

## Streszczenie

Niniejsza praca dotyczy tematyki zasilania czujników wbudowanych w urządzenia i kontenery chirurgiczne, które regularnie poddawane są procesowi sterylizacji parą wodną. Celem pracy było opracowanie metody zasilania czujników, która pozwalałaby na ich działanie podczas sterylizacji parą wodną. Pozwoliłoby to na zbieranie danych użytecznych w środowisku Internet of Medical Things. Pierwsze rozdziały przedstawiają cele badawcze, ekosystem internetu rzeczy medycznych oraz analizę logistyki szpitalnej i procesów, przez które przechodzą narzędzia chirurgiczne. Przeanalizowano wpływ różnych metod sterylizacji stosowanych w placówkach medycznych na elektronikę i elektrochemiczne urządzenia magazynujące energię. Do dalszej analizy wybrano sterylizację parową, ponieważ jest to najpopularniejsza metoda sterylizacji. Następnie przeanalizowano możliwość wykorzystania elektrochemicznych źródeł energii w środowisku sterylizacji parowej. Przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowanie elektrochemicznych źródeł zasilania jest niemożliwe biorąc pod uwagę wymagania dotyczące bezpieczeństwa (możliwa reakcja samozapłonu) jak i użyteczności (szybka degradacja i utrata pojemności), dodatkowo, zdaniem autora, w najbliższej przyszłości należy sceptycznie podchodzić do perspektywy wprowadzenia na rynek wysokotemperaturowych źródeł energii. W kolejnym rozdziale przeanalizowano alternatywne metody zasilania sensorów - tj. "energy harvesting odzyskiwanie energii. Przeanalizowano wcześniej poruszone procesy logistyki szpitalnej pod kątem możliwego zastosowania tych metod. Biorąc pod uwagę fakt, że każde narzędzie chirurgiczne przechodzi proces sterylizacji - najczęściej parą wodną w wysokiej temperaturze - zdecydowano się na wykorzystanie thermal energy harvesting i termogeneratorów jako źródła zasilania dla sensorów. Następnie przeanalizowano teoretyczne podstawy zjawisk Peltiera i Seebecka a także działanie modułów termogeneratorów. Dokonano także przeglądu literaturowego dostępnych technologii budowy ww. modułów oraz przeglądu rozwiązań dostępnych na rynku. Zdecydowano się na wybór termogenerators opartego na telluridzie bizmutu. W kolejnym kroku zdefiniowano wymagania techniczne oraz biznesowe pochodzące z firmy Aesculap AG. Opracowano prototyp modułu zasilającego. Moduł taki składa się z aluminiowej obudowy do której przymocowany jest od wewnątrz termogenerator. Do drugiej okładki termogeneratorsa przymocowana jest masa termiczna (*Heat Storage Unit - HSU*). Jest ona zaizolowana aerożelem, stąd przepływ ciepła z zewnątrz (podczas procesu sterylizacji) do wewnątrz modułu jest możliwy jedynie przez termogenerator powodując wytworzenie się na nim gradientu temperatur. Po opracowaniu modelu fizycznego zbudowano model wirtualny, a następnie dokonano identyfikacji parametrów modelu fizycznego. Analogiczny proces tworzenia wirtualnego modelu dokonano dla termogeneratorsa. Wykorzystano do tego model Kubova opracowany w środowisku SPICE. Dokonano także parametryzacji modelu termogeneratorsa na podstawie dokumentacji technicznej producenta. Wreszcie, przebadano projektowany moduł czujnika elektronicznego pod kątem zużycia przez niego energii celem zdefiniowania minimalnych wymagań dla opracowywanego modułu zasilającego. Kolejnym krokiem było przeprowadzenie niezbędnych pomiarów oraz symulacji celem walidacji modeli wirtualnych, oraz przeprowadzono symulację procesu sterylizacji parą wodną aby odpowiedzieć na pytanie czy zaproponowane rozwiązanie techniczne ma szansę zapewnić moc wystarczającą do działania czujników. Symulacje te dowiodły że prototyp jest w stanie zasilić planowane do użycia czujniki, a dodatkowo występuje dość duża rezerwa mocy. W związku z tym zdecydowano się na przeprowadzenie procesu optymalizacyjnego pod kątem miniaturyzacji całego modelu fizycznego. Proces ten wykazał, że kluczowa dla wydajności generowania energii jest przede wszystkim wielkość HSU, natomiast jeśli chodzi o izolację termiczną to jest możliwe zmniejszenie jej grubości. W rezultacie rozmiar całego modelu mógł być znacząco zmniejszony do 7.5 mm wysokości HSU oraz 5 mm grubości izolacji termicznej. W ramach pracy zgłoszono także szereg wniosków patentowych międzynarodowych.

26.05.2023 *[Signature]*

## Abstract

This thesis deals with powering sensors embedded in surgical equipment and containers that regularly undergo steam sterilisation. The aim of this thesis was to develop a method of power supply to the sensors that would allow their operation during the steam sterilisation process. This would enable collection of steam sterilisation procedure data that would be useful in an Internet of Medical Things environment. First chapters present the research aims, internet of medical things ecosystem and an analysis of hospital logistics and the processes that surgical instruments go through. The impact on electronics and electrochemical energy storage devices of the different sterilisation methods used in medical facilities was analysed. Steam sterilisation was selected for further analysis as it is the most popular sterilisation method. The possibility of using electrochemical energy sources in a steam sterilisation environment is analysed next. The analysis has shown that the use of electrochemical power sources is not feasible from the point of view of both safety (possible self-ignition) and usability (self degradation and capacity loss) and, in the author's opinion, the prospect of market adoption of high-temperature power sources in the near future should be treated with scepticism. Alternative methods of powering sensors, i.e. energy harvesting, are then examined. The potential application of energy harvesting methods to the hospital logistics processes discussed previously was analysed. It was decided to use thermal energy harvesting and thermogenerators as a power source for sensors, considering that each surgical instrument undergoes a sterilisation process, usually with steam at high temperature. The theoretical basis of the Peltier and Seebeck processes and the operation of the thermogenerator modules have been analysed. A literature review of the available technologies and a review of the solutions available on the market have also been carried out. It was decided that a thermogenerator based on bismuth telluride should be chosen. After reviewing the available technologies, the technical and business requirements of the industrial partner, Aesculap AG, were defined. A physical model of the power module was then developed. A module of this type consists of an aluminium housing to which a thermal generator is attached from the inside. A Heat Storage Unit (HSU) is attached to the other side of the thermogenerator. The inside of the module is insulated with aerogel; therefore, the heat flow from outside (during the sterilisation process) to the inside of the prototype will only pass through the thermogenerator, causing an electromotive force to develop. After the development of the physical model, the next step was the construction of a virtual model and then the identification of the parameters of the physical model. For the thermogenerator, an analogous process of building a virtual model was carried out. For this purpose, the Kubov model based on SPICE environment was used. On the basis of the manufacturer's technical documentation, corrected with laboratory measurements, the thermogenerator was also parameterised. Finally, the energy consumption of the planned electronic sensor module was studied. This was done to define the minimum requirements for the power supply module to be developed. The measurements and simulations needed to validate the virtual models were then carried out. Finally, to answer the question of whether the proposed technical solution was likely to provide sufficient power to the sensors, a simulation of the steam sterilisation process was carried out. These simulations showed that the prototype was capable of powering the planned sensors. In addition, there was a fairly large power reserve. Therefore, there was a decision to do an optimisation process for the miniaturisation of the whole prototype. This process showed that the size of the HSU was the key to the performance of power generation. On the other hand, it was possible to reduce the thickness of the thermal insulation. This allowed the size of the entire prototype to be significantly reduced to the size of 7.5 mm of HSU height and 5 mm of thermal insulation. Several international patent applications have also been filed as a result of the research and development work to which this thesis belongs.

26.06.2023 *J. K. ...*