

dr hab. inż. Ireneusz Jabłoński, prof. uczelni
Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wroclawska

Wroclaw, dnia 18 wrzesnia 2023 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wplynelo dnia 21. 09. 2023

Zarejestrowano pod nr

Podpis dm

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Daniola,
pt.: „Zasilanie medycznych systemów internetu rzeczy w srodowisku sterylizacji para
wodna”

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Ryszard Sroka, prof. AGH

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Piotr Burnos, prof. AGH

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję wykonano w odpowiedzi na uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, podjętą w dniu 6 lipca 2023 roku (pismo Przewodniczącego RDN AEEiTK, dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. uczelni z dnia 6.07.2023 r.).

1. Rozwiązywany problem naukowy

Tematyka przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej dotyczy zasilania czujników wbudowanych w urządzenia i kontenery chirurgiczne podlegające procesowi sterylizacji parą wodną. Dla tak zdefiniowanego zakresu zainteresowań i zastosowań sformułowano szereg zagadnień stanowiących wyzwania o charakterze poznawczym, a przy tym torujących dostęp do rozwiązań technicznych umożliwiających akwizycję i analizę danych w srodowisku Internetu Rzeczy Medycznych (ang. *Internet of Medical Things*), np. możliwość i efektywność zasilania czujników w różnych scenariuszach sterylizacji urządzeń medycznych, realizowalność, wydajność oraz utrzymanie systemów generacji i akumulacji energii elektrycznej w zadanych warunkach, uwzględniając rozwiązania bateryjne i/lub zjawiska odzyskiwania energii z otoczenia (ang. *energy harvesting*), rozwiązania dedykowane akwizycji, transmisji i przetwarzaniu danych w czujnikach i urządzeniach pracujących jako terminale w strukturze sieciowej (ang. *edge devices*). W istocie, obiektywne udokumentowanie eksperymentalne sformułowanego celu i pytań badawczych, przy zadanych ograniczeniach (motywowanych biznesowo), wymagało także opracowania i zrealizowania oryginalnego zadania pomiarowego dla warunków sterylizacji urządzeń medycznych parą wodną, które może być wykorzystane do wyspecyfikowania i budowy produkcyjnych urządzeń i systemów pomiarowych funkcjonujących w strukturze Internetu Rzeczy Medycznych, wpisującej się w ideę Szpitala 4.0 (ang. *Hospital 4.0*). Reasumując, powyższe jest interesującym zagadnieniem o charakterze naukowym i dużym znaczeniu praktycznym. Rozwiązanie zadania polegało na wykorzystaniu usystematyzowanej wiedzy teoretycznej, faktów doświadczalnych i specyfikacji dostępnych na rynku rozwiązań sprzętowych komponentów elektronicznych i mechanicznych do sformułowania oryginalnej koncepcji zasilania czujników wbudowanych w urządzenia medyczne i kontenery podlegające sterylizacji parą wodną, a dalej na realizacji logicznie spójnego eksperymentu, uwzględniającego budowę autorskiego stanowiska badawczego i pomiarowego, implementującego zamierzoną konstrukcję układu generacji i

akumulacji energii elektrycznej (wg zidentyfikowanych uprzednio kryteriów użytkowych), umożliwiającego kontrolowane zadawanie pobudzenia temperaturowego, wiarygodną rejestrację odpowiedzi obserwowanego układu fizycznego, a także prowadzenie analiz sygnałów wyjściowych. Zrealizowane czynności poznawcze i konstrukcyjne dotyczą współpracy Doktoranta z firmą Aesculap A.G., Niemcy. Przy tym wartościową cechą prowadzonych analiz i formułowanych rozwiązań jest ich relatywna (i dopuszczalna) prostota, gwarantująca udzielanie bezpośrednich i wiarygodnych odpowiedzi na złożone zagadnienia. Choć Doktorant dostrzegł potrzebę uwzględnienia zagadnień materiałowych i związanych z wpływem procesów starzenia na operowanie opracowywanego rozwiązania technicznego, to nie są one przedmiotem analiz w recenzowanej rozprawie doktorskiej, natomiast wskazano na nie jako przyczynki przyszłych badań.

W rozprawie nie sformułowano wprost tezy, natomiast wskazano na motywację do pojęcia tematyki, główne pytanie badawcze (ang. *research questions*) oraz towarzyszące mu cztery szczegółowe pytania badawcze i cztery ograniczenia (ang. *industrial constraints*) podyktowane wymaganiami potencjalnego wdrożenia do produkcji. **Główne pytanie badawcze** sformułowane w rozprawie brzmi: „Czy możliwe jest opracowanie wiarygodnego źródła zasilania czujników do zastosowań w inteligentnych narzędziach chirurgicznych podlegających sterylizacji parą wodną?”. Pytanie sformułowano poprawnie, a jego treść zawiera kontekst o znaczeniu celu pracy oraz hipotezy. Za Autorem pytania (Doktorantem) można bowiem stwierdzać o celu polegającym na opracowaniu źródła zasilania czujników do zastosowań w inteligentnych narzędziach chirurgicznych podlegających sterylizacji parą wodną i ocenie efektywności takiego źródła zasilania w zadanych warunkach pracy. Kontynuując, teza brzmiałaby, np.: „Możliwe jest opracowanie wiarygodnego źródła zasilania czujników do zastosowań w inteligentnych narzędziach chirurgicznych podlegających sterylizacji parą wodną”. Podane pytanie badawcze implikuje potrzebę badań podstawowych i stosowanych w zakresie podstaw fizykochemicznych generacji energii elektrycznej w warunkach sterylizacji parą wodną, z uwzględnieniem dotychczasowego stanu wiedzy oraz dostępnych rozwiązań technicznych dedykowanych do takiego celu. Faktycznie, w pracy zrealizowano ścieżkę badań stosowanych, obejmujących koncepcję generacji energii elektrycznej wykorzystującą znane zjawiska Seebecka i Peltiera oraz autorską konstrukcję układu termo-mechanicznego zapewniającego kontrolowany przebieg zjawisk termicznych, maksymalizujących efektywność konwersji gradient temperatury-różnica potencjałów elektrycznych. Wynik ten stanowi oryginalny wkład mgr. Daniała w optymalizację efektywności układów zasilania czujników o niskim zapotrzebowaniu na energię, który może być weryfikowany, np. w odniesieniu do rozwiązań układów zasilania mikro-/nanourządzeń elektrycznych. Sformułowane pytania szczegółowe odnoszą się do zagadnień podstawowych, np. RQ3, RQ4 i częściowo RQ1 oraz stosowanych – RQ2 i częściowo RQ1. Postulowane ograniczenia biznesowe, rzutujące na rozwiązania konstrukcyjne, nie niosą bezpośrednio wartości poznawczej, choć stanowią wyzwanie motywujące do poszukiwania oryginalnych koncepcji o charakterze podstawowym z możliwymi zastosowaniami, np. bezobsługowe układy zasilania pracujące w relatywnie długim okresie czasu w warunkach zwiększonej inwazyjności środowiskowej.

Pozytywnie należy ocenić perspektywy rozwoju tematyki w sensie postawionych w dysertacji pytań badawczych, ale także wyłaniającej się w literaturze koncepcji bezbateryjnych węzłów czujnikowych (ang. *battery-free Internet of Things*) jako elementów składowych struktury sieciowej, a także różnych jej realizacji technicznych, np.:

Jiang T., et al.: *Backscatter communication meets practical battery-free Internet of Things: a survey and outlook*. IEEE Communications Survey & Tutorials, vol. 25, no. 3, 2023.

W istocie, o opracowanej w rozprawie doktorskiej przez mgr. inż. Mateusza Daniała koncepcji, metodach i wynikach można mówić nie tylko w ogólnej kategorii podanej przez Autora –

Internet of Medical Things (IoMT), ale właśnie we wskazywanej, wyłaniającej się gałęzi prac badawczo-rozwojowych, tj. *battery-free Internet of Medical Things*. Mówiąc o perspektywach rozwoju tematyki, uzasadnionym jest odwołanie się także do kolejnego paradygmatu rozwijanego w obrębie projektowania sieci wieloczujnikowych na potrzeby efektywnego monitorowania i zarządzania złożonymi systemami – przetwarzanie brzegowe (ang. *Edge computing*) w urządzeniach na krawędzi/terminalnych w strukturze sieciowej (ang. *Edge devices/sensors*), aż po koncepcje układów cyber-fizycznych (ang. *cyber-physical systems*), istotnych w świetle materializacji, np. koncepcji Szpital 4.0/Przemysł 4.0/Przemysł 5.0 (ang. *Hospital 4.0/Industry 4.0/Industry5.0*). W opinii recenzenta, wypracowane przez Doktoranta rozwiązania i wzbogacone w drodze realizacji pracy doktorskiej kompetencje, dotyczące zarówno projektowania i budowy (bezbaterijnych) układów zasilania zminiaturyzowanych czujników (tutaj: do zastosowań medycznych), jak również metod pomiarowych i systemów komunikacji, umożliwią identyfikowanie w okresie podoktorskim kolejnych oryginalnych wyzwań poznawczych oraz definiowanie nowych możliwości i wymagań technicznych usprawniających pracę zminiaturyzowanych urządzeń klasy IoMT/IoT.

2. Charakterystyka rozprawy

Praca ma charakter badawczy (badania stosowane), z dobrze zarysowanymi podstawami teoretycznymi i kompletnym protokołem eksperymentalnym. Jej istotą jest opracowanie metodologii dla projektowania efektywnych i nie wymagających utrzymania układów zasilania medycznych urządzeń chirurgicznych podlegających sterylizacji parą wodną.

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Daniola, obejmująca 187 stron, składa się z trzynastu wyróżnionych części.

Praca rozpoczyna się nienumerowanym „Streszczeniem” w języku polskim i angielskim, „Spisem treści” oraz wykazem oznaczeń.

Numerowany **Rozdział 1** – „Cele badawcze” (ang. „*Research Aims*”) w sposób syntetyczny definiuje tematykę badań podjętą przez Doktoranta. Uzasadniając potrzebę rozwoju układów zasilania węzłów czujnikowych o małym zapotrzebowaniu energii elektrycznej, Autor stawia główne pytanie badawcze (ang. *research question* – RC) oraz cztery pytania pomocnicze. Kierując swoje rozważania na wypracowanie rozwiązań użytkowych, dodano cztery ograniczenia biznesowe/przemysłowe (ang. *industrial constraint* – IC) wynikające z praktycznych zastosowań i odnoszące się, np. do możliwości wykorzystania wyników badań w masowej produkcji, niezawodności, małych/braku wymagań co do procesu utrzymania, kompatybilności rozwiązania z koncepcją IoMT.

Postawione pytania badawcze oraz zdefiniowane ograniczenia są adekwatne do zagadnień omawianych w rozprawie. Dobrym rozwiązaniem mogłoby być natomiast poprzedzenie Rozdziału 1 wstępem przynoszącym ogólną charakterystykę zagadnień i umiejscowienie podejmowanej problematyki w szerokim spektrum wiedzy i rozwiązań technicznych, analogicznie jak uczyniono to w **Rozdziale 2** „Szeroki wgląd – umiejscowienie zagadnień z pracy doktorskiej w ekosystemie IoMT” (ang. *Broad View – Place for the PhD Thesis in the IoMT Ecosystem*), w szczególności na Rys. 2.1. Odtwarzając w rozdziale 2 architekturę układu pracy urządzeń w systemie IoMT, zminimalizowano ewentualne kwestie wątpliwe dotyczące wymagań konstrukcyjnych i użytkowych, co koresponduje z możliwymi ograniczeniami przemysłowymi (IC), np. związanych z współpracą z układami pamięci i przetwarzaniem danych vs obliczenia w chmurze, itp.

Rozdział 3 „Wprowadzenie” (ang. *Introduction*) omawia podstawowe zagadnienia warunkujące motywację do podjęcia badań w wyznaczonej tematyce. W tej części następuje ponowne (względem rozdziału 1) ustanowienie celu i zakresu pracy – patrz np. punkt 3.1 „Aim and Scope”. W zdaniu poprzedzającym wskazaną sekcję wyrażono także, że celem pracy jest znalezienie takiego rozwiązania problemu zasilania elektroniki czujnikowej umieszczonej w chirurgicznym pojemniku do sterylizacji, po czym w punkcie 3.1 na nowo postawiono cel pracy. Uzasadnionym byłoby zatem sformułowanie celu pracy w jednym miejscu w rozprawie i unikanie namnażania rodzaju uzupełnień czy alternatyw. W dalszej części rozdziału, tj. w podrozdziale 3.2 w zwięzły sposób streszczono strukturę rozprawy doktorskiej oraz jej zawartość, opatrując w rozdziale 3.3 relację pisemną diagramem strukturyzującym podejmowane problemy badawcze i konstrukcyjne względem treści kolejnych rozdziałów – Rys. 3.1. Jest to użyteczny zabieg redakcyjny, ułatwiający przyswajanie omawianych zagadnień oraz nawigowanie w przedłożonym do recenzji dokumencie.

Rozdział 4 „Środowisko pracy” (ang. *Work Environment*) odtwarza cechy środowiska pracy medycznych urządzeń chirurgicznych, ich cykl życia oraz systematyzuje wiedzę na temat najpopularniejszych metod sterylizacji komponentów chirurgicznych, rzutuując na założenia konstrukcyjno-użytkowe opracowywanego rozwiązania w klasie urządzeń IoMT. Omawiane zagadnienia mają charakter interdyscyplinarny, co wyraża także umiejętności i sposób pracy Doktoranta. Bazując na pozyskanej wiedzy zestawionej z założeniami i ograniczeniami konstrukcyjno-użytkowymi, w podsumowaniu tej części rozprawy doktorskiej wskazano, że rozważania będą kontynuowane tylko dla metody sterylizacji parą wodną oraz suchym, gorącym powietrzem.

Rozdział 5 „Układy akumulacji energii – stan wiedzy” (ang. *Energy Storage Systems – State of the Art*) systematyzuje fakty dotyczące zagadnień podstawowych w zakresie elektrochemicznych metod akumulacji energii elektrycznej. Listuje przy tym dostępne na rynku rozwiązania konstrukcyjne, specyfikując ich właściwości i odnosząc do wymagań biznesowych (IC) zdefiniowanych w rozdziale 1. Wynikiem przeprowadzonych analiz literaturowych i bazujących na dokumentacji technicznej producentów jest wybór do dalszych prac superkondensatora litowo-jonowego jako możliwego rozwiązania dla stopnia konstrukcyjnego dedykowanego akumulacji energii. Jednocześnie, zrekonstruowany przez mgr. inż. Daniola stan wiedzy i techniki skłonił go do uzasadnionej decyzji o potrzebie poszukania rozwiązania konstrukcyjnego bazującego na fizycznych zjawiskach pozyskania wolnodostępnej energii w ekosystemie pracy projektowanego urządzenia (ang. *Energy harvesting*) IoMT dla zastosowań w chirurgii i podlegającego sterylizacji parą wodną. Biorąc pod uwagę specyfikę współczesnych rozwiązań użytkowych, szczególnie w zastosowaniach do układów niskiej mocy, Autor dopuszcza możliwość zorganizowania zintegrowanego układu pracy związanego z pozyskaniem i jednocześnie akumulacją energii elektrycznej w warunkach pracy czujnika IoMT.

Rozdział 6 „Pozyskanie energii w warunkach pracy urządzenia chirurgicznego” (ang. *Energy Harvesting in Surgical Tool Workflow*) rozpoczyna się omówieniem specyfiki wykorzystania, warunków i cyklu pracy medycznych urządzeń chirurgicznych. W ten sposób, wychodząc w budowanej narracji od szerokiego spektrum zagadnień i metod pozyskania wolnodostępnej energii elektrycznej – patrz schemat z Rys. 6.1, analizy wstępnie zawężono do sześciu technik biorąc pod uwagę kontekst użytkowy opracowywanego rozwiązania. W dalszej części rozprawy – podrozdziały 6.2 i 6.3 – skupiono się już wyłącznie na metodach konwersji dostępnej w procesie sterylizacji termicznej energii cieplnej na energię elektryczną. Omówiono m.in. koncepcję generatora termoelektrycznego (ang. *thermoelectric generator* – TEG),

włączając podstawy zjawisk fizycznych, ich modele fizyko-matematyczne, zagadnienia konstrukcyjno-materiałowe istotne dla optymalizacji wydajności generatorów TEG, a także dokonano przeglądu dostępnych rynkowo termoelektrycznych generatorów, listując producentów i specyfikując podstawowe charakterystyki oferowanych komercyjnie układów – Tab. 6.3. Systematyzując fakty odnoszące się do opisywanych w literaturze naukowej i branżowej zastosowań TEG, mgr inż. Mateusz Daniol poprawnie stwierdził, że brak jest doniesień wskazujących na wykorzystanie tego typu rozwiązań jako integralne komponenty instrumentarium chirurgicznego. Jak udokumentowano, autorskie doniesienia Doktoranta i zespołu (AGH oraz Aesculap A.G.) są w tym względzie pionierskie, a o innowacyjności proponowanych rozwiązań zaświadczaają zgłoszone i uzyskane patenty. Stanowi to także o oryginalnym i znaczącym wkładzie Autora w dyscyplinę Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Dla precyzji stwierdzeń poczynionych w ostatnim akapicie rozdziału 6.3 można by ewentualnie precyzyjniej wskazać na urządzenia medyczne podlegające sterylizacji, co jest przedmiotem pracy, jako że zastosowania w szerokorozumianych urządzeniach chirurgicznych mogą rodzić dodatkowe pytania, zważywszy na dotychczasowe rozumowanie prowadzone w dysertacji.

Rozdział 6 podsumowano wyborem modułu TEG bazującego na technologii Bi₂Te₃, mając na względzie charakterystyki wydajnościowe układu oraz jego dostępność rynkową.

Rozdział 7 „Wymagania wstępne” (ang. *Initial Requirements*) listuje wymagania biznesowe i konstrukcyjne dla opracowywanego rozwiązania, istotnie motywowane przez partnera przemysłowego – firmę Aesculap A.G. Taka część pracy nie przynosi bezpośrednio oryginalnego wkładu, natomiast determinuje warunki brzegowe analiz i prac konstrukcyjnych, co może rzutować na pozyskanie nowej wiedzy. Należy zauważyć, że rozdział 7 nawiązuje bezpośrednio do treści rozdziału 1 i rozdziału 3, co jak komentowano uprzednio można by zreorganizować w postać integralnej części pracy.

Rozdział 8 „Prototyp systemu” (ang. *System Prototype*) przynosi fakty na temat przyjętej w rozprawie koncepcji generacji energii elektrycznej dla czujników zintegrowanych z narzędziami chirurgicznymi podlegającymi sterylizacji parą wodną, co w pracy zademonstrowano dla czujnika temperatury. Opisano także założenia dla oryginalnej konstrukcji układu termo-elektro-mechanicznego, z blokiem akumulacji energii termicznej (ang. *heat storage unit* - HSU) i warstwą izolacji termicznej zwiększającej wydajność procesu pozyskiwania energii z otoczenia czujnika, specyfikując zarazem szczegóły pracy w odniesieniu do faz sterylizacji (w szczególności do regionu *plateau* charakteryzującego się możliwie kontrolowaną stabilnością warunków termicznych) i dotyczące wyboru materiału na izolację. Definiując umiejętnie wymagania konstrukcyjne, uzasadnionym stał się ilościowy opis procesu przeładowania pojemności izolowanej masy termicznej w fazie sterylizacji i po zakończeniu „aktywnego” procesu sterylizacji, gdy gradient temperatury w układzie autoklawy zmienia kierunek polaryzacji.

Dla sformułowanej w rozdziale 8 koncepcji układu generacji, kolejno zalgorytmizowano proces ilościowego opisu zjawisk obowiązujących w zaplanowanej konstrukcji, co stanowi o zrelacjonowanym 8-miokrokowym planie badań, uwzględniającym m.in. prototypowanie, budowę cyfrowego bliźniaka (ang. *Digital twin*) układu termoelektrycznej generacji energii elektrycznej dla czujnika typu IoMT i zjawisk w zachodzących w takim układzie, prace symulacyjno-estymacyjne (włączając symulacje komputerowe i modele fizyczne układu), optymalizację konstrukcji termo-elektro-mechanicznej. Należy podkreślić, że opis ilościowy zjawisk obowiązujących w granicach rozważanego układu fizycznego jest sam w sobie zagadnieniem złożonym, wymagającym wiedzy i umiejętności, a także wypracowania

oryginalnych rozwiązań w zakresie konstrukcji instrumentarium pomiarowego. Wskazuje to na dojrzałość mgr. inż. Mateusza Daniała jako badacza i inżyniera konstruktora.

Wielokryterialne analizy przeprowadzone przez Doktoranta doprowadziły go do wyboru układu RF430FRL152H, jako przykładu urządzenia (czujnika) przystosowanego do pracy w warunkach sterylizacji parą wodną. Dla takiego układu wyznaczono zoptymalizowane warunki pracy w trybie niskiego poboru mocy (dalsze analizy prowadzono dla tzw. trybu aktywnego – LPM0 i pasywnego – LPM3), dobrano generator termoelektryczny spośród rozwiązań oferowanych komercyjnie – Ferrotec Nord TMG-127-0.4-16 oraz materiał izolacyjny – Active Aerogel Silfoam.

Rozdział 9 „Model fizyczny i charakteryzacja TEG” (ang. *Physical Model and TEG Characterisation*) traktuje o metodach i narzędziach wykorzystanych do ilościowego opisu fizycznego modelu układu zasilania czujnika pracującego w równoważnych warunkach sterylizacji parą wodną (imitujących sterylizację narzędzi chirurgicznych w szpitalu), zrealizowanego w postaci stanowiska laboratoryjnego integrującego autorską konstrukcję systemu termo- mechanicznego z komercyjnym generatorem TEG oraz torem pomiarowym uwzględniającym, m.in. czujniki temperatury, narzędzia pomiarowe i oprogramowanie umożliwiające akwizycję danych. Zdefiniowano miary błędów i oszacowano ich wielkości w badanym układzie. W wyniku przeprowadzonych czynności ustalono, że współczynnik Seebecka generatora TEG ma o około 10% mniejszą wartość aniżeli deklarowana przez producenta, co uwzględniono w analizach porównawczych zrelacjonowanych w kolejnym kroku odnosząc się do oszacowań poczynionych w zbudowanych modelach symulacyjnych.

W **Rozdziale 10** „Symulacje” (ang. *Simulations*) opracowano model 3D złożonego układu przewodnictwa termicznego i konwersji termo-elektrycznej, uwzględniając charakterystyki geometryczno-materiałowe układu składającego się z aluminiowej obudowy, wewnętrzną izolację, moduł generatora termoelektrycznego, blok akumulacji energii termicznej. Wykorzystano w tym celu techniki modelowania bazujące na metodzie elementów skończonych (ang. *finite element method*), procedury dedykowane do obliczeń w zagadnieniach mechaniki płynów i umożliwiające numeryczne analizy termiczne. Dla modułu generatora termoelektrycznego zbudowano fizyko-matematyczny model o parametrach skupionych, umożliwiający symulacje zjawisk konwersji termo-elektrycznej w środowisku SPICE. W tym przypadku, sformułowano kryteria biznesowe dla analogu TEG, co skłoniło Doktoranta do wyboru modelu Kubova, jako adekwatnej reprezentacji fizycznego urządzenia.

Istotną wartością badań zaproponowanych, przeprowadzonych i zrelacjonowanych przez mgr. inż. Daniała w rozdziale 10 jest możliwość separacji charakterystyk pracy układu generatora termoelektrycznego od charakterystyk pracy konstrukcji termo-mechanicznej, co przynosi użytkową korzyść polegającą na możliwości optymalizacji pracy układu, np. doboru odpowiednich cech geometryczno-materiałowych bloku akumulacji energii termicznej (HSU) i warstwy izolacji. Ma to znaczenie nie tylko w zakresie oceny ilości „dostępnej” energii do przetworzenia i sprawności konwersji gradient temperatury-różnica potencjałów elektrycznych, ale także dla optymalizacji całego układu zasilania czujnika pracującego w warunkach sterylizacji parą wodną, włączając maksymalizację wydajności pracy układu z uwzględnieniem zmiany kierunku polaryzacji gradientu temperatury (zależnej od wiarygodnej identyfikacji progów gradientu temperaturowego, wyznaczających plusenergetyczne warunki zasilania dla elektroniki czujnikowej, a także momentu ich przekroczenia, co implikuje wiarygodne wyznaczenie regionów o dodatnim bilansie energetycznym wynikającym z konwersji termoelektrycznej w TEG).

Kolejne dwa rozdziały dysertacji przynoszą główny wkład o charakterze poznawczym i użytkowym poczyniony przez mgr. inż. Mateusza Daniolę.

Rozdział 11 „Wyniki i weryfikacja” (ang. *Results and validation*) dostarcza wyników symulacji cyfrowego bliźniaka układu zasilania czujnika pracującego w warunkach sterylizacji parą wodną i wykorzystującego konwersję energii termicznej dostępnej w swoim otoczeniu w energię elektryczną. Informacje pochodzące z symulacji komputerowych (parametryzacja zastosowana podczas badań odpowiada charakterystykom „rzeczywistego” analogu laboratoryjnego) porównano z pomiarami przeprowadzonymi w modelu fizycznym. Średni błąd względny symulacji pracy układu w modelu wirtualnym (w zakresie gradientu temperatury 0-80 °C, właściwego dla warunków pracy symulowanego układu z TEG), wyrażony estymowanymi wartościami napięcia, prądu i mocy, nie przekraczał 2.46% (dla oszacowanego prądu), natomiast maksymalna wartość błędu względnego w mierzonym zakresie gradientu temperatury w TEG (0-80 °C) wyniosła 7.42% w przypadku symulacji zmian napięcia wyjściowego. Przedstawione wyniki są wiarygodne i zapewniają dokładność wymaganą do analizy zjawisk składowych obowiązujących podczas konwersji termoelektrycznej w układzie, którego autorską koncepcję postulowano w rozdziale 8 „Prototyp systemu”.

Podrozdział 11.4 relacjonuje wyniki symulacji charakterystyk wejściowo-wyjściowych oraz konfiguracyjno-wydajnościowych układu zasilania elektroniki czujnikowej, wykorzystującego konwersję termoelektryczną dla zadanych elementów konstrukcji i warunków sterylizacji parą wodną, równoważnych sterylizacji narzędzi chirurgicznych. Przeprowadzone badania miały charakter analiz czynnikowych i przyniosły ogólne fakty na temat zmiany profilu wydajnościowego modułu TEG (na podstawie zarejestrowanej zmiany gradientu temperatury jak na Rys. 11.9) w całym procesie sterylizacji narzędzi chirurgicznych parą wodną (czas symulacji 2000 [s] obejmował wszystkie fazy procesu sterylizacji). Główny wniosek z tej części badań dotyczy możliwości wykorzystania konwersji energii na potrzeby zasilania czujnika nie tylko z fazy *plateau* sterylizacji, lecz również z pozostałych faz. Aby ocenić efektywność układu zasilania wprowadzono współczynniki MAPE i $\Delta T_{A\%}$, kwantyfikujące odpowiednio odstępstwo profilu krzywej gradientu temperatury na poziomie TEG w odniesieniu do krzywej zmiany temperatury w autoklawie oraz względną ilość czasu kiedy gradient temperatury generatora termoelektrycznego TEG przewyższał minimalne wymagania dla pracy czujnika w trybie aktywnym LMP0 (wymagane 1.674 mW), w całym cyklu sterylizacji. Analiza czynnikowa dla tak zdefiniowanych miar oceny pracy układu zasilania czujnika w warunkach sterylizacji parą wodną wykazała, że możliwe jest teoretyczne i praktyczne zrealizowanie układu implementującego autorską koncepcję z rozdziału 8, dla konfiguracji z odpowiednio dobraną grubością izolacji i wymiarami bloku akumulacji energii termicznej (HSU), w której względny czas generacji (dostępności) zasilania w relacji do zapotrzebowania na moc wybranego czujnika wynosi 100%, tj. dla pełnego cyklu sterylizacji narzędzi chirurgicznych parą wodną. **Tym samym uzyskano pozytywną odpowiedź na główne pytanie badawcze** postawione w dysertacji. Dodatkowo, w drodze przeprowadzonych symulacji komputerowych wywnioskowano, że efektywność konwersji termoelektrycznej w postulowanym układzie zasilania jest bardziej wrażliwa na wartość wysokości HSU aniżeli na grubość izolacji termicznej. Takie spostrzeżenie można wykorzystać do optymalizacji pracy układu zasilania, ale także w projektowaniu zminimalizowanych (co do wymiarów geometrycznych), efektywnych układów zasilania czujników zintegrowanych z narzędziami chirurgicznymi podlegającymi sterylizacji parą wodną.

Rozdział 12 „Symulowana moc wygenerowana podczas sterylizacji parą wodną” (ang. *Simulated Power Generation during Steam Sterilization*) bazuje na metodach i narzędziach opracowanych w poprzednich częściach dysertacji. Doktorant zalgorytmizował i zintegrował

je w zwarty ciąg symulacji oraz przetwarzania danych prowadzący do estymacji mocy wygenerowanej w układzie generacji bazującej na pozyskaniu energii z pola temperaturowego należnego procesowi sterylizacji parą wodną i jej konwersji do postaci energii elektrycznej – patrz diagram z Rys. 12.1. W kolejnych krokach przeprowadzono analizy optymalizacyjne ukierunkowane na zidentyfikowanie najmniejszych wymiarów geometrycznych układu zasilania, dla których możliwe będzie spełnienie warunku dostarczenia ilości mocy wymaganej do zasilania modułu czujnika pracującego w trybie minimalnego zużycia energii. Jako kroki pośrednie rozważono konfiguracje układu z oraz bez bloku akumulacji energii (ang. *Energy storage system* – ESS; tutaj: superkondensator litowo-jonowy), tryby pracy czujnika: aktywny (LMP0) oraz pasywny (LMP3), wysokość HSU od 5 mm do 20 mm z krokiem co 2,5 mm oraz grubość izolacji termicznej 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm. Dla wszystkich przypadków szacowano ilość wygenerowanej mocy i wyznaczano bilans mocy dla kolejnych (trzech) faz sterylizacji, a więc uwzględniając odwrócenie polaryzacji gradientu temperatury. Niezależnie, poczyniono szczegółowe analizy bilansu energetycznego zaprojektowanego układu zasilania operującego w fazie plateau (także w funkcji spełnienia kryterium zapewnienia minimalnej mocy wymaganej w układzie elektronicznym czujnika, odniesionego do procentowego wypełnienia czasu trwania tej fazy).

Zrelacjonowane w rozprawie doktorskiej analizy, ich wielowymiarowy charakter, dokładność wglądu oraz zaprezentowane wyniki **przyniosły odpowiedzi na sformułowane w niej pytania cząstkowe**, co skomentowano w **Rozdziale 13** „Podsumowanie” (ang. *Summary*). Uwzględnione przez mgr. inż. Mateusza Daniola założenia podczas budowy modeli (wirtualnego i fizycznego), wybrane do badań warunki pracy układu zasilania i symulacji oraz zaprojektowane metody eksploracji danych eksperymentalnych **legitymizują stwierdzenie o spełnieniu ograniczeń biznesowych**. Podsumowując czynności przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej Autor wskazał na dziewięć faktów wyrażających jego oryginalny wkład, naszkicował możliwe kierunki dalszego rozwoju podjętej w rozprawie tematyki, wylistował zgłoszone i uzyskane patenty (osiem) oraz dwa artykuły opublikowane w czasopismach naukowych indeksowanych na liście MNiSzW.

Zawartość rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Daniola uzupełnia pięć **Dodatków** (ang. *Appendix A-E*) oraz bogaty spis wykorzystanej **Literatury** (ang. *Bibliography*) zawierający 167 pozycji.

Ponadto, dysertacja zawiera Stronę tytułową (w języku angielskim i języku polskim), oraz stronę z dedykacją.

Pracę napisano ładnym językiem angielskim, na dobrym poziomie edycyjnym, z nielicznymi błędami interpunkcyjnymi, literowymi i językowymi. Wybrane, najważniejsze uchybienia natury językowej i edycyjnej wylistowano w dalszej części recenzji.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Analiza stanu wiedzy

Doktorant dokonał prawidłowego rozeznania literaturowego w obszarze tematycznym pracy, zarówno względem badanych/wykorzystywanych zjawisk, jak i metod oraz narzędzi ich jakościowego i ilościowego pomiaru, wniosków z badań relacjonowanych w piśmiennictwie krajowym i międzynarodowym, zastosowań, co pozwoliło na właściwe określenie ram pracy doktorskiej w stosunku do aktualnego stanu wiedzy. Efekt tych starań ilustruje znaczący wykaz wykorzystanej literatury (167 pozycji), zawierający ok. 80% publikacji z ostatniej dekady.

Starsze pozycje dotyczą głównie podstawowych zagadnień fizycznych, wprowadzających do metod sterylizacji narzędzi chirurgicznych, zjawisk fizycznych towarzyszących konwersji termoelektrycznej, technik pomiaru wielkości nieelektrycznych, zagadnień akumulacji energii czy materiałowych. Wyniki przeprowadzonych studiów literaturowych widać przede wszystkim w rozdziałach od trzeciego do szóstego, w których przedstawiono szeroki kontekst podejmowanej tematyki i motywację do podjęcia badań w zakresie zdefiniowanym rozprawą doktorską, omawiane są podstawy teoretyczne i przesłanki praktyczne dotyczące metod sterylizacji narzędzi chirurgicznych, metody i układy akumulacji energii elektrycznej na potrzeby zasilania węzłów czujnikowych, metody i układy pozyskiwania ogólnodostępnej energii w otoczeniu urządzeń elektronicznych. Dalsze wzbogacenie argumentacji przedstawianej w dysertacji, poprzez odwołania do wiedzy zastanej, byłoby wskazane przede wszystkim tam, gdzie Autor korzysta z matematycznych opisów znanych praw fizycznych – np. informacje podane w podrozdziale 6.2, czy w przypadku posługiwania się faktami zaczerpniętymi z not katalogowych i dokumentacji producentów – np. Tabela 8.3, Tabela 8.9, Rysunek 6.2, Rysunek 6.4, Rysunek 8.3, stwierdzenia typu: „*Thermal conductivity, examined in a number of publications and entries, ranges from 1,25 to almost 2.11 W·m⁻¹·K⁻¹. The specific heat, on the other hand, varies from 165 to nearly 200.*”, itd. Bez względu na wskazany potencjał do dalszego udoskonalenia redakcyjnego prowadzonej w dysertacji narracji, bogata lista cytowanego piśmiennictwa wskazuje na gruntowne rozeznanie Autora w podejmowanym polu badawczym, o rodowodzie w naukach podstawowych i stosowanych.

Metody badawcze

Mgr. inż. Mateusz Daniol właściwie dobierał metody badawcze na potrzeby rozwiązania postawionego problemu. Warto zauważyć, iż dotyczą one zarówno metod numerycznych i symulacji komputerowych w analizie obiektów fizycznych, jak również technik eksperymentalnych, uwzględniając budowę modeli fizycznych obiektów, gwarantujących powtarzalne wytworzenie zjawisk w warunkach laboratoryjnych, wykorzystanie dedykowanych metod i narzędzi pomiarowych, akwizycji danych jako nośnika informacji o mierzonym obiekcie i/czy procesie, a także aplikację do zarejestrowanych sygnałów odpowiednich miar celem fizyko-matematycznego, jakościowego, ilościowego i/lub porównawczego opisu rozważanej, autorskiej konstrukcji układu zasilania czujnika IoMT i zachodzących w niej zjawisk. Mając na względzie złożoność analizowanego systemu, odzwierciedloną m.in w wieloetapowym ciągu wnioskowania, za istotny wkład uznają także zalgorytmizowanie postawionego problemu w postać spójnego potoku powiązanych czynności wymaganych do osiągnięcia postawionego celu, a jednocześnie potwierdzenia wyrażonej w nim pośrednio tezy (jak scharakteryzowano to powyżej). Autor wielokrotnie w pracy formułuje diagramy reprezentujące powiązane ciągi zadaniowe – np. Rys. 3.1, Rys. 8.2, Rys. 12.1, będące w istocie przejrzystym zapisem zalgorytmizowanego problemu oraz wykorzystanych w tym celu metod i narzędzi. Tego rodzaju spójny logicznie i konsekwentny protokół postępowania uwiarygadnia poprawność uzyskanych w dysertacji wyników. W przedłożonej do recenzji rozprawie doktorskiej nie poszukiwano odpowiedzi na stawiane pytania cząstkowe na drodze formalnej.

Ponieważ do realizacji zdefiniowanej w pracy doktorskiej tematyki wykorzystano komponenty „z półki”, poczynione w warunkach laboratoryjnych obserwacje wielokrotnie odnoszono do informacji podawanych przez producenta/-ów. Tymczasem brakuje w rozprawie szerszego odniesienia poczynionych ustaleń (zwłaszcza ilościowych) do konstrukcji alternatywnych, wyników raportowanych dla innych zastosowań aniżeli szpitalnego procesu sterylizacji parą wodną, itp. Z innej strony, ponieważ koncepcje rozwijane i omawiane przez mgr inż. Mateusza Daniola nie były reprezentowane w międzynarodowej literaturze do zastosowań w środowisku sterylizacji parą wodną, toteż tego rodzaju bezpośrednie odniesienia

nie są oczywiste. Abstrahując częściowo od wartości użytkowej, a mając bardziej na względzie cel poznawczy, ciekawym byłoby, np. zestawienie efektywności zaprojektowanego i zbudowanego układu zasilania w relacji do rozwiązań alternatywnych opisywanych w literaturze dla innych niż w dysertacji zastosowań i/czy wykorzystujących inną aniżeli termoelektryczną konwersję w alternatywnych zastosowaniach. Oczywiście, brak tego rodzaju zestawień w opracowaniu pisemnym nie dowodzi ostatecznego braku weryfikacji przez Doktoranta wyników względem przesłanek teoretycznych czy rozwiązań alternatywnych, a jedynie wskazuje na pominięcie jej w przedłożonym do oceny dokumencie.

Bez względu na podniesioną w recenzji dyskusję uważam, że wybór i umiejętne zastosowanie opisanych powyżej metod świadczy o wiedzy, dużych umiejętnościach i szerokim warsztacie badawczym Doktoranta.

Prezentacja wyników

Uzyskane wyniki opisano w sposób precyzyjny i jednoznaczny. Autor umiejętnie zilustrował zarówno trudniejsze zagadnienia teoretyczne, konstrukcyjne, jak i osiągnięte wyniki badań własnych, tworząc rysunki poglądowe, diagramy, listingi, wykresy i tabele, zamieszczając zdjęcia. Dotyczą one zarówno ilustracji kontekstu fizycznego zagadnień podstawowych dla badanych zjawisk, sformułowanej koncepcji układu zasilania czujnika zintegrowanego z narzędziem chirurgicznym podlegającym sterylizacji parą wodną, zaplanowanych eksperymentów, architektury laboratoryjnych stanowisk pomiarowych, jak i obserwacji ilościowych, odnoszących się do studiowanego systemu i zachodzących w nim procesów. Wszystkie one umożliwiają zrekonstruowanie i powtórzenie eksperymentów zaproponowanych przez Doktoranta.

Na wyróżnienie zasługuje przemyślana struktura układu rozprawy doktorskiej, w której każdy rozdział rozpoczyna się streszczeniem uwzględniającym bezpośrednio i zwięźle wskazanie na wkład przynoszony w treściach rozdziału. Z drugiej strony, przedłożona do recenzji rozprawa doktorska jest relatywnie obszerna – 187 stron druku czcionką o rozmiarze 10 pkt. W ocenie recenzenta możliwe jest zrezygnowanie z przedstawiania w dysertacji wybranych treści i/lub zastąpienie ich formą w istotnym stopniu korzystającą z odwołań do bibliografii. Na przykład, można tak uczynić w przypadku omawiania podstaw zjawisk fizycznych (np. podrozdział 6.2.2-6.2.3), definicji znanych w środowisku naukowym wielkości fizycznych, tj. gęstość, przewodność termiczna, ciepło właściwe (str. 103), itd. Czytelność i przejrzystość treści dokumentu można poprawić zwiększając wspomniany rozmiar czcionki.

Bogata reprezentacja uzyskanych wyników, np. zarejestrowane dane w formie tabel i/czy wykresów, stanowi wartościowy zapis, jednakże wybrane z nich są rodzajem kombinacji innych. Na przykład informacje z Rys. 11.10-11.13 i Tab. 11.2-Tab.11.5 umożliwiają zrekonstruowanie faktów zawartych na Rys. 11.14-11.17 i w Tab. 11.6-Tab.11.9. Niewykluczone, iż w tym przypadku więcej oryginalnych spostrzeżeń przydatnych do optymalizacji konstrukcji układu zasilania czujnika pracującego w warunkach sterylizacji parą wodną dostarczyłoby sporządzenie wykresu trójwymiarowego dla wielkości: *grubość izolacji* (ang. *insulation thickness*), *wysokość HSU* (ang. *heatsink size*), *czas powyżej progu = 12 °C* (ang. *time over threshold = 12 °C*). Podobnie, uzasadnionym byłoby odszukanie informatywnej reprezentacji graficznej danych przydatnych w opisie bilansu energetycznego dla różnych warunków symulacji i stabelaryzowanych w Tab. 12.1-Tab. 12.4.

Rozwiązywany w rozprawie doktorskiej problem naukowy jest skojarzony z jednoznaczną potrzebą użytkową. Niezależnie, ciekawym i pożytecznym może być dla niego zestawienie charakterystyk pracy zaproponowanego i zbudowanego układu zasilania w odniesieniu do rozwiązań alternatywnych. O ile nie byłoby to celowe mając na względzie wybrane zastosowanie i przypisane mu w dysertacji ograniczenia biznesowe, to kwestia np. efektywności układów zasilania wykorzystujących energię dostępną z otoczenia urządzenia

elektronicznego w funkcji jego rozmiarów geometrycznych jest żywym obiektem zainteresowań badaczy i inżynierów. W ogólności, obserwując dążenia współczesnej nauki i inżynierii, ich potrzeby i możliwości, coraz częściej mowa o rozwiązaniach należnych dla świata w skali mikro, nano a nawet atto. Choć i w rozwiązaniach powszechnych dla bieżących zastosowań poszukuje się, np. sposobów efektywnej generacji i akumulacji energii elektrycznej, czego przykładem jest np. branża samochodowa, gdzie pojęcie efektywności – prócz charakterystyk elektrycznych – skojarzone jest także z wymiarami geometrycznymi, masą (np. baterii samochodowej), itd. W tym sensie można by zapytywać o regułę rządzącą tzw. *downsizingiem* dla zaproponowanej w rozprawie konstrukcji układu zasilania w relacji do innych konstrukcji, metod wykorzystujących alternatywne zjawiska fizyczne, chemiczne, itp. Skupienie się w rozdziałach prezentujących wyniki badań oraz przynoszących ich interpretację wyłącznie na wybranym zastosowaniu, na sformułowanej koncepcji konstrukcji, utrudnia Czytelnikowi ewentualną możliwość odszukania reguł i/czy analogii o bardziej ogólnym charakterze.

Oryginalność rozwiązania problemu naukowego

Postawiony problem naukowy – opracowanie źródła zasilania dla czujników zintegrowanych z urządzeniami medycznymi podlegającymi sterylizacji parą wodną – mgr. inż. Mateusz Daniół rozwiązał w sposób oryginalny. Stwierdzenie to wynika z kilku faktów. Po pierwsze, brak jest w literaturze krajowej i międzynarodowej systematycznych opracowań przynoszących częściową lub kompletną wiedzę odnoszącą się do zdefiniowanego w dysertacji zadania. W ocenie recenzenta, zidentyfikowana luka badawcza nie jest wynikiem jej niedostatecznego potencjału badawczego czy aplikacyjnego, by zmotywować świat akademicki oraz inżynierów do podjęcia zadania, lecz ściśle użyteczna i aktualna potrzeba wyrażona w przypadku rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Danióła skojarzona jest z ograniczonym rynkiem producentów partycypujących w wytworzeniu narzędzi o cechach relacjonowanych w pracy. Definiując ograniczenia biznesowe, Autor jeszcze bardziej zawęził pole możliwych rozwiązań problemu, tzn. przyjęte założenia implikują potrzebę sformułowania nieszablonowych, oryginalnych konstrukcji układów zasilania, wciąż wykorzystując zastaną wiedzę w zakresie nauk podstawowych skojarzonych z generacją energii elektrycznej czy konwersją pomiędzy różnymi formami energii. Taki punkt widzenia doprowadził Doktoranta do sformułowania autorskiej konstrukcji układu zasilania czujnika dla wskazanego uprzednio środowiska, której przewodnictwo termiczne i efektywność konwersji gradient temperatury-różnica potencjałów elektrycznych wymagała wyjaśnienia i opisu metodami naukowego poznania. W odpowiedzi na postawione zadanie, mgr inż. Mateusz Daniół zalgorytmizował problem, opracowując autorskie modele – wirtualny (matematyczny, fizyko-matematyczny) i fizyczny – analizowanego systemu i zachodzących w nim zjawisk, tłumaczące relacje przyczynowo-skutkowe determinujące charakterystyki konfiguracyjno-wydajnościowe, w tym z uwzględnieniem właściwości materiałowych i geometrycznych elementów wchodzących w skład układu zasilania. Korzystając z technik modelowania i symulacji komputerowej oraz pomiarów analizowanego obiektu w warunkach laboratoryjnych (imitujących szpitalne środowisko i proces sterylizacji narzędzi chirurgicznych parą wodną), przeprowadzono z kolei analizę czynnikową wskazującą na wrażliwość obserwowanego wyjścia elektrycznego na zmianę parametryczną wymiaru modułu akumulacji energii termicznej i grubości izolacji. Umożliwiło to optymalizację konstrukcji układu względem kryteriów praktycznych, włączając minimalizację rozmiaru prototypu urządzenia. Opisana autorska konstrukcja układu zasilania, wraz z metodami i wynikami jej charakteryzacji oraz optymalizacji przyniosła nową wiedzę stanowiącą wkład w dyscyplinę naukową Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Problem naukowy rozwiązano i zademonstrowano dla przykładu komponentów systemu dostępnych komercyjnie. Uogólnienie wyników zrelacjonowanych w

rozprawie doktorskiej czy ich rozszerzenie dla elementów strukturalnych o dowolnych charakterystykach (uzasadnionych fizycznie) pozostaje zadaniem otwartym. Może to być jeden z wątków przyszłych rozważań mgr. inż. Mateusza Daniała.

Efekty swoich prac Kandydat zawarł (wg bazy Scopus) w 4 publikacjach naukowych o zasięgu międzynarodowym (współautorstwo z Promotorem oraz innymi, włączając współautorów z zagranicy, tj. spoza macierzystej jednostki Doktoranta), w tym dwa artykuły w czasopismach (obydwa IF = 3.9 za 2022 r.) indeksowanych na liście MNiSzW i JCR. Dodatkowo, Doktorant jest współautorem ośmiu patentów o zasięgu międzynarodowym. Dorobek uzupełnia dziewięć publikacji (w tym trzy z JCR, jedna o IF = 10.9, jedna o IF = 6.1, jedna o IF = 2.9) traktujących o zagadnieniach niezwiązanych bezpośrednio z tematyką rozprawy.

Należy podkreślić, iż zdefiniowane w rozprawie pole badawcze pozostaje otwarte na dalsze studia o charakterze podstawowym i stosowanym, włączając alternatywne koncepcje wynikające z optymalizacji konstrukcji bazowej studiowanej w dysertacji, systemy zarządzania energią bazujące na konfiguracjach uwzględniających moduły generacji i akumulacji, oszacowanie czasu życia zdefiniowanej konstrukcji.

4. Uwagi krytyczne i zagadnienia do dyskusji

Mgr inż. Mateusz Daniół, prowadząc badania naukowe i redagując rozprawę doktorską, nie ustrzegł się kilku niedociągnięć redakcyjnych oraz kilku merytorycznych.

Uwagi redakcyjne:

- 1) Zdarzają się w rozprawie doktorskiej pojedyncze stwierdzenia niepoprawne w swej konstrukcji językowej i/czy logicznej, np. str. 107, Simulations: „Figures 10.2 to 10.3 presents the mesh quality evaluation towards.”
- 2) Str. 73-74, Listing 8.1: Edycję listingu należy rozpocząć na kolejnej stronie (tj. na str. 74).
- 3) Str. 87: Jest „According to the european [...]”, powinno być „According to the European [...]”.
- 4) Czytelność wybranych rysunków w recenzowanym dokumencie jest ograniczona – patrz przykład Fig. 9.8.
- 5) Wybrane rysunki z wieloma panelami opisane są znacznikami o różnym stylu i rozmiarze czcionki, np. treści rysunku Fig 9.11 w porównaniu do Fig. 10.1. Zdarzają się także przypadki braku opisu w podpisie rysunku dla kolejnych paneli, tak jak jest to dla Fig. 10.1.
- 6) Stwierdzono pojedyncze błędy literowe (np. str. 76, czwarta linia od góry: podwójne użycie „set set”), interpunkcyjne (np. fragmenty pracy zawierające równania – patrz str. 114-115), związane z brakującymi spacjami (np. podpis do Fig. 9.3) czy gramatyczne (np. str. 78: jest „a active”, powinno być „an active”).
- 7) Str. 91: Stwierdzenie „Potential measurement error” w nagłówku jest nieodpowiednie w rozumieniu rzeczowym, tzn. czym jest „potential measurement”(?). Wystarczy powiedzieć o „measurement error”.
- 8) Proszę rozważyć uproszczenie postaci językowej wybranych wyrażeń złożonych, np.: strona 100, podpis Tab. 9.8: „TEG internal resistance measurements results [...]”.
- 9) Edycję treści nowego rozdziału na stronie 101 należy rozpocząć od nowej linii. W bieżącej wersji dokumentu, pierwsze zdanie głównej części rozdziału 10 zlewa się z graficznym znacznikiem końca sekcji „Abstract” sformułowanego dla tego rozdziału.
- 10) Obiekty typu rysunek niosące różny kontekst podpisano w jednakowy sposób – patrz podpis do Fig. 12.1 i Fig. 12.2. Analogiczna uwaga dotyczy listingów, tj. Listing 8.1 i Listing 8.2.

J. Daniał

- 11) Rozdział 12, str. 135: W „Outcomes of this chapter” stwierdzono: “Modules with HSU heights from 2.5 mm to 20 mm in 2.5 mm increment [...]”. Tymczasem na kolejnej stronie, w podrozdziale 12.1, Autor stwierdził: “The simulation was performed for [...] and the for HSU heights of 5 mm, 10 mm, 15 mm and 20 mm”.
- 12) Rozmiar czcionki zastosowany w bieżącej wersji dokumentu utrudnia czytanie. Jej zwiększenie poprawiłoby jakość edycyjną dokumentu.
- 13) W licznych miejscach pracy stwierdzających nt wiedzy zastanej, uzasadnionym byłoby odwołanie się do materiałów źródłowych. Dla przykładu, opisując model Kubova (str. 113-115) skorzystano z wielu równań wyrażających reguły fizyczne, nie będących wynikiem opracowań Autora dysertacji.

Uwagi merytoryczne i zagadnienia do dyskusji:

- 1) Na rysunku Fig. 2.1 zaprezentowano architekturę uogólnionego systemu klasy Internet of Medical Things, w którym moduł czujnika, warstwa akwizycji, przetwarzania i przechowywania danych reprezentują topologie właściwe dla tzw. systemów chmurowych (ang. *cloud system*). Tymczasem jeden z istotnych, współczesnych kierunków prac badawczych i wdrożeniowych zakłada zbliżenie warstwy przetwarzania danych do ich źródła, a więc czujnika jako urządzenia technicznego pośredniczącego w pozyskaniu danych (i docelowo informacji oraz wiedzy). Przynosi to korzyści związane z wzrostem wydajności systemów o strukturze sieci wieloczujnikowych, m.in. zmniejszenie czasu opóźnień, poprawa efektywności energetycznej, zmiana uwarunkowań dla spełnienia kryterium bezpieczeństwa danych, itd. Jednym z istotnych źródeł poboru mocy w architekturze z Fig. 2.1 jest potrzeba przesłania danych „na zewnątrz” modułu czujnikowego, a gdyby uogólnione urządzenie IoMT miało pełnić funkcję monitorującą i zarządzającą (sterującą), wkład do bilansu energetycznego wynikający z wymagań warstwy komunikacji byłby jeszcze wyższy, co być może implikowałoby potrzebę przeprojektowania układu zasilania. Skoro jednym z głównych zadań w ramach zrealizowanej pracy doktorskiej jest ustalenie dolnego/średniego progu mocy wymaganej do niezawodnego zasilania układów czujnikowych w urządzeniach medycznych, to czy uzasadnionym byłoby rozpatrzenie scenariusza alternatywnego, tj. obliczeń brzegowych w urządzeniu na krawędzi (ang. *edge device*), gdzie monitorowanie (uwzględniające także pewien stopień przetwarzania danych) odbywa się przy czujniku, np. korzystając z dedykowanych układów sprzętowych (tj. mikrokontroler, układ neuromorficzny, itp.) i/czy dedykowanych technik obliczeniowych, np. obliczenia zintegrowane w układach pamięci (ang. *in-memory computing*)? Jakie nowe wyzwania dotyczyłyby wskazywanej alternatywy w przypadku zastosowań do urządzeń i kontenerów chirurgicznych podlegających sterylizacji parą wodną?
- 2) We fragmencie dysertacji na stronie 89 Doktorant stwierdził: „The collected resistance values has been saved to a file. The correlation of temperature versus sensor resistance is described by the Callendar-Van-Dusen equation (9.1)”. Jak rozumiane jest pojęcie „correlation” we wskazanym zdaniu? Czy Doktorant zbadał istotność statystyczną współczynnika korelacji dla zmierzonych danych, czy może dokonano analizy jakościowej? Analogicznie, pojęcie korelacji wykorzystano na str. 113: “The model itself is relatively easy to understand and can be described starting from the analysis of correlation between the heat flow and current in the single Peltier element.”. Czy tworząc model wirtualny w postaci cyfrowego bliźniaka złożonego obiektu/procesu, jak dla postawionego w dysertacji zadania, wystarczające jest posługiwanie się pojęciem korelacji czy dążymy do zrekonstruowania praw fizycznych w postaci związków przyczynowo-skutkowych?

- 3) We fragmentach ze str. 92 i 93, włączając równania (9.4)-(9.6), Doktorant posługuje się pojęciami niepewności pomiaru (ang. *measurement uncertainty*) oraz błędu pomiaru (ang. *measurement error*). Proszę o uściślenie wykorzystywanych pojęć adekwatnie do nomenklatury właściwej dla metrologii.
- 4) Jak zdefiniowano błąd podczas badań, których wyniki zaprezentowano na Fig. 11.1? Dlaczego wartość błędu jest relatywnie równomierna w całym zakresie mierzonej temperatury, minimalizując się w jej granicach (100°C, 30°C; 0s, 7800 s)?
- 5) Jednym z oryginalnych wyników uzyskanych przez Doktoranta jest opracowanie metody modelowania zjawisk termo-elektrycznych w zadanej konstrukcji dla warunków sterylizacji parą wodną. Czy opracowaną metodologię można adaptować dla analogicznych zjawisk, lecz o innej dynamice aniżeli w przypadku studiowanym przez Doktoranta? Czy na przykład wzrost dynamiki procesów, względem obserwowanych na rysunku Fig. 11.8, wymusi rewizję oceny dokładności opracowanego modelu? Jak zmiana (np. wzrost) dynamiki procesu wpłynęłaby na uzysk energetyczny w zaproponowanej (w rozdziale 8) konstrukcji, w kontekście możliwości zasilania urządzenia elektronicznego/czujnika?
- 6) W dysertacji, na stronie 124 stwierdzono: "According to the thermal simulations of steam sterilization conducted, the maximum thermal gradient occurring throughout the TEG module is not greater than 70°C.". Tymczasem na Fig. 11.5 i Fig. 11.6 oznaczono poziom maksymalnego gradientu temperatury na TEG dla procesu sterylizacji parą wodną jako równy 40°C. Proszę wytłumaczyć jaka motywacja stoi za tymi dwoma stwierdzeniami?
- 7) Mając na względzie zaplanowane w rozprawie doktorskiej zastosowanie, istotnym było przeprowadzenie optymalizacji parametrycznej – m.in. rozmiaru – konstrukcji termo-elektro-mechanicznej zaproponowanej na potrzeby zasilania czujnika zintegrowanego z narzędziem chirurgicznym lub kontenerem podlegającym sterylizacji parą wodną. Innym, „cichym” założeniem było korzystanie z rozwiązań niskobudżetowych. Rezygnując z założenia o korzystaniu w konstrukcji z komponentów dostępnych komercyjnie i tanich, proszę spróbować opisać prawa rządzące skalowaniem wymiarów geometrycznych w relacji do uzysku energetycznego? Czy wybory rozwiązań technicznych podczas opracowywania konstrukcji byłyby inne?
- 8) W rozprawie doktorskiej nie zdefiniowano i nie oszacowano sprawności opracowanego źródła zasilania czujnika zintegrowanego z narzędziem/kontenerem chirurgicznym podlegającym sterylizacji parą wodną. Jak należałoby opisać sprawność opracowanej konstrukcji?
- 9) Proces sterylizacji parą wodną jest procedurą skończoną w czasie, trwającą około 30 minut i jest to jedna z faz cyklu użytkowania narzędzia chirurgicznego. Mając na względzie całkowity czas cyklu jego użytkowania, proszę scharakteryzować przesłanki (kontekst i potrzeby) do zasilania czujników i prowadzenia pomiarów w fazie sterylizacji i poza nią. Jakie niesie to konsekwencje dla rozpatrywania zagadnień zasilania czujników i trwałości elementów elektronicznych w środowisku sterylizacji parą wodną?

Recenzent zwraca się z prośbą, aby w czasie obrony Doktorant odniósł się do kwestii 1), 8) i 9) podniesionych w „*Uwagi merytoryczne i zagadnienia do dyskusji*”.

5. Wnioski końcowe

Zawartość dysertacji pokazuje, że cel pracy został osiągnięty. Przyjęta metodologia, zakres prac oraz uzyskane wyniki świadczą o pracowitości i umiejętności samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych przez Doktoranta. Ponadprzeciętnie oceniam oryginalność oraz istotność wkładu poczynionego przez mgr. inż. Mateusza Danioła

w zdefiniowanym obszarze zagadnieniowym, poparte licznymi patentami i publikacjami w uznanych czasopismach branżowych. Ponadto, bliska współpraca z firmą Aesculap A.G., Niemcy, i zdefiniowane wspólnie z nią wymagania biznesowe dla opracowanego rozwiązania, korzystanie z niskobudżetowych i dostępnych komercyjnie komponentów sprawiają, iż uzyskane przez Doktoranta wyniki są bliskie produkcyjności.

Reasumując uważam, że **praca doktorska, pt. „Zasilanie medycznych systemów internetu rzeczy w środowisku sterylizacji parą wodną”** wykracza poza poziom przeciętny, spełniając z nadmiarem wymagania, jakie stawia rozprawom doktorskim w **dyscyplinie Elektrotechnika, odpowiadającej dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne** (wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu MNISzW z dnia 11 października 2022 r., Dz.U. 2022 poz. 2202), art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tj. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) w związku z art. 179 ust. 1 i ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 30.08.2018 r. Poz. 1669 z późn. zm.), i **wniosuję o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Daniola do publicznej obrony rozprawy doktorskiej, a także wniosuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

Jreneusz Jolbriski