



Politechnika Wroclawska

DZIEDZINA: nauk inżynieryjno-technicznych

DYSCYPLINA: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

ROZPRAWA DOKTORSKA

Wykorzystanie harvestingu energii w podnoszeniu efektywności energetycznej budynków z systemem zarządzania BMS i autonomicznym zasilaniu współpracujących z nim zdalnych układów czujnikowych

mgr inż. Rafał Owczarczak

Promotor / Promotorzy:
dr hab. inż. Paweł Żyłka

Promotor pomocniczy:
Ireneusz Wąsowicz

Słowa kluczowe: harvesting energii, BMS, automatyka budynkowa, efektywność energetyczna budynków, komunikacja bezprzewodowa, zasilanie bezbateryjne

WROCŁAW 2024

Streszczenie

Konsumpcja energii na potrzeby utrzymania budynków stanowi największy udział w całości konsumpcji energii generowanej przez ludzkość. Obecnie, w czasach silnego tempa wzrostu efektów globalnego ocieplenia oraz kryzysu surowcowego i energetycznego szczególnie istotna jest zatem redukcja zużycia energii na potrzeby funkcjonowania budynków.

W pracy zbadano wpływ instalacji harvestingu energii cieplnej zarządzanych przez system BMS CHRONOMATIK™ na poprawę efektywności energetycznej budynków. Analizie poddano dwie instalacje harvestingu energii zarządzane przez system BMS CHRONOMATIK™ opracowane i zaprojektowane oraz wykonane z udziałem i pod kierownictwem Autora w zakładach przemysłowych (we Wrocławiu i w Rudzie Śląskiej). Jednym z przedstawionych rozwiązań była instalacja harvestingu ciepłej energii odpadowej w kuźni aluminium z wykorzystaniem dwóch pomp ciepła. Układ pozyskuje odpadową energię cieplną z powietrza na hali produkcyjnej, która następnie jest wykorzystywana do pracy kotłowni na potrzeby ogrzewania części biurowej obiektu w sezonie grzewczym oraz na całoroczne przygotowanie ciepłej wody użytkowej. Automatyka kotłowni jest częścią systemu BMS CHRONOMATIK™. W efekcie realizacji projektu całkowicie wyeliminowano wykorzystywanie spalania gazu ziemnego na potrzeby pracy kotłowni (pierwotnie kotłownia pracowała w oparciu o kocioł gazowy). Drugim zaprezentowanym rozwiązaniem technicznym jest realizacja systemu automatycznego sterowania pracą układu odprowadzania ciepła odpadowego z systemu chłodzenia sprężarek w jednej z wrocławskich fabryk sprzętu AGD. Instalacja będąca częścią nadrzędnego systemu BMS CHRONOMATIK™ charakteryzuje się wysoką efektywnością energetyczną, co przyczyniło się do znaczącej redukcji konsumpcji energii potrzebnej na ogrzewanie hali produkcyjnej w okresie grzewczym. W niniejszej dysertacji wpływ obu projektów na poprawę efektywności energetycznej budynków z systemem BMS oceniono w świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E.

Poprawa efektywności energetycznej budynków jest istotna także w odniesieniu do budynków istniejących, często z uwagi na ich starą technologię budowy zwykle charakteryzujących się gorszą charakterystyką energetyczną od budynków obecnie powstających. Budynki te ze względu na ich konstrukcję często są wykluczone z możliwości wykonywania systemów automatyki budynkowej BMS w konwencjonalnej – przewodowej

architekturze. Jedną z alternatywnych metod instalacji systemów BMS w takich budynkach może być wykorzystanie elementów bezprzewodowych (zwykle zasilanych bateryjnie zatem wymagających regularnych serwisów). W oparciu o opracowane i wytwarzane przez firmę KMB Grupa autorskie platformy czujnikowe LoRa (opracowane w konsorcjum z Politechniką Wrocławską i przy udziale Autora) w pracy zbadano realną możliwość zasilania bezbateryjnego tych platform czujnikowych z wykorzystaniem harvesterów energii cieplnej i mechanicznej wewnątrz budynków. Podczas badań przeprowadzono analizę zapotrzebowania energetycznego platform czujnikowych, opracowano harvestery energii cieplnej pracujące z wykorzystaniem szeregu źródeł odpadowej energii cieplnej dostępnej wewnątrz budynku takich jak: szyba okienna, obudowa wodomierza zasilającego budynek w wodę zimną, powrotna belka rozdzielacza ogrzewania centralnego czy kanał odprowadzający ciepło odpadowe z instalacji chłodzenia sprężarek. Opracowano także dwa harvestery energii mechanicznej do instalacji na trzpieniu klamki i ramieniu samozamykacza drzwi. Podczas badań zaproponowano także dobór odpowiednich niskonapięciowych przetwornic napięcia DC-DC, a także układów magazynowania energii elektrycznej. Oba rodzaje harvesterów energii w budynkach przetestowano w warunkach przemysłowych. Układy te przez wiele tygodni zasilaly w sposób bezbateryjny, autonomiczne, bezprzewodowe platformy czujnikowe LoRa, które poprzez bramę komunikacyjną LoRaWAN przesyłały dane pomiarowe do węzła komunikacyjnego systemu BMS CHRONOMATIK™.

Abstract

The global energy consumption for the operation of buildings represents the largest share of the total energy consumption generated by mankind. Nowadays, at a time of strongly increasing effects of global warming and a resource and energy crisis, it is thus particularly important to reduce energy consumption for building operations.

