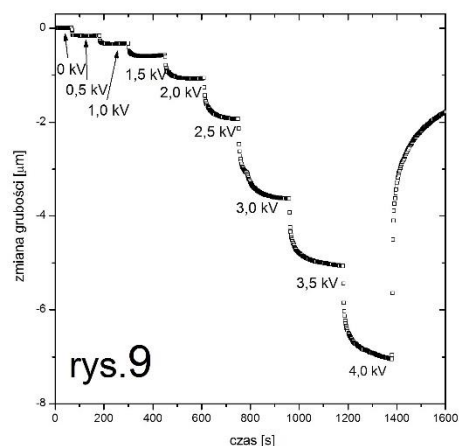


wieczka, zamykającego kanał zaworu w odpowiedzi na wysokonapięciowe pobudzenie elektryczne. Podanie na elastyczne elektrody aktuacyjnej membrany EmAP napięcia sterującego w zakresie 3,5–5 kV powoduje zmniejszenie jej grubości i wybrzuszenie. W efekcie dochodzi do uniesienia wieczka przesłony zaworu (rys. 8) na wysokość ok. 1 mm i otwarcie centralnego mikrokanалу gazowego. Umożliwia to uzyskanie wyzwalanej elektrycznie wymiany powietrza pomiędzy obu stronami ABE, zbudowanej w postaci matrycy wielu takich mini-zaworków membranowych. Zaletą zaproponowanego podwójnie biomimetycznego rozwiązania (bazującego na sztucznym mięśniu polimerowym EmAP i idei aparatu szparkowego) jest niskie

zużycie energii, bezgłośna praca, duża szybkość działania (zaledwie 5 s do 50 % otwarcia) oraz brak klasycznych napędów elektrycznych i ruchomych części.

W pracach badawczych dotyczących sztucznych mięśni polimerowych EmAP jednym z kluczowych zagadnień metrologicznych jest precyzyjny pomiar odkształceń geometrycznych materiału w reakcji na pobudzenie elektryczne. Szczególne wyzwanie od strony pomiarowej istnieje w przypadku niejonowych elastomerów dielektrycznych ściskanych elektrostatycznie (Electrostatically Stricted Polymers, ESSP), określanymi również jako Dielectric Elastomer Actuator (DEA). Niewielkie (mikro- i sub-mikrometrowe) zmiany grubości cienkich, elastycznych próbek tych materiałów są efektem ściskającego naprężenia Maxwella, wytwarzanego w wyniku stało- lub zmiennosygnałowego pobudzenia wysokonapięciowego. W pracy [C10] zaproponowano zatem skuteczne rozwiązanie tego problemu metrologicznego w postaci mikrodylatometru kontaktowego z piezorezystywną belką pomiarową, wykonaną w krzemowej mikrotechnologii MEMS. Zmiany grubości badanej próbki EmAP są dynamicznie przekształcane – poprzez wsparty na niej stylus – na ugięcia mikrodźwigni

pomiarowej MEMS. Ugięcie to jest z kolei wyznaczane na podstawie pomiaru napięcia niezrównoważenia czteroramiennego mostka piezo-rezystywnego, wytworzonego dyfuzyjnie u nasady dźwigni w obszarze największych naprężeń mechanicznych. W przedstawionym rozwiązaniu, m.in. dzięki zastosowaniu pomiaru napięcia przy pomocy wzmacniacza lock-in, uzyskano doskonale parametry metrologiczne: zakres pomiarowy przekraczający 100  $\mu\text{m}$ , nanometrową rozdzielczość oraz pasmo pracy do 1 kHz. Umożliwia to łatwe pomiary dynamicznych odkształceń próbek niejonowych polimerów EmAP pobudzanych wysokonapięciowo. Metoda ta jest bardzo uniwersalna i pozwala również na pomiary zarówno statycznych, jak i quasi-statycznych (przejściowych) zmian grubości polimerów elektroaktywnych bez stosowania techniki lock-in, jednak nadal z nanometrową dokładnością (rys. 9). Do głównych zalet zaproponowanej mikrodylatometrycznej metody pomiarowej zaliczyć należy również eliminację błędów powstających przy stosowaniu klasycznej dylatometrii laserowej, związanych z lokalnym nagrzewaniem powierzchni badanej próbki przez wiązkę światła laserowego. Powoduje to rozszerzanie cieplne materiału w obrębie plamki laserowej i wzrost grubości, przeciwny efektom elektromechanicznym.



Zagadnienia związane z polimerowymi materiałami elektroaktywnymi mechanicznie o biomorficznych właściwościach były eksplorowane naukowo przez habilitanta w ramach kierowanego przez niego projektu badawczego N N510 2117 33 pt. *Badania w zakresie nowych materiałów inteligentnych – pobudzone wysokonapięciowo elektroaktywne kompozyty polimerowe o mikrostrukturze biomorficznej*, realizowanego w latach 2007–2009.

#### 4c.5. Elektryzacja kropli chmur burzowych i elektro-aerozole

Krople wody w chmurach – szczególnie w burzowych *cumulonimbusach* – ulegają wielokrotnej fragmentacji podczas pionowego transportu w silnych prądach powietrznych, co prowadzi do ich naturalnej elektryzacji w wyniku nierównowagowego rozdziału ładunków podczas szybkiego powstawania kropeł potomnych. Zjawisko to jest dodatkowo intensyfikowane przez pole elektryczne pochodzące od powstałych wcześniej naelektryzowanych kropli rozseparowanych na dodatnio naładowane na szczycie chmury oraz ujemnie u jej podstawy. Efektem tego naturalnego procesu jest powstawanie niebezpiecznie dużych natężeń pól elektrycznych nawet w znacznych odległościach od chmury burzowej, tzw. ogni św. Elma, oraz silnych wyładowań elektrycznych chmura-chmura i chmura-ziemia.

W serii prac [C11–C14] przedstawiono wyniki pogłębionych badań teoretycznych oraz eksperymentalnych, związanych z generacją naładowanych elektrycznie aerozoli wodnych (elektro-aerozoli), uzyskiwanych za pomocą wysokowydajnych, pneumatycznych atomizerów naddźwiękowych. W urządzeniach tych strumień powietrza o prędkości przekraczającej 3 Machy, wytwarzany w zwężce Venturiego, powoduje powstawanie fal uderzeniowych. Zrywają one powierzchniowe warstwy ciągłego strumienia podawanej osiowo cieczy roboczej i fragmentują go. W efekcie tworzona jest struga mikro- i nanokropli o dużej energii kinetycznej, a zatem znacznym (nawet kilkunastometrowym) zasięgu. Ładunek elektryczny kropeł cieczy takiego elektro-aerozolu powoduje nie tylko ich przyciąganie do uziemionych obiektów (na skutek efektu ładunku zwierciadlanego, zilustrowany na rys. 10, na którym przedstawiono krople elektro-aerozolu przyciągane ze strugi do uziemionej główicy), ale sprzyja również tworzeniu długotrwanie unoszącej się chmury (w wyniku oddziaływań repulsyjnych). Te cechy elektro-aerozolu są szczególnie cenne w zastosowaniach

agrotechnicznych oraz związanych z dekontaminacją. Samoistna elektryzacja kropli cieczy w takim procesie wytwarzania aerozoli jest jednak zbyt mała, by miała znaczenie praktyczne. Najwydajniejszą (a dodatkowo wygodną i bezpieczną) metodą wymuszonej elektryzacji kropli



rys.10

jest w takim przypadku indukcja elektryczna. Elektryzacja taka zachodzi w atomizerze naddźwiękowym dzięki wykorzystaniu zasilanej wysokonapięciowo, koncentrycznej elektrody, otaczającej obszar atomizacji u ujścia kapilary podającej ciecz roboczą opływającą osiowo przez naddźwiękowy strumień gazu.

Jak pokazały badania prezentowane w omawianej serii prac [C11–C14], w przypadku elektro-aerozolowych głowic naddźwiękowych głównym efektem ograniczającym skuteczność indukcyjnego sposobu elektryzacji (mierzoną maksymalną gęstością masową ładunku kropli  $Q/m$ ) jest zjawisko ekranowania (*shielding effect*). Efekt ten został odkryty, opisany od strony teoretycznej, jak również zweryfikowany doświadczalnie w pracach [C11–C14]. Wynika on z częściowego ekranowania przez ulatującą chmurę wcześniej utworzonych i naelektryzowanych kropli obszaru, w którym właśnie zachodzi atomizacja ciągłej, uziemionej strugi cieczy. Modyfikuje to zatem i zmniejsza efektywne natężenie pola elektrody indukcyjnej w obszarze atomizacji. W efekcie obserwowany jest spadek wydajności elektryzacji tym silniejszy, im większy jest wydatek atomizowanej cieczy, a zatem im większą gęstość ma elektro-aerozolowa struga. Na przykład, w opracowanej głowicy typu Telesto 10.05 EFEN obserwowano spadek stosunku ładunku do masy kropli  $Q/m$  od ponad 10 mC/kg do ok. 1,5 mC/kg przy zwiększeniu przepływu atomizowanej wody od 100 do 500 cm<sup>3</sup>/min.

W ramach omawianej pracy badawczej [C12] opracowano również metodykę badań jak i konstrukcję specjalizowanych układów pomiarowych, umożliwiających wyznaczenie skuteczności elektryzacji elektro-aerozoli o dużej początkowej prędkości strugi. W pracy [C14] doświadczalnie wykazano również znaczny – nawet kilkunastokrotny – wzrost stopnia pokrycia liści roślin opryskiwanych metodą elektro-aerozolową z wykorzystaniem atomizerów naddźwiękowych w porównaniu do klasycznych opryskiwaczy agrotechnicznych. Efekt ten jest szczególnie silny dla dolnej strony liści i łodyg, gdzie dla klasycznych metod oprysku nie uzyskuje się zadowalających efektów. Dodatkowo, unikalną cechą opracowanych naddźwiękowych głowic elektro-aerozolowych jest penetracja strugi elektro-aerozolu w głąb silnie zwartego łąnu roślin (np. kukurydzy) w dowolnym stadium ich wzrostu, nieosiągalna klasycznymi metodami agrotechnicznymi. Uzyskuje się to właśnie dzięki bardzo dużej prędkości początkowej kropli elektro-aerozolu i strugi powietrza nośnego u ujścia głowicy.

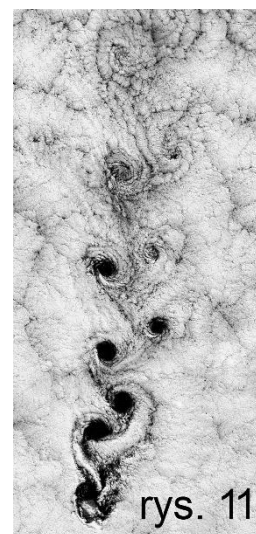
Unikalne w skali międzynarodowej publikacje [C11–C14] powstały w ramach współpracy naukowo-badawczej z partnerem przemysłowym (firmą Telesto Sp. z o.o.) i wspólnej realizacji projektu badawczo-rozwojowego nr R01 015 03 *Nowa technologia wytwarzania strumienia elektrycznie naładowanego aerozolu o dużej początkowej prędkości strugi do zastosowań agrotechnicznych i dekontaminacyjnych*, którego habilitant był głównym wykonawcą. Uwieńczeniem tego projektu i prac [C11–C14] jest stworzony od podstaw typoszereg naddźwiękowych głowic elektro-aerozolowych Telesto EFEN oraz krajowy patent PL224862.

#### 4c.6. Oscylacyjne ruchy liści, wiry powietrzne i wirowe pomiary prędkości strugi gazu

Za przeszkodą opływającą przez strugę gazu powstają naprzemienne zagęszczenia i rozrzedzenia o charakterze wirowym. Na cześć ich odkrywcy, Kármán Tódora (Theodore von Kármána), nazywane są wirami lub ścieżką wirową von Karmana. Częstotliwość pojawiania się takich wirów jest uzależniona przede wszystkim od prędkości przepływu gazu, ale również

m.in. od jego temperatury i kształtu przeszkody (tzw. generatora wirów). Wiry Karmana są odpowiedzialne za ruch liści i łodyg roślin na wietrze czy też tworzenie się za wielkowymiarowymi barierami geologicznymi (np. wyspami) olbrzymich wirów powietrznych (rys. 11 – pochodzi ze zbioru obrazów zarejestrowanych przez satelitę Landsat 7 w dniu 15.09.1999, udostępnianych przez NASA USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch na zasadach *open source*).

Z aplikacyjnego punktu widzenia wiry von Karmana mogą być wykorzystane do pośredniego elektrycznego pomiaru prędkości przepływu gazu. W pracy [C15] zaprezentowano nowatorską ideę, konstrukcję oraz eksperymentalną weryfikację działania czujnika mikro-dźwigniowego, umożliwiającego pomiar prędkości przepływu gazu właśnie dzięki wykorzystaniu tego zjawiska. Działanie opracowanego przetwornika inspirowane jest oscylacyjnymi ruchami liści drzew (np. osiki), pojawiającymi się nawet przy niewielkich powiewach wiatru. Działanie układu przedstawionego w pracy [C15] opiera się na pomiarze częstotliwości wibracji mikrodźwigni krzemowej, wykonanej w technologii MEMS i zlokalizowanej wprost na krawędzi spływu niewielkiej przeszkody o zoptymalizowanym, trójkątnym przekroju poprzecznym. Naprzemienne wiry von Karmana tworzące się za tą przeszkodą bezpośrednio wprawiają mikrodźwignię w drgania o częstotliwości liniowo powiązanej z prędkością gazu, co potwierdzono doświadczalnie dla powietrza w zakresie prędkości 5–22 m/s. Mechaniczne drgania mikrodźwigni są przetwarzane na sygnał elektryczny dzięki zastosowaniu mostka piezorezystywnego, wbudowanego w jej nasadę w obszarze największych naprężeń mechanicznych. Rozwiązanie zaprezentowane w [C15] jest pionierskie i unikalne w literaturze przedmiotu właśnie ze względu na wykorzystanie miniaturowego czujnika mikrodźwigniowego MEMS, umożliwiającego pomiar częstotliwości tworzenia dynamicznych zaburzeń rozkładu ciśnień w niewielkich obszarach, zlokalizowanych bezpośrednio za generatorem wirów.



#### 4c.7. Wykaz najważniejszych osiągnięć badawczych cyklu publikacji [C1-C15]

Poniżej zaprezentowano – w syntetycznej formie – zestawienie najważniejszych osiągnięć badawczych cyklu powiązanych tematycznie publikacji [C1–C15] pod zbiorczym tytułem *Materiały i rozwiązania biomimetyczne w inżynierii elektrycznej – zagadnienia wybrane*:

- Wykazanie przydatności i możliwości praktycznego wykorzystania wybranych modeli i inspiracji biologicznych oraz naturalnych jako wzorców naukowych i aplikacyjnych w szeroko pojętej inżynierii elektrycznej.
- Wykonanie poszerzonych badań dotyczących wytwarzania metodą repliki negatywowej dielektrycznych kauczków silikonowych o właściwościach superhydrofobowych pod kątem ich odporności na wyładowania ulotowe oraz zastosowania do wyrobu osłon kompozytowych izolatorów wysokonapięciowych [C2–C5].
- Opracowanie oryginalnej, autorskiej metody wytwarzania biomorficznego materiału silikonowego inkrustowanego MWCNT, wykazującego niespotykana dotąd w literaturze przedmiotu kombinację cech łączących superhydrofobowość z dużą trwałością mechaniczną, elastycznością i jednocześnie z dobrym przewodnictwem elektrycznym w dużym zakresie odkształceń mechanicznych [C6].
- Opracowanie fenomenologicznego modelu zjawiska – nazwanego *bellow effect* – wyjaśniającego obserwowaną w tego typu kompozytowym materiale MWCNT-silikon anomalną, ujemną względną zmianę rezystancji powierzchniowej z wydłużeniem [C6].
- Opracowanie metodyki pomiarów oraz modelu matematycznego umożliwiającego wyznaczenie czasowo-przestrzennego rozkładu temperatury powierzchni materiałów

narażonych na działanie wyładowań elektrycznych [C1]. Tak opracowany model wprost wskazuje na możliwości zwiększenia odporności kompozytowych materiałów dielektrycznych na wyładowania powierzchniowe w wyniku sterowania ich właściwościami termodynamicznymi.

- Opracowanie i laboratoryjne badania metody wysokonapięciowej, indukcyjnej elektryzacji cieczy atomizowanej w pneumatycznych głowicach zamglawiających ze zwężką Venturiego, wytwarzającą naddźwiękowy przepływ powietrza w koncentrycznym układzie elektroda-struga [C11–C14].
- Teoretyczne i doświadczalne wykazanie istnienia *efektu ekranowania*, odpowiedzialnego za obniżanie gęstości masowej ładunku kropli elektro-aerozolu, uzyskiwanego w formie strugi w tego typu atomizerach pneumo-elektrycznych [C11–C13].
- Doświadczalne wykazanie możliwości ponad 10-krotnego zwiększenia stopnia pokrycia liści roślin wodnymi preparatami bioaktywnymi, nanoszonymi strugą takiego elektro-aerozolu w stosunku do wyników uzyskiwanych klasycznymi metodami oprysku agrotechnicznego. Dotyczy to w szczególności roślin rosnących w wysokim, zwartym łanie (np. kukurydza) oraz ich dolnych części (zarówno liści, jak i łodyg) niedostępnych dla dotychczas znanych metod oprysku agrotechnicznego [C14].
- Przeprowadzenie poszerzonych badań dotyczących technologii wytwarzania oraz zagadnień metrologii polimerów elektroaktywnych mechanicznie EmAP [C8–C10].
- Wykazanie możliwości wykorzystania elektroprzewodzących włókien poliakrylonitrylu PAN modyfikowanego powierzchniowo siarczkami miedzi jako prekursora do wytwarzania żelowych „sztucznych mięśni” w postaci mikrowłókien aktywowanego aPAN. Wyjaśnienie przyczyn zaniku powierzchniowego przewodnictwa elektrycznego w takich strukturach materiałowych w trakcie ich przetwarzania [C8].
- Opracowanie oryginalnej koncepcji (popartej doświadczalną weryfikacją jej realizowalności) miniaturowego elementu transpiracyjnego bazującego na idei aparatu szparkowego roślin oraz biomorficznym, pobudzonym wysokonapięciowo polimerze EmAP. Element ten stanowi podstawową komórkę funkcjonalną matrycowych, innowacyjnych, adaptacyjnych membran architektonicznych ABE, umożliwiającą elektrycznie aktywowaną zmianę ich struktury w celu uzyskania rozproszonej regulacji mikroklimatu wewnątrz budynków [C9].
- Opracowanie mikrodylatometrycznej metody pomiarowej wykorzystującej krzemową, piezorezystywną mikrodźwignię MEMS oraz użycie jej do statycznych oraz dynamicznych pomiarów nano- i mikrometrowych zmian grubości polimerów elektroaktywnych mechanicznie EmAP (polimerowych *szucznych mięśni*). Metoda ta umożliwia prowadzenie pomiarów w warunkach silnych zakłóceń elektrycznych (przewodzonych i indukowanych), pochodzących od wysokonapięciowego sygnału, wywołującego odkształcenia mechaniczne materiału EmAP [C10].
- Doświadczalne wykazanie możliwości nowatorskiego zastosowania mikrodźwigniowego czujnika przemieszczeń MEMS do pośredniej analizy zmian rozkładu ciśnień w ścieżce wirowej von Karmana, a tym samym do elektrycznych pomiarów prędkości przepływu gazu metodą wirową [C15].

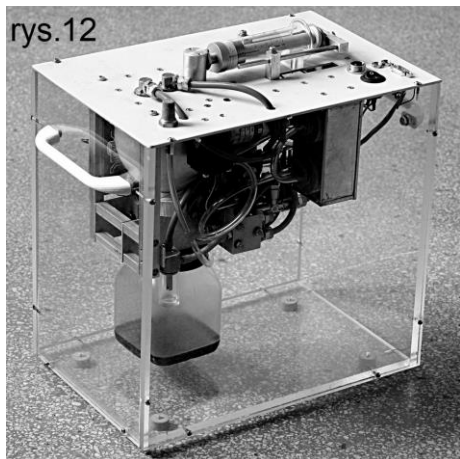
Przedstawiony cykl powiązanych tematycznie publikacji [C1–C15] posiada szeroki aspekt poznawczy i aplikacyjny oraz międzynarodowy zasięg przedmiotowy dzięki upublicznieniu w renomowanych czasopismach zagranicznych. Jest samodzielny i oryginalny osiągnięciem poznawczym autora, posiada wysoką wartość łącznego współczynnika Impact Factor, jak również znaczącą ilość cytowań.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

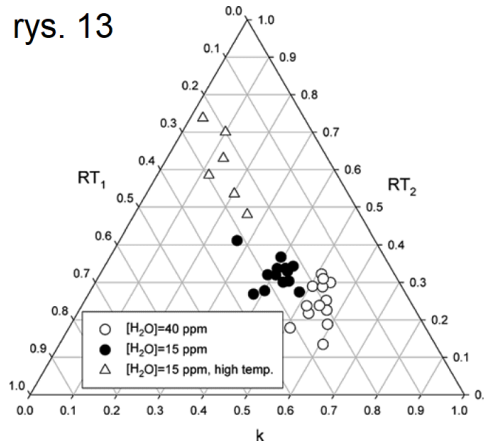
Wyniki pozostałych prac naukowo-badawczych habilitanta, prowadzonych po uzyskaniu doktoratu, były prezentowane w czasopismach z bazy JCR i listy ministerialnej, w rozdziałach książek i monografiach oraz podczas liczących się konferencji międzynarodowych i krajowych, szczególnie przedstawionych w Załączniku 5. Poniżej omówiono główne grupy tematyczne, w ramach których habilitant prowadził w tym okresie swoje prace naukowo-badawcze.

### 5.1 Analiza gazów rozpuszczonych w oleju (Dissolved Gas Analysis, DGA)

W okresie bezpośrednio po uzyskaniu doktoratu kontynuowane były badania związane z diagnostyką uszkodzeń izolacji transformatorów energetycznych poprzez analizę gazów rozpuszczonych w oleju elektroizolacyjnym (Dissolved Gas Analysis, DGA), prowadzoną za pomocą czujników gazów. W ramach tych badań, stanowiących istotne rozszerzenie zagadnień poruszonych w pracy doktorskiej habilitanta, opracowana została zmodyfikowana metodyka zarówno samego „czujnikowego” pomiaru zawartości gazów w próbce oleju jak i analizy jego wyników poprzez klasteryzację uogólnionej, bezwymiarowej odpowiedzi czujników gazów.



Opracowane nowe podejście do interpretacji danych eksperymentalnych polegało na zastosowaniu metody analizy skupień i graficznej klasteryzacji punktów odpowiadających trzem uogólnionym parametrom na mapie w trójkątnym układzie współrzędnych. Parametry te wyznaczano na podstawie numerycznej analizy odpowiedzi czasowej dwóch elektrochemicznych czujników gazów o różnej czułości i selektywności. Czujniki gazów poddawano ciągłemu działaniu mieszanki gazowej, uzyskanej przez przepłukiwanie niewielkiej próbki badanego oleju strumieniem powietrza krążącego w zamkniętym obwodzie układu ekstrakcyjnego prototypowego, automatycznego analizatora olejowo-gazowego (rys. 12). Zastosowanie klasteryzacji i trójkątnej mapy pozwoliło na rozpoznawanie nie tylko podstawowych rodzajów uszkodzeń izolacji ciekłej transformatorów (jak wyładowania niezupełne czy też rozkład termiczny oleju w tzw. gorących punktach – jak na rys. 13). Umożliwiło również ocenę efektów związanych z zawilgoceniem oleju oraz wykrywanie gazów o innym (np. elektrochemicznym) pochodzeniu. Tego typu analiza skupień w odniesieniu do uogólnionych współczynników wyznaczanych w analizie DGA, prowadzonej przy użyciu elektrochemicznych czujników gazów o ograniczonej selektywności, jest podejściem nowatorskim oraz w istotny sposób rozszerza możliwości klasycznej metody DGA.



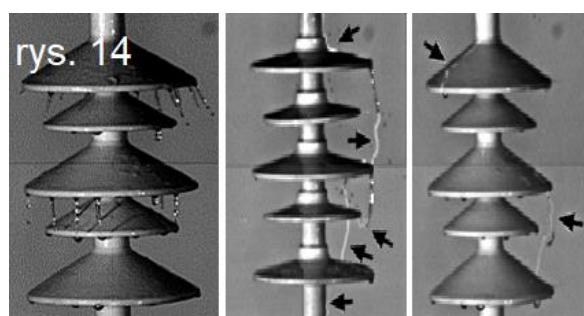
Głównym wynikiem tych badań było opracowanie prototypowego, zautomatyzowanego, mobilnego analizatora DGA (rys. 12), który umożliwia badanie próbek olejów bezpośrednio po ich pobraniu z transformatora w warunkach polowych (analizator ten został opracowany we współpracy z firmą Energo-Complex, Piekary Śląskie – Załącznik 5: pkt. II.B.13). Wynikiem tych prac były także:

- angielskojęzyczny artykuł naukowy opublikowany w czasopiśmie z bazy JCR (Załącznik 5: pkt. II.A.10),

- angielskojęzyczny referat i publikacja konferencyjna (*Polish-Swedish Symposium Materials – energy supply – society & environment* – Załącznik 5: pkt. II.L.4),
- 2 referaty i publikacje konferencyjne (*Konferencja naukowo-techniczna Transformatory w eksploatacji* – Załącznik 5: pkt. II.L.2 oraz *11<sup>th</sup> International Workshop on High Voltage Engineering HVE 2002* – Załącznik 5: pkt. II.L.1).

## 5.2 Wysokonapięciowe napowietrzne układy izolacyjne - izolatory kompozytowe

Obszar zainteresowań naukowo-badawczych habilitanta obejmował również napowietrzne wysokonapięciowe układy izolacyjne. Prace badawcze, w których habilitant brał udział, dotyczyły problematyki zabrudzeniowej izolatorów kompozytowych z kloszami wykonanymi z gumy silikonowej HTV (High Temperature Vulcanized) i LSR (Liquid Silicone Rubber), w szczególności ich zachowania podczas opadów deszczu. Prace te miały na celu optymalizację kształtu osłon i parametrów konstrukcyjnych izolatorów pod kątem ich zastosowania oraz odporności na przeskoki zabrudzeniowe w czasie długotrwałej eksploatacji. W badaniach tych, dzięki rejestracji zjawisk przedprzebiciowych, wykonanych przez habilitanta wykazano ważną rolę kropli wody w rozwoju przeskoku elektrycznego na izolatorach kompozytowych.

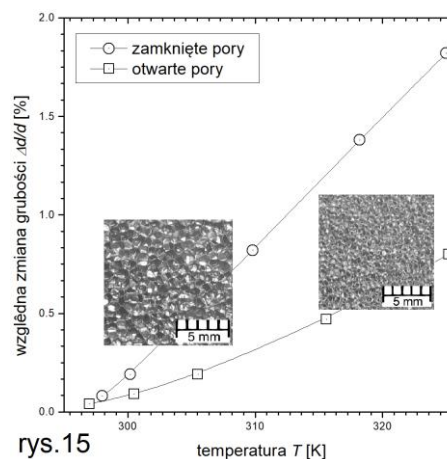


Krople wody, spływając z obszarów o niskiej hydrofobowości na krawędzi klosza, mogą doprowadzić – poprzez modyfikację rozkładu pola elektrycznego – do przeskoku elektrycznego na izolatorze przy napięciu zaledwie 2,5 razy wyższym od napięcia znamionowego (rys. 14). Zagadnienia związane z przeskokami na izolatorach kompozytowych inicjowanymi przez krople i strugi wodne habilitant badał (jako wykonawca) w ramach 2 projektów: projekt badawczy Komitetu Badań Naukowych nr 3T10B09728 (Załącznik 5: pkt. II.J.4) oraz projekt badawczy Departament Badań Naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr NN511 457036 (Załącznik 5: pkt. II.J.6). Wynikiem tych prac badawczych były również:

- artykuł naukowy opublikowany w czasopiśmie z bazy JCR (Załącznik 5: pkt. II.A.2),
- referat i publikacja konferencyjna (*IX Konferencja Naukowo-Techniczna Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Elektroenergetyce NIWE 2009* – Załącznik 5: pkt. II.L.16).

## 5.3 Materiały elektroaktywne

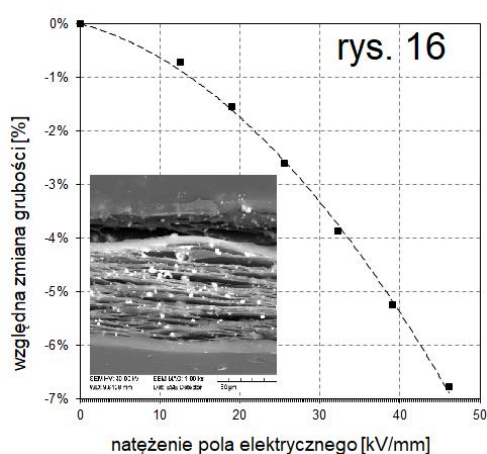
Poza badaniami dotyczącymi polimerów elektroaktywnych, zawartymi w cykl publikacji powiązanych tematycznie (omówionymi szczegółowo w pkt. 4c.4), habilitant prowadził również prace związane z uzyskiwaniem nowych, kompozytowych materiałów elektroaktywnych, wykazujących odkształcenia mechaniczne w reakcji na pobudzenie elektryczne. Należy tu wymienić opracowane materiały kompozytowe na bazie ciekłej gumy silikonowej LSR ze sferycznymi, ciekłymi inkluzjami wodnymi lub glicerynowymi, pozwalające na uzyskanie zwiększonej przenikalności elektrycznej przy jednoczesnym zachowaniu dobrej elastyczności. Inną grupą badanych materiałów elektroaktywnych były kompozytowe, komórkowe materiały elektro-termo-responywne na bazie polietylenu napełnianego sadzą, w których zwiększone odkształcenia uzyskano dzięki wykorzystaniu inflacji gazu zamkniętego we wnętrzu ich mikrokomórek (rys. 15). Habilitant



rys. 15



przewodził również badania dotyczące wykorzystania oddziaływań zewnętrznego, pobudzającego pola elektrycznego z ładunkiem przestrzennym, sztucznie wprowadzonym na interfejsie pomiędzy dwoma warstwami polimeru elektroaktywnego, połączonymi adhezyjnie. Pokrewnym zagadnieniem badanym przez habilitanta był również sposób wysokonapięciowego pobudzania dielektrycznego aktuatora elektrostatycznego (DEA) bez użycia klasycznych elektrod osadzanych na powierzchni materiału elastomerowego. W tym wypadku wykorzystano elektrody wirtualne, stworzone przez różnoimienne ładunki elektryczne, dynamicznie nanoszone i neutralizowane przy pomocy wyładowań koronowych bezpośrednio na przeciwnych powierzchniach elektroaktywnej błony elastomerowej. W celu uzyskania stabilności tego procesu oraz łatwej kontroli amplitudy odkształceń habilitant zastosował zasilanie elektrod ulotowych prostokątnym, bipolarnym sygnałem wysokonapięciowym o regulowanym współczynniku wypełnienia.



Badania habilitanta dotyczyły również efektów elektromechanicznych uzyskiwanych w materiałach ferroelektretowych o strukturze warstwowej (komórkowe folie EMFi o strukturze „ciasta francuskiego” – rys. 16) jak też w trójwarstwowych, zgrzewanych włókninach polipropylenowych. Habilitant zajmował się również badaniami piezoelektrycznych kompozytów ceramiczno-polimerowych Macro Fiber Composites (MFC), zarówno od strony ich właściwości elektrycznych jak i zastosowań jako aktuatory w konfiguracji jedno- i wielowarstwowego monomorfu. Natomiast wśród prac habilitanta dotyczących metrologicznych

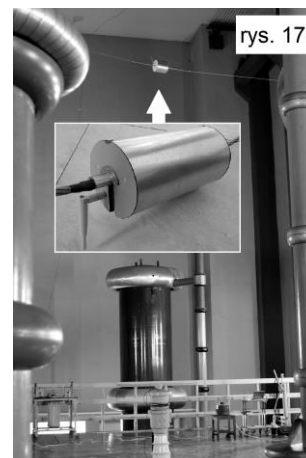
aspektów badań polimerów elektroaktywnych należy wymienić opracowanie prototypowego mikrodylatometru pojemnościowego z elektrodą pomiarową o pływającym potencjale. Rozwiązanie to, dzięki zasilaniu bateryjnymu i światłowodowemu transferowi danych pomiarowych, umożliwia pośredni pomiar zmian grubości pobudzanych wysokonapięciowo próbek polimerów elektroaktywnych poprzez pomiar przemieszczenia jednej z elektrod naniesionych na ten materiał w odniesieniu do stałej elektrody mikrodylatometru.

Zagadnienia związane z polimerami elektroaktywnymi habilitant badał w ramach kierowanego przez siebie projektu badawczego KBN nr N N510 2117 33 (Załącznik 5: pkt. II.J.1). Wynikiem tych prac badawczych były również:

- 3 artykuły opublikowane w czasopismach z bazy JCR (Załącznik 5: pkt. II.A.6–8),
- 7 angielskojęzycznych referatów i publikacji konferencyjnych (*1<sup>st</sup> Polish-Finnish Symposium on Functional Sol-Gel Materials* – Załącznik 5: pkt. II.L.8; *2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM 2007* – Załącznik 5: pkt. II.L.12; *12<sup>th</sup> International Conference on Mechanics and Technology of Composite Materials* – Załącznik 5: pkt. III.B.13–14; *13<sup>th</sup> International Workshop on High Voltage Engineering HVE 2006* – Załącznik 5: pkt. II.L.10; *3<sup>rd</sup> International Conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) Transducers & Artificial Muscles EURO-EAP 2013* – Załącznik 5: pkt. II.L.21 oraz *4<sup>rd</sup> International Conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) Transducers & Artificial Muscles EURO-EAP 2014* – Załącznik 5: pkt. II.L.22),
- 3 polskojęzyczne referaty i publikacje konferencyjne (*VI sympozjum EL-TEX 2004 Pola elektrostatyczne i elektro-magnetyczne – nowe materiały i technologie* – Załącznik 5: pkt. II.L.7; *VII Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW 2004* – Załącznik 5: pkt. II.L.6 oraz *IX Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW 2008* – Załącznik 5: pkt. II.L.13).

## 5.4 Harvesting energii

W okresie kilku ostatnich lat swojej pracy badawczej habilitant zajmował się również zagadnieniami związanymi z harvestingiem energii czyli pozyskiwaniem energii z otoczenia w celu bezbaterijnego, samowystarczalnego zasilania mikroelektronicznych urządzeń czujnikowych. W swoich doświadczalnych pracach badawczych habilitant wykorzystał harvesting energii m.in. do zasilania układów czujnikowych pracujących na podwyższonym potencjale. Należy tu wymienić np. eksperymentalny układ do pomiaru temperatury szyn prądowych w rozdzielnicach średnich napięć (SN), zasilany przez mikrogenerator termoelektryczny, czerpiący energię z różnicy temperatur pomiędzy szyną a otaczającym ją powietrzem. Kolejnym opracowanym i przetestowanym przez habilitanta rozwiązaniem było zastosowanie hybrydowego harvestera elektrostatyczno-piezoelektrycznego do zasilania zdalnego układu czujnikowego instalowanego bezpośrednio na napowietrznej linii SN (rys. 17).



Kolejnym przykładem – tym razem „niskonapięciowego” – zastosowania harvestingowania energii do zasilania układów czujnikowych jest opracowany przez habilitanta i przebadany w warunkach przemysłowych bezprzewodowy układ przeznaczony do systemów bezpieczeństwa ruchu przemysłowych bram segmentowych. System zasilania tego układu czerpie energię z ruchu segmentów bramy podczas jej opuszczania i podnoszenia eliminując konieczność stosowania (podlegającego częstym awariom) giętkiego połączenia elektrycznego lub wymiany baterii w zdalnym układzie czujnika krawędzi bramy. Harvesting energii to również idealne rozwiązanie problemu zasilania rozproszonych układów czujnikowych instalowanych we wnętrzach budynków. W tym zakresie habilitant opracował i przebadł doświadczalnie mikrogenerator czerpiący energię z ruchu drzwi podczas ich otwierania i zamykania. Urządzenie to podczas 2 miesięcy nieprzerwanych testów zasilало zdalny, mikroelektroniczny układ monitoringu parametrów powietrza, który wykonał w tym czasie – bez żadnego dodatkowego zasilania baterijnego czy też sieciowego – ponad 71 tys. pomiarów (czyli blisko 1 pomiar na minutę).

Habilitant prowadził prace badawcze związane z harvestingiem energii w ramach realizowanego wspólnie z firmą KMB Grupa Sp. z o.o. Sp. K. projektu „MOZART” (Załącznik 5: pkt. III.A.1). Wynikiem prac badawczych były również:

- 3 angielskojęzyczne referaty i publikacje konferencyjne (*14<sup>th</sup> International Conference on Optical and Electronic Sensors COE 2016* – Załącznik 5: pkt. III.B.22 oraz 23; *8<sup>th</sup> IEEE International Workshop on Environment and Electrical Engineering* – Załącznik 5: pkt. III.B.10),
- 2 referaty i publikacje konferencyjne (*VIII Konferencja naukowa „Postępy w Elektrotechnologii”* – Załącznik 5: pkt. II.L.22 oraz *XIV Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW’2018* – Załącznik 5: pkt. II.L.24).

## 5.5 Mikroprocesorowe układy pomiarowe i sterujące

Obszar zainteresowań badawczych i inżynierskich habilitanta obejmuje również mikroprocesorowe układy pomiarowe i sterujące. W wyniku prac koncepcyjnych i badawczych opracowany został m.in. mikroprocesorowo sterowany przetwornik do pomiarów natężenia stałych i wolnozmiennych pól elektrostatycznych, wyposażony w piezoelektryczny, kamertonowy aktuator poruszający przesłone elektrody pomiarowej. Układ ten umożliwia zdalny pomiar natężenia pola w zakresie  $\pm 10$  kV/cm w paśmie 0–7 Hz oraz cyfrowy transfer danych pomiarowych na dużą odległość poprzez interfejs RS485 w standardzie ModBus

(rys. 18). Opracowane zostały również mikroprocesorowe przystawki do tzw. młynków polowych (czyli mierników natężenia pola elektrostatycznego z wirującą przesłoną) pozwalające na stworzenie sieci takich mierników, umożliwiającej monitorowanie np. zmian natężenia ziemskiego pola elektrostatycznego oraz pól pochodzenia burzowego.



W ramach prac nad wysokoomowymi transferami rezystancji habilitant opracował również 2 prototypowe, sterowane mikroprocesorowo multipleksery wysokonapięciowe, przeznaczone do badania parametrów precyzyjnego, dwukanałowego źródła napięcia. Źródło to jest stosowane w precyzyjnym mostku aktywnym, zapewniającym spójność pomiarową wzorców dużych rezystancji w odniesieniu do kwantowego wzorca pierwotnego QHR poprzez wykorzystanie wysokoomowych transferów rezystancji.

Habilitant był również zaangażowany m.in. w opracowanie prototypowego, sterowanego mikroprocesorowo zestawu pomiarowego do badania charakterystyk zaniku ładunku na wyrobach włókienniczych według normy EN1149-3/2002, układu sterująco-pomiarowego do kalorymetru izoperibolicznego, układu do pomiaru prędkości pojazdów mechanicznych z czujnikami na bazie piezoprzewodów polimerowych, skomputeryzowanych układów do pomiarów termostymulowanej depolaryzacji (TSD) czy też – omówionego wcześniej – mobilnego, zautomatyzowanego układu do badania DGA gazów rozpuszczonych w oleju transformatorowym (pkt. 5.2), mikrodylatometru pojemnościowego z elektrodą pomiarową o pływającym potencjale (pkt. 5.3) czy też mikroelektronicznych urządzeń czujnikowych zasilanych poprzez harvesting energii (pkt. 5.4).

Zagadnieniem bezpośrednio związanym z mikroprocesorową techniką pomiarową była także – opracowana wraz z doktorantem (Załącznik 5: pkt. II.B.11 oraz III.K.2) – metoda kalibracji analogowych przyrządów pomiarowych, wykorzystująca cyfrową analizę dynamicznych obrazów kalibrowanego przyrządu w celu automatycznego ustalenia położenia jego wskazówki w stosunku do skali.

Habilitant zajmował się również praktyczną implementacją metody optoelektronicznego zasilania światłowodowego (Power over Fiber) mikroprocesorowych układów czujnikowych. Opracowany model takiego systemu, wykorzystujący laser półprzewodnikowy i wielomodowy światłowód plastikowy umożliwia pewne i bezpieczne zasilanie oraz niezakłócony transfer danych pomiarowych z układu mikroprocesorowego pracującego na potencjalnie 110 kV 50 Hz (np. na napowietrznej linii WN).

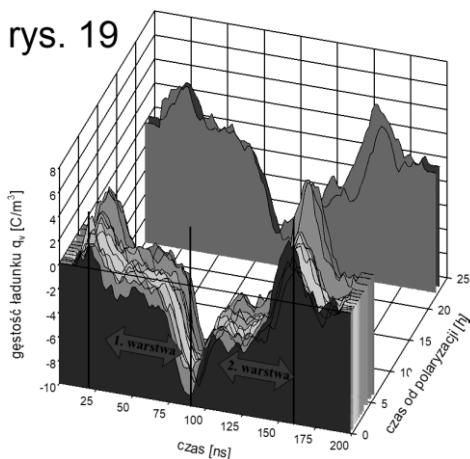
Habilitant prowadził prace związane z mikroprocesorowymi układami pomiarowymi i sterującymi m.in. w ramach projektu w Programie Badań Stosowanych NCBiR (Załącznik 5: pkt. II.J.10), w projekcie Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013 (Załącznik 5: pkt. II.J.8) czy też w projekcie Komitetu Badań Naukowych (Załącznik 5: pkt. II.J.3). Wyniki prac badawczych były również prezentowane jako:

- artykuł naukowy opublikowany w czasopiśmie z bazy JCR (Załącznik 5: pkt. II.A.1),
- 3 rozdziały w monografiach i książkach (Załącznik 5: pkt. II.E.3, II.E.5 oraz II.E.6),
- 4 artykuły naukowe opublikowane w czasopismach branżowych (Załącznik 5: pkt. II.E.1; II.E.2; II.E.4 oraz II.E.9),
- 2 angielskojęzyczne referaty i publikacje konferencyjne (*15<sup>th</sup> International Conference on Optical and Electronic Sensors COE 2018* – Załącznik 5: pkt. II.L.25; *International Conference on Clean, Efficient and Safe Urban Transport CESURA'03* – Załącznik 5: pkt. II.L.3).

## 5.6 Badania rozkładu ładunku przestrzennego w polimerach dielektrycznych

Habilitant uczestniczył również w pracach naukowych nad opracowaniem nowej metody E-j pozwalającej na badanie rozkładu ładunku przestrzennego w polimerowych materiałach dielektrycznych przy jednoczesnym rozróżnieniu ładunku swobodnego i polaryzacji. Ideą tej metody jest periodyczny pomiar rozkładu ładunku za pomocą metody impulsowej fali elektroakustycznej (SEA) w trakcie termicznie stymulowanej depolaryzacji (TSD) próbek dielektrycznych z jednoczesnym pomiarem zmian ich rezystywności. Habilitant opracował algorytm oraz implementację oprogramowania sterującego systemem akwizycji danych dla stanowiska pomiarowego E-j.

rys. 19



Metoda ta została następnie wykorzystana do badania dynamiki zmian rozkładu ładunku przestrzennego w kompozytach polietylen-montmorylonit a także do oceny ewolucji czasowej (rys. 19) oraz wpływu ładunku przestrzennego na interfacie warstwowych akrylowych polimerów elektroaktywnych na ich reakcję elektromechaniczną.

Powyższe prace związane z badaniami rozkładu ładunku były prowadzone w ramach projektów badawczych KBN (Załącznik 5: pkt. II.J.1 oraz II.J.3). Wynikiem tych prac były również:

- artykuł opublikowany w czasopiśmie z bazy JCR (Załącznik 5: pkt. II.A.5),
- artykuł opublikowany w czasopiśmie branżowym (Załącznik 5: pkt. II.E.7),
- 3 angielskojęzyczne referaty i publikacje konferencyjne (*6<sup>th</sup> International Conference on Electric Charges in Non-Conductive Materials* – Załącznik 5: pkt. II.L.9; *2<sup>nd</sup> International Conference Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM 2007* – Załącznik 5: pkt. III.B.5 oraz *12<sup>th</sup> International Conference on Mechanics and Technology of Composite Materials* – Załącznik 5: pkt. III.B.14).

Paweł Żyłka

Paweł Żyłka

*Uwaga: wszystkie hiperłącza użyte w niniejszym Autoreferacie były aktualne w chwili składania wniosku habilitacyjnego.*