The presented study investigated the impact of thermal energy harvesting installations managed by the BMS CHRONOMATIK™ system on increasing the energy efficiency of buildings. Two energy harvesting installations managed by the BMS CHRONOMATIK™ system and implemented in industrial factories (located in Wrocław and Ruda Śląska) with the participation and under the direction of the dissertation Author were presented and analysed. One of the projects discussed was related to the operation of a waste heat energy harvesting system using two heat pumps installed in an aluminium forge. The system harvests waste heat energy from the air in the production hall, which is then used to operate a boiler room for heating the office part of the facility during the heating season and for year-round domestic hot water preparation. The boiler room automation is part of the BMS CHRONOMATIK™ system. As a result of the project, the use of natural gas for boiler plant operation was completely eliminated (which was the supply of the boiler plant before system implementation). The second project was related to the implementation of an automatic control system for waste heat recovery from the compressor cooling system in one of Wrocław's factories. The installation, which is also part of the BMS CHRONOMATIK™ system, is characterised by high energy efficiency, which resulted in a significant reduction in energy consumption for heating the production hall during the heating period. In this dissertation, the impact of both projects on improving the energy efficiency of buildings with a BMS system was assessed with reference to the PN-EN ISO 52120-1:2022-09E standard.

Increasing the energy efficiency of buildings is also very important in case of existing buildings, which due to old construction technology usually have poorer energy characteristics than buildings currently under construction. These buildings, due to their construction, are often excluded from the possibility of implementing BMS building automation systems in a conventional, hard-wired architecture. One alternative method of installing BMS systems in such buildings can be to use wireless components (currently in most cases battery powered thus still requiring regular servicing). Based on the LoRa sensor platforms, which are

developed and manufactured by KMB Grupa (in consortium with Wrocław University of Technology and with the direct participation of the Author), the paper investigates the feasibility of battery-free powering of such remote sensor platforms using thermal and mechanical energy harvesters located inside buildings. During the research, analysis of the energy requirements of the sensor platforms was carried out, and thermal energy harvesters were developed exploiting several sources of waste heat energy inside buildings, such as the window glazing, water meters supplying the building with cold water, the return bar of the central heating distributor or the waste heat duct from the compressor cooling system. Two mechanical energy harvesters installed on the door handle stem and door closer arm were also developed and studied. During the research, suitable low-voltage DC-DC voltage converters were also selected, as well as the necessary electrical energy storage systems. Both types of building energy harvesters were also tested in real industrial conditions. Battery-less LoRa wireless sensor platforms, powered entirely by the discussed energy harvesters successfully transmitted data for several weeks to the CHRONOMATIK™ BMS communication node using the LoRaWAN communication gateway.

Podziękowania

Jako pierwszemu dziękuję mojemu promotorowi dr hab. Inż. Pawłowi Żyłce za motywację, przekazaną mi wiedzę, a także za nieocenione wsparcie w trakcie realizacji doktoratu.

Składam serdeczne podziękowania promotorowi pomocniczemu Ireneuszowi Wąsowiczowi za wszechstronną pomoc i poświęcony mi czas.

Dziękuję mojej żonie Joannie za jej zaangażowanie i wsparcie, szczególnie okazywane w ważnych momentach powstawania tej pracy.

Dziękuję Rodzicom za niezachwianą wiarę we mnie i w moje możliwości.

Dziękuję mojemu przyjacielowi dr inż. Piotrowi Rogackiemu przede wszystkim za motywację, niezliczone godziny dyskusji oraz okazane wsparcie.

Dziękuję przyjaciołom, znajomym, rodzinie oraz wszystkim, którzy umacniali mnie w trakcie realizacji doktoratu motywując do dążenia do celu.

Realizacja rozprawy doktorskiej była wspierana przez program "Doktorat wdrożeniowy finansowany przez Ministerstwo Edukacji i Nauki, edycja III grant nr DWD/3/9/2019"

Rafał Owczarczak

W trakcie przygotowania rozprawy doktorskiej w ramach tematyki doktoratu opublikowałem 3 artykuły naukowe w czasopismach naukowych, które w roku opublikowania w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późniejszymi zmianami):

1.

Rafał Owczarczak, Paweł Żyłka

Harvesting energii jako metoda bezbaterijnego zasilania zdalnych układów czujnikowych w budynkach z systemem zarządzania BMS

Przegląd Elektrotechniczny, 2021 DOI: 10.15199/48.2021.07.24

2.

Sławomir Sambor, Jarosław Emilianowicz, Rafał Owczarczak

Przykład zastosowania sieci LoRaWAN do monitorowania parametrów środowiskowych w budynku wielkopowierzchniowym

Przegląd Elektrotechniczny, 2022 DOI: 10.15199/48.2022.05.05

3.

Rafał Owczarczak

Indoor thermal energy harvesting for battery-free IoT building applications

Przegląd Elektrotechniczny, 2023 DOI: 10.15199/48.2023.03.23

Spis treści

Spis rysunków.....	11
Spis tabel	16
1. Wstęp	20
1.1 BMS – Building Management System	23
1.2 Efektywność energetyczna budynków z systemem BMS.....	26
1.3 Harvesting energii w budynkach z systemem BMS.....	27
1.4 Tezy, cele i zakres pracy	29
2. Efektywność energetyczna budynków z systemem BMS CHRONOMATIK™ w świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E	31
2.1 Wstęp	31
2.2 Warunki wpływu systemów automatyki i sterowania na efektywność energetyczną budynku.....	31
2.3 Klasyfikacja wpływu funkcji systemów sterowania i automatyki oraz technicznego zarządzania budynków na efektywność energetyczną budynków.	32
3. Przegląd literatury	34
3.1 Harvesting energii wewnątrz budynków.....	35
3.2 Harvesting energii w skali mikro – wnioski literaturowe	44
3.3 Harvesting energii w skali makro	45
3.4 Harvesting energii w skali makro – wnioski literaturowe	46
4. Plan badań.....	47
5. Harvesting ciepła odpadowego w kuźni aluminium.....	49
5.1 Wstęp	49
5.2 Opis charakterystyki zakładu.....	49
5.3 Stan pierwotny kotłowni	50
5.4 Koncepcja rozwiązania	51
5.5 Opis opracowanego rozwiązania.....	53
5.6 Badanie sprawności energetycznej układu	61
5.7 Dane pomiarowe pracy kotłowni	66
5.8 Obliczenia sprawności energetycznej układu.....	70
5.9 Plany rozbudowy układu harvestingu energii	74
5.10 Koncepcja system bezprzewodowego	74
6. Poprawa efektywności energetycznej budynku po zainstalowaniu systemu BMS CHRONOMATIK™ i układu harvestingu energii cieplnej ze sprężarek w świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E	76
6.1 Wstęp	76

6.2	Opis charakterystyki zakładu.....	77
6.3	Stan pierwotny obiektu.....	77
6.4	Realizacja systemu BMS CHRONOMATIK™.....	80
6.5	Harvesting energii – odzysk ciepła odpadowego na cele grzewcze obiektu.....	83
6.6	Wyznaczenie poprawy efektywności obiektu na skutek instalacji systemu BMS CHRONOMATIK™ w świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E.....	91
7	Harvesting energii w skali mikro.....	94
8	Zapotrzebowanie energetyczne bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa.....	96
8.1	Wstęp.....	96
8.2	Pomiary wydajności energetycznej zaprojektowanych platform.....	99
8.3	Opis architektury komunikacji bezprzewodowej platform czujnikowych z wykorzystaniem komunikacji LoRa.....	104
9	Harvesting energii – badanie możliwości bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa z wykorzystaniem przewodności cieplnej okna.....	107
9.1	Wstęp, problematyka zagadnienia, koncepcja opracowania zasilania bezbaterijnego kontaktronów bezprzewodowych.....	107
9.2	Opis algorytmu sterowania komfortem cieplnym w pomieszczeniu biurowym z wykorzystaniem bezprzewodowych kontaktronów okiennych zasilanych bateryjnie.....	110
9.3	Wnioski.....	113
9.4	Koncepcja harvestera energii cieplnej – bezbateryjne zasilanie bezprzewodowych kontaktronów okiennych.....	114
9.5	Analiza wyników.....	116
9.5.1	Sprawność termiczna okna.....	116
9.5.2	Przebieg prowadzonych badań.....	118
9.5.3	Wyniki badań.....	119
9.6	Podsumowanie.....	137
10	Ocena efektywności energetycznej wewnątrzbudynkowych źródeł odpadowej energii cieplnej na potrzeby bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych.....	139
10.1	Wstęp.....	139
10.2	Pozyskiwanie energii cieplnej z wykorzystaniem instalacji wody zimnej.....	139
10.3	Badanie krzywej mocy termogeneratora TEC 12710.....	145
10.4	Badanie rzeczywistego potencjału energetycznego (temperatury obudowy wodomierza) w trakcie doby w warunkach letnich (czerwiec).....	148
10.5	Pozyskiwanie energii cieplnej z wykorzystaniem belki rozdzielacza powrotu w instalacji CO. 150	
11	Opis badań harvestingowego zasilania platform czujnikowych z wykorzystaniem odpadowej energii cieplnej w warunkach laboratoryjnych.....	155
11.1	Pozyskiwanie energii cieplnej z wykorzystaniem belki rozdzielacza powrotu Wstęp.....	155

11.2	Budowa stanowiska pomiarowego	155
11.3	Dobór magazynu energii	158
11.4	Badania dotyczące doboru rodzaju oraz pojemności kondensatora jako magazynu energii elektrycznej układów harvestingowych	160
11.5	Kondensatory elektrolityczne jako magazyn energii dla platformy czujnikowo-nadawczej: podsumowanie.....	163
11.6	Wnioski.....	167
11.7	Zasilanie platform pomiarowych z użyciem opisanego harvestera energii cieplnej.....	168
11.8	Pomiar rzeczywistej wartości konsumpcji energii elektrycznej podczas cyklu pomiarowo nadawczego bezprzewodowej platformy czujnikowej w projektowanym układzie zasilania.	169
11.9	Podsumowanie	173
12	Badania harvestingowego zasilania platform czujnikowych w budynkach w warunkach przemysłowych.....	175
12.1	Wstęp	175
12.2	Opis badań w budynku przemysłowym.....	176
12.3	Wnioski.....	180
13	Opis budowy układu harvestera energii mechanicznej– przetwornica DC-DC i badania nad układem.....	182
13.1	Wstęp	182
13.2	Badania laboratoryjne	183
13.3	Dobór przekładni generatora w zależności od aplikacji	185
13.4	Wybór przetwornicy napięcia	187
13.5	Określenie wydajności energetycznej harvestera energii mechanicznej w warunkach laboratoryjnych	188
13.6	Harvestingowe zasilanie bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa.	194
13.7	Badania laboratoryjne harvestingu energii mechanicznej układu samozamykacza drzwi.	195
13.8	Badania w warunkach przemysłowych	204
13.9	Wnioski i podsumowanie.	207
14	Podsumowanie pracy i koncepcja bezprzewodowego systemu BMS z zasilaniem harvestingowym układów czujnikowych.	210
14.1	Podsumowanie.....	210
14.2	Rozwój systemu BMS CHRONOMATIK™	212
	Literatura	216

Spis rysunków

Rys. 1. Architektura systemu BMS na przykładzie aplikacji WVB. źródło: www.wago.com .	23
Rys. 2. Schemat procesu harvestingu energii do zasilania elementów urządzeń BMS.	28
Rys. 3. Systematyka źródeł energii dla urządzeń przetwarzających energię odpadową w budynkach na podstawie	35
Rys. 4. graficzne przedstawienie zjawiska Seeback'a na podstawie:	36
Rys. 5. Zjawisko powstawania potencjału w materiałach piroelektrycznych	37
Rys. 6. Metody pozyskiwania energii mechanicznej z wykorzystaniem harvesterów opartych o zjawisko piezoelektryczne, elektromagnetyczne oraz elektrostatyczne	39
Rys. 7. Uproszczony schemat piezoelektrycznego harvestera energii mechanicznej	39
Rys. 8. Schemat przedstawiający zasadę działania Harvestera energii fal elektromagnetycznych	40
Rys. 9. Schemat przedstawiający zasadę działania fotowoltaicznego harvestera energii świetlnej	41
Rys. 10. Wykres przedstawiający gęstość energii dla harvesterów energii w budynkach w zależności od źródła pochodzenia energii	42
Rys. 11. Schemat blokowy cieplnego harvestera energii zasilającego moduł czujnika bezprzewodowego współpracującego z systemem BMS	43
Rys. 12. Przepływ energii przez generator piezoelektryczny	44
Rys. 13. Schemat przepływu energii przez układ	53
Rys. 14. Zdjęcia przedstawiające układ wymiennika ciepła powietrze/woda: A) zabrudzenie filtra powietrza po tygodniu eksploatacji, B) widok antresoli z zainstalowanym wymiennikiem ciepła z poziomu hali produkcyjnej, C) widok obudowy wymiennika ciepła.	54
Rys. 15. Schemat instalacji wymiennika ciepła obsługującego instalację niskiego źródła pompy ciepła „A” z zaznaczonymi elementami systemu automatycznej regulacji wartości temperatury źródła.	55
Rys. 16. Zdjęcia rozdzielnic RZS 1.1. (automatyka wymienników ciepła)	56
Rys. 17. Schemat technologiczny instalacji kotłowni. Kolorem czerwonym zaznaczono część instalacji odpowiedzialnej za transfer energii cieplnej od wymiennika ciepła do pomp ciepła.	58
Rys. 18. Pompy ciepła Steibel Eltron WPF 66 zainstalowane w kotłowni.	58
Rys. 19. Schemat instalacji CWU rozbudowanej o wymiennik ciepła oraz trójdrogowy zawór mieszający.	60
Rys. 20. Zdjęcie rozdzielnic automatyki kotłowni.	61
Rys. 21. Krzywe generowanej mocy grzewczej [kW] w zależności od wartości temperatury zasilania dolnego źródła - WQA [°C] dla czterech wartości temperatur zasilania na wyjściu z pompy ciepła. Opracowano na podstawie danych producenta Steibel Eltron.	63
Rys. 22. Krzywe pobieranej mocy elektrycznej [kW] w zależności od wartości temperatury zasilania dolnego źródła - WQA [°C] dla czterech wartości temperatur zasilania na wyjściu z pompy ciepła. Opracowano na podstawie danych producenta Steibel Eltron.	64
Rys. 23. Krzywe współczynników efektywności energetycznej w zależności od wartości temperatury zasilania dolnego źródła - WQA [°C] dla czterech wartości temperatur zasilania na wyjściu z pompy ciepła. Opracowano na podstawie danych producenta Steibel Eltron.	65
Rys. 24. Wykres 10 godzinowego cyklu pracy kotłowni, przedstawiający zmiany wartości temperatur najważniejszych punktów pomiarowych w celu określenia efektywności energetycznej układu.	66
Rys. 25. wykres przedstawiający wartość temperatury zasilania (wyjście pompy ciepła) – kolor niebieski dla 1,5 cyklu pracy pompy ciepła.	71
Rys. 26. Widok ekranu systemu BMS CHRONOMATIK™ zainstalowanego w omawianym zakładzie produkcyjnym, przedstawiający: A) podział hali na 4 strefy, B) flagi zainstalowanych czujników	

temperatury i wilgotności, C) ikony odzwierciedlające rozmieszczenie i statusy pracy poszczególnych destryfikatorów.	81
Rys. 27. Ogólna struktura rozptywu energii elektrycznej dla olejowych sprężarek śrubowych. []	85
Rys. 28. Widok ekranu systemu BMS CHRONOMATIK™, wizualizacja instalacji sprężarek wraz z instalacją odprowadzania ciepła odpadowego.....	86
Rys. 29. Widok ekranu systemu BMS CHRONOMATIK™, okno zarządzania pracą systemu przepustnic zainstalowanych na kanałach wentylacyjnych.....	87
Rys. 30. Roczny przebieg otwarcia przepustnic kanałów wentylacyjnych na halę oraz wartości temperatury panującej w części hali produkcyjnej - zlokalizowanej najbliżej wylotu powietrza z układu chłodzenia sprężarek.....	88
Rys. 31. Zestawienie czasu pracy dwóch gazowych aparatów grzewczych. Jednostka nr 1 znacznie oddalona od pomieszczenia sprężarkowni na hali produkcyjnej, jednostka nr 2 zlokalizowana blisko hali pomieszczenia sprężarkowni.....	90
Rys. 32. Zestawienie kosztów ogrzewania hali produkcyjnej oraz wielkości zużycia gazu na cele grzewcze dla sezonów grzewczych 2018/2019 i 2019/2020 tj. przed i po realizacji systemu BMS CHRONOMATIK™ w obiekcie.....	91
Rys. 33. Tabela A.5. z normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E	92
Rys. 34. Schemat blokowy platformy pomiarowej pracującej w sieci LoRaWAN.	97
Rys. 35. Widok projektu 3D autonomicznej platformy czujnikowej z czujnikiem stężenia CO ₂ SCD30.	97
Rys. 36. Widok platformy czujnikowej w konfiguracji z czujnikiem temperatury DS18B20 zabudowanej w obudowie KRADEX Z123.	98
Rys. 37. Zmiany napięć VDD, VIN_SW i prądu IBAT podczas zimnego startu platformy (VBAT=7,2 V).	100
Rys. 38. Zmiany napięć VBAT, VDD oraz prądu IBAT podczas cyklu pomiarowo nadawczego platformy (VBAT=7,2V)	101
Rys. 39. Zmiany napięć VBAT i ADC_IN0 oraz prądu IBAT podczas cyklicznej pracy trzech platform zasilanych z baterii.	102
Rys. 40. Schemat architektury sieci LoRaWAN	104
Rys. 41. Okna czasowe nadawania i odbioru dla węzłów pracujących w różnych klasach [78].	105
Rys. 42. Schemat architektury wykorzystywanej w badaniach sieci LoRa.....	106
Rys. 43. Uproszczony schemat integracji bezprzewodowych kontaktronów okiennych w systemie BMS CHRONOMATIK™	109
Rys. 44. Zestaw wykresów przedstawiający zależność pracy systemu grzewczego w biurowcu w zależności od temperatury powietrza w pomieszczeniu, zadanej wartości temperatury - ustawionej przez użytkownika oraz stanu otwarcia okna – zbadanego przez bezprzewodowy kontaktron okienny.	111
Rys. 45 A) Zdjęcie termogeneratora zamocowanego do ramy okiennej od strony zewnętrznej B) Zdjęcie termogeneratora zamocowanego do szyby okna od strony wewnętrznej.....	115
Rys. 46 A) uproszczony schemat konfiguracji sterownika PLC, B) ekran wizualizacji systemu badającego wydajność napięciową cieplnego harvestera energii.....	116
Rys. 47. Wartość generowanego napięcia termostosu w zależności od temperatur w mroźną noc - przebieg dobowy 18.01.2021 (lokalizacja pod Wrocławiem). Okno PVC dwuszybowe.....	119
Rys. 48. Wartość generowanego napięcia termostosu w zależności od temperatur w ciepły dzień - przebieg dobowy 23.01.2021 (lokalizacja pod Wrocławiem). Okno PVC dwuszybowe.....	120
Rys. 49. Wartość generowanego napięcia termostosu w zależności od temperatur w mroźną noc - przebieg dobowy 18.01.2021 (Wrocław). Okno drewniane dwuszybowe.	121
Rys. 50. Wartość generowanego napięcia termostosu w zależności od temperatur w ciepły dzień - przebieg dobowy 23.01.2021 (Wrocław).Okno drewniane dwuszybowe.	121

Rys. 51. Porównanie pomiarów generowanego napięcia przez termostos w funkcji różnicy temperatury (temperatura powierzchni przylegającej do obudowy termostatu i temperatury otoczenia).....	123
Rys. 52. Porównanie uzyskanego napięcia termostosu w zależności od różnic temperatur (temperatura powietrza otoczenia - temperatura powierzchni szyby okna).	124
Rys. 53. Przebieg wartości współczynnika Seebeck'a termogeneratorów.	126
Rys. 54. Porównanie szacunkowego przyrostu energii dla harvesterów na oknie drewnianym oraz PVC w dniu 18.01 (dla zbliżonych warunków środowiskowych); przyjęto rezystancję zewnętrzną równą rezystancji wewnętrznej termostosu równej 1Ω.	128
Rys. 55. Wstępne charakterystyki modelu ultraniskonapięciowej przetwornicy DC-DC EM8900.....	129
Rys. 56. Schematy ultraniskonapięciowych przetwornic dc-dc boost EM8900 z wyjściowym podukładem nadzorczym na bazie komparatora: a) MAX9064, b) XC6136C31.	130
Rys. 57 Przebieg napięcia wyjściowego Uwy (ślad żółty) i sygnału DIS (ślad niebieski) ultraniskonapięciowej przetwornicy EM8900 z podukładem nadzorczym z komparatorem XC6136C31 dla napięcia wejściowego Uwe: a) 9,0mV, b) 12.1 mV.	131
Rys. 58. Charakterystyki wyjściowe przetwornicy EM8900 z układem nadzorczym z komparatorem MAX9064.	133
Rys. 59 Szybkość zmian napięcia wyjściowego przetwornicy EM8900 z układem nadzorczym z komparatorem XC6135C31 obciążonej dużą pojemnością Cout=10000 μF.....	134
Rys. 60. Współpraca przetwornicy EM8900 z termostosem TEC12710 na symulowanej powierzchni okna: a) zmiany temperatur strony zimnej termostosu, strony ciepłej termostosu (radiatora) i powietrza w otoczeniu termostosu, b) zmiany napięcia wyjściowego termostosu i przetwornicy..	135
Rys. 61. Współpraca przetwornicy EM8900 z termostosem TEC12710 zainstalowanym na rzeczywistym oknie: a) zmiany temperatur szyby, radiatora i powietrza wewnątrz pomieszczenia oraz szyby i powietrza na zewnątrz, b) zmiany napięcia wyjściowego termostosu w stanie jałowym i obciążonym przetwornicą oraz napięcie wyjściowego przetwornicy obciążonej pojemnością Cout=10000 μF.	136
Rys. 62. Laboratoryjny układ harvestera energii cieplnej, zainstalowanego na wodomierzu.	141
Rys. 63. Schemat sterownika PLC oraz zrzut ekranu wizualizacji stanowiska pomiarowego.	141
Rys. 64. Wyniki pomiarów wartości napięcia pozyskiwanego na zaciskach harvestera energii cieplnej w funkcji: a) temperatury wody b) różnicy temperatury wody oraz otoczenia.....	142
Rys. 65 a) Przebieg wartości mierzonego napięcia oraz prądu dla termogeneratora obciążonego rezystancją 1 Ω b) wartość mierzonego napięcia i prądu oraz wyznaczonej mocy dla ogniwa obciążonego rezystancją w zakresie 1 Ω – 1 k Ω.	144
Rys. 66. A) Zdjęcie układu pomiarowego charakterystyk U-I). B) przykładowy zrzut ekranu badanych charakterystyk U-I w programie Agilent VEE.	145
Rys. 67. A) wykres mocy maksymalnej Pmax w zależności od różnicy temperatury otoczenie – radiator, B) wykres rezystancji mocy maksymalnej Rm w zależności od wartości średniej temperatury termostosu (Tźródła i Tradiatora)/2.....	146
Rys. 68. Wykres wartości mocy generowanej przez termostos TEC12710 w warunkach temperowych przedstawionych w tabeli Tabela 4 w zakresie wartości rezystancji 0,01 Ω – 1700 Ω.	147
Rys. 69. Wykres przedstawiający dobowe zmiany wartości temperatury obudowy wodomierza w przykładowym gospodarstwie domowym w okresie letnim (czerwiec).	149
Rys. 70. Harvester energii cieplnej, zainstalowany na belce powrotnej rozdzielacza: przykładowy przebieg wartości temperatur w zimowy dzień.	152
Rys. 71. Wydajność energetyczna harvestera energii cieplnej zainstalowanego na belce powrotnej rozdzielacza CO: a) Charakterystyka prądowo- napięciowa oraz prądowo-mocowa przy średniej	

wartości różnicy temperatur 3,4 °C b) Przebieg wartości generowanego napięcia w trakcie przykładowych 19 godzin pracy systemu grzewczego.	153
Rys. 72. Stanowisko pomiarowe symulujące dostępne źródła ciepłej energii odpadowej w budynkach. A- widok z góry, B – widok od frontu.	156
Rys. 73. Szybkość ładowania kondensatorów elektrolitycznych ze źródła termoharvestingowego w zależności od ich pojemności.	161
Rys. 74. Wykres samorozładowania kondensatora elektrolitycznego LEAGUER RT1 o pojemności 10000 μ F (pomiar realizowany co 6 godzin).	163
Rys. 75. Szybkość ładowania superkondensatorów EDLC w zależności od ich pojemności (0,1 F, 0,22 F i 0,33 F).	165
Rys. 76. Samorozładowanie superkondensatorów ładowanych napięciem stałym o wartości 5,5V przez 72h oraz hybrydowych li-ion ładowanych napięciem stałym o wartości 3,8 V przez 72h, badanie prowadzono w temperaturze pokojowej.	167
Rys. 77. Wartość prądu samorozładowania używanych kondensatorów EDCL w zależności od czasu ładowania kondensatora źródłem o napięciu 5,5V.	170
Rys. 78. Pomiar wartości napięcia zasilania platformy czujnikowej w trakcie jednego cyklu pracy (pomiar oraz wysyłanie danych podczas komunikacji LoRa w klasie A).	171
Rys. 79. Pomiar napięcia oraz wyliczona wartość energii zgromadzonej w kondensatorze podczas prowadzenia cyklicznych pomiarów temperatury przez platformę czujnikową.	173
Rys. 80. Sprężarki podłączone do instalacji odprowadzania ciepła odpadowego z układu chłodzenia.	176
Rys. 81. Montaż termogeneratora na stalowej obudowie przepustnicy kanałowej wraz z przetwornicą LTC3108 i kondensatorem EDCL 0,33F zainstalowanymi w hermetycznej puszcze elektroizolacyjnej na izolowanej termicznie części kanału.	177
Rys. 82. Dobowy przebieg napięcia generowanego przez harvester odpadowej energii ciepłej, wartości temperatury powierzchni kanału, radiatora układu harvestera oraz powietrza w pomieszczeniu.	178
Rys. 83. Stanowisko symulacyjne: A) Zdjęcie układu (silnik krokowy z przekładnią, sterownik silników krokowych, platforma Arduino UNO, B) mocowanie wału silnika N20-BT33 do wału silnika krokowego.	184
Rys. 84. Wartość generowanego napięcia na zaciskach silników N20-BT33 z przekładniami 1:50, 1:75, 1:150, 1:250 i 1:1000 pracujących z rozwartym uzwojeniem generatora (bez obciążenia).	186
Rys. 85. Zdjęcie stanowiska pomiarowego harvestera energii mechanicznej – symulacja rzeczywistego ruchu kłamki z wykorzystaniem w roli generatora silnika N20-BT33 z przekładnią 1:150.	189
Rys. 86. Przebieg napięcia generatora prze mikrosilnik podczas ruchu kłamki z rozwartym obwodem zasilania.	190
Rys. 87. Przebieg wartości napięcia generatora podczas ruchu kłamki w układzie z wykorzystanym prostownikiem mostkowym Gretza, z rozwartym obwodem zasilania.	191
Rys. 88. Przebieg wartości napięcia kondensatora magazynującego energię elektryczną harvestera energii mechanicznej (układ odzysku z mechanizmu kłamki) oraz przebieg obliczonej wartości energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 4700 μ F.	192
Rys. 89. przebieg wartości napięcia oraz energii zgromadzonej w kondensatorze elektrolitycznym o pojemności 4700 μ F podczas „gorącego” startu układu harvestera energii mechanicznej (kłamka) dla kondensatora wstępnie naładowanego do wartości napięcia równej 3,3 V.	193
Rys. 90. Przebieg wartości napięcia na kondensatorze o pojemności 4700 μ F oraz wyliczonej wartości zmagazynowanej energii elektrycznej w kondensatorze podczas zasilania platformy czujnikowej z zaznaczonymi spadkami napięcia w poszczególnych etapach pracy platformy.	195

Rys. 91. Przebieg wartości napięcia kondensatora magazynującego energię elektryczną harwestera energii mechanicznej (układ odzysku z mechanizmu samozamykacza) oraz przebieg obliczonej wartości energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 10000 μ F.	197
Rys. 92. Przebieg wartości napięcia na kondensatorze harwestera energii mechanicznej oraz wyliczona wartość zmagazynowanej energii elektrycznej podczas zasilania platformy czujnikowej z zaznaczonymi spadkami napięcia w wyniku pracy platformy czujnikowej: A) pierwszy cykl pomiarowo-nadawczy, B) drugi cykl pomiarowo-nadawczy.....	199
Rys. 93. Przebieg wartości napięcia na kondensatorze magazynującym energię elektryczną harwestera energii mechanicznej (układ odzysku z mechanizmu samozamykacza) oraz zmiany energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 10000 μ F w zakresie napięć 3,9V -4,9V.....	200
Rys. 94. Przebieg wartości napięcia na kondensatorze magazynującym energię elektryczną harwestera energii mechanicznej (układ odzysku z mechanizmu samozamykacza) oraz zmiany energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 10000 μ F w zakresie napięć 0V - 4,58V.....	201
Rys. 95. Przebieg wartości napięcia oraz energii zgromadzonej w kondensatorze magazynującym 10000 μ F w trakcie pracy platformy czujnikowej realizującej dwa cykle pomiarowo-nadawcze.....	203
Rys. 96. Rozkład odebranych transmisji LoRa pomiędzy bezprzewodową platformą czujnikową, a serwerem LoRa podczas badań realizowanych w warunkach przemysłowych z harvestingowym zasilaniem platformy czujnikowej.	206
Rys. 97. Graficzne przedstawienie koncepcji systemu bezprzewodowego z wykorzystaniem wirtualnych sterowników PLC.	214

Spis tabel

Tabela 1. Zestawienie dostarczonej energii cieplnej przez agregaty grzewcze w wybranych strefach w trakcie sezonu grzewczego 2019/2020	90
Tabela 2. Pobór energii przez testową platformę dla różnych napięć zasilnia	101
Tabela 3. Zestawienie wartości generowanych napięć w zależności od różnicy temperatur powierzchni pracy harwestera względem temperatury powietrza otoczenia.....	122
Tabela 4. wyniki przeprowadzonych badań - wyznaczenie charakterystyk U-I termogeneratora	146
Tabela 5. Zestawienie czasów ładowania kondensatorów ze źródła termoharvestingowego do wartości 5 V oraz obliczeniowa wartość zgromadzonej energii elektrycznej przy napięciu 5V oraz w zakresie 3,3V – 5V.	161
Tabela 6. Zestawienie czasów ładowania kondensatorów EDLC do wartości 5 V oraz ilości zgromadzonej energii dla badanych kondensatorów.	165
Tabela 7. Wartości napięcia generowanego przez silniki N20-BT33 w zależności od prędkości obrotowej wału generatora (na zielono zaznaczono wartości napięcia pracy dla przetwornicy AEM30940 uwzględniając jej „zimny start”, na szaro wartości napięcia pracy obu przetwornic AEM30940 i 134n3p).....	187
Tabela 8. przyrost wartości napięcia oraz zgromadzonej energii w kondensatorze dla każdego cyklu pracy generatora.	202

Struktura pracy

Prezentowana dysertacja składa się z czternastu rozdziałów. We wstępie przybliżono zagadnienia związane efektywnością energetyczną budynków, automatyką budynkową oraz systemami BMS, zdefiniowano istotne pojęcia omawiane w dysertacji, a także przedstawiono tezy i cele pracy. W drugim rozdziale szerzej omówiono zagadnienie efektywności energetycznej budynków wyposażonych w systemy BMS. Nawiązano również do normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E, w oparciu o którą w dalszych rozdziałach analizowano wpływ systemu BMS CHRONOAMTIK™ na poprawę efektywności energetycznej budynków. Rozdział trzeci przedstawia przegląd literatury opisujący głównie metody harvestingu energii dostępnej w budynkach jako sposób bezbateryjnego zasilania bezprzewodowych układów czujnikowych systemów klasy BMS, a także harvesting energii w skali makro - pozwalający na bezpośredni udział w podnoszeniu efektywności energetycznej budynków. W czwartym rozdziale opisano plan badań. Rozdział piąty i szósty opisują przykłady dwóch opracowanych i wdrożonych przez Autora systemów BMS CHRONOMATIK™ integrujących i sterujących układami harvestingu energii w budynkach w skali makro, dzięki którym znacząco zwiększono efektywność energetyczną tych budynków. Jedną z przytoczonych instalacji jest odzysk ciepła odpadowego w hali produkcyjnej kuźni aluminium, natomiast drugi projekt dotyczy odzysku ciepła odpadowego z układu chłodzenia sprężarek w fabryce sprzętu AGD.

Rozdział siódmy jest wstępem do części pracy związanej z opracowaniem harvestingowych układów służących do bezbateryjnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa instalowanych w budynkach i współpracujących z systemem BMS CHRONOMATIK™. W rozdziale ósmym zbadano wymagania energetyczne bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa (opracowanych i wdrożonych z udziałem Autora rozprawy doktorskiej przez firmę KMB Grupa we współpracy z Politechniką Wrocławską) do zdalnego prowadzenia pomiarów wartości parametrów środowiskowych (temperatura i wilgotność powietrza) i przesyłu tych danych drogą radiową do bramy komunikacyjnej LoRa, współpracującej z nadzorczym systemem BMS CHRONOMATIK™. Dziewiąty rozdział opisuje badania związane z możliwością pozyskiwania energii z wykorzystaniem harvestera energii cieplnej instalowanego na szybie okiennej w budynku. W trakcie badań uruchomiono niskonapięciową przetwornicę DC-DC pracującą już od wartości napięcia 2 miliwoltów,

potwierdzając możliwość wykorzystania powierzchni okna jako źródła energii cieplnej dla harvesterów energii w budynku. W kolejnym – dziesiątym rozdziale badania związane z harvestingiem energii cieplnej w budynku rozszerzono o badania z wykorzystaniem niekonwencjonalnych źródeł odpadowej energii cieplnej w budynku jakimi są obudowa wodomierza wody zimnej oraz powrotna belka rozdzielacza instalacji ogrzewania centralnego w budynku. Oba źródła energii cieplnej z powodzeniem spełniły potrzeby energetyczne wymagane do bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa, współpracujących z systemem BMS CHRONOMATIK™.

W rozdziale jedenastym przedstawiono przygotowanie oraz uruchomienie układu harvestera energii cieplnej wyposażonego w niskonapięciową przetwornicę DC-DC. Dobrano odpowiedni magazyn energii elektrycznej na potrzeby pracy bezprzewodowej platformy pomiarowej LoRa, współpracującej z systemem BMS CHRONOMATIK™. Przeprowadzono próby działania gotowego rozwiązania w warunkach laboratoryjnych. W następnym, dwunastym rozdziale opisano natomiast działanie przygotowanego układu zainstalowanego w warunkach przemysłowych na obudowie kanału odprowadzającego odpadowe ciepło z instalacji chłodzenia sprężarek. Tak zainstalowany układ pracował w trudnych warunkach przemysłowych (pomieszczenie sprężarkowni) przez miesiąc udostępniając dane pomiarowe do sterownika PLC czyli urządzenia logicznego systemu BMS CHRONOMATIK™. Tym samym potwierdzono możliwość skutecznej pracy harvestera energii cieplnej w roli bezbaterijnego układu zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych współpracujących w rzeczywistych warunkach przemysłowych z systemem BMS CHRONOMATIK™.

W rozdziale trzynastym opisano badania związane z opracowaniem harvesterów energii mechanicznej dostępnej w budynkach w oparciu o wykorzystanie energii ruchu ludzi poprzez ruch trzpienia klamki drzwiowej oraz ramienia samozamykacza drzwi. Opracowano i w warunkach laboratoryjnych przetestowano harvester energii mechanicznej wykorzystujący miniaturowy silnik DC w roli generatora energii elektrycznej. Podobnie jak dla układów harvestingiu energii cieplnej przeprowadzono badania nad doбором odpowiedniego sposobu przekształcenia napięcia oraz jej magazynowania. Układ zasilający w ten sposób bezprzewodową platformę czujnikową LoRa został uruchomiony również w warunkach przemysłowych. Opracowane rozwiązanie skutecznie zasilало bezprzewodową platformę

czujnikową udostępniając przez 4 tygodnie dane pomiarowe do sterownika PLC współpracującego z systemem BMS CHRONOMATIK™.

W ostatnim – czternastym rozdziale pracy podsumowano wyniki przeprowadzonych badań. Przedstawiono w nim także nowatorską, w pełni autorską koncepcję całkowicie bezprzewodowego systemu BMS CHRONOMATIK 2.0, który zupełnie eliminuje dotychczas stosowaną warstwę sprzętową (to znaczy rozdzielnice automatyki systemu BMS, sterowniki PLC, itp.). Znaczącym elementem tej nowej koncepcji systemu BMS CHRONOMATIK 2.0 jest wykorzystanie rozwiązań dotyczących harvestingu energii opracowanych w trakcie badań prowadzonych w ramach przedstawionej rozprawy doktorskiej.

1. Wstęp

Przyjmuje się, że ok. 40 % całkowitej energii generowanej przez ludzkość konsumowana jest na potrzeby utrzymania i funkcjonowanie budynków [1]. Wśród tych 40 % największy udział, bo aż ok. 55 % przypisywany jest instalacjom HVAC (*ang. Heating, Ventilation, Air Conditioning – ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja*) [2].

Ze względu na obecny stan środowiska naturalnego i postępującą jego degradację, szybkość wzrostu globalnej emisji gazów cieplarnianych oraz perspektywę wyczerpania się zasobów paliw kopalnych konieczna jest zatem redukcja zużycia energii potrzebnej do funkcjonowania obiektów budowlanych. Obecnie jednym z kluczowych kierunków w zakresie poprawy efektywności energetycznej budynków jest realizacja układów automatyki budynkowej integrowanych przez nadrzędne systemy BMS (*ang. Building Management System – system zarządzania budynkiem*) [3].

Dzięki długoletniemu doświadczeniu w projektowaniu, wdrażaniu oraz uruchamianiu systemów automatyki budynkowej w ramach pracy zawodowej w firmie KMB Grupa zrealizowałem szereg projektów, których efektem była znaczna poprawa efektywności energetycznej oraz redukcja zużycia energii oraz innych mediów na potrzeby utrzymania wymaganych warunków środowiskowych wewnątrz budynków, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych standardów sanitarnych, higienicznych oraz związanych z bezpieczeństwem i komfortem przebywających w nich ludzi. Dwa z tych rozwiązań projektowych zostaną szczegółowo omówione w dalszej części niniejszej dysertacji.

Opracowany przez moją macierzystą firmę KMB Grupa autorski system BMS CHRONOMATIK™ [4] wyróżnia się wysoką efektywnością algorytmów sterowania integrowanymi urządzeniami automatyki budynkowej i instalacjami budynkowymi, a także dużą elastycznością opracowanych rozwiązań dostosowanych i wdrażanych z indywidualnym podejściem do każdego obiektu, co w efekcie pozwala na znaczną poprawę efektywności energetycznej tych budynków. Warto również nadmienić, że firma KMB Grupa jest obecnie bardzo dobrze rozpoznawalną na polskim rynku firmą zajmującą się szeroko pojętą automatyką działającą przede wszystkim w obszarze automatyki budynkowej i systemach BMS, jak również w obszarze automatyki przemysłowej (od projektowania poprzez budowanie i uruchamianie maszyn i linii produkcyjnych). W trakcie pracy zawodowej w firmie KMB Grupa aktywnie - zarówno jako projektant jak i osoba odpowiedzialna za całościowe

opracowanie rozwiązań techniczno-programistycznych – uczestniczyłem w realizacjach instalacji systemu BMS – CHRONOMATIK™ między innymi w następujących obiektach: NLF Dworzec Nowa Łódź Fabryczna, C.H. Wroclavia we Wrocławiu, kompleks fabryk grupy B/S/H (Wrocław i Łódź), LG Electronics, LG Innotek, pilotażowy program energooszczędnych sklepów sieci handlowej Żabka, sklepy Kaufland, fabryka LEIBER Polska w Rudzie Śląskiej. W okresie realizacji doktoratu kierowałem również zespołem oraz czynnie uczestniczyłem w projektowaniu automatyki budynkowej oraz systemu BMS w projekcie Dolnośląskiego Centrum Onkologii, Pulmonologii i Hematologii we Wrocławiu. Inwestycja ta opiewa na wartość 1,055 mld zł, a sam szpital będzie miał ponad 100 500 m² powierzchni.

Wiele wdrożeń systemu BMS CHRONOMATIK™ zostało wykonanych pod moim kierownictwem i z moim udziałem oraz z wykorzystaniem autorskich (opracowanych przez firmę KMB Grupa z moim udziałem i we współpracy z Politechniką Wrocławską), bezprzewodowych platform czujnikowych, pracujących w oparciu o system radiowej, niskomocowej komunikacji bezprzewodowej LoRa [5]. Platformy te umożliwiają efektywne, bezprzewodowe przesyłanie danych pomiarowych wewnątrz budynków (w tym wielkopowierzchniowych i o budowie żelbetowo-słupowej, bardzo utrudniającej komunikację radiową jak np. C.H. Wroclavia) przy jednocześnie bardzo niskim zapotrzebowaniu na energię elektryczną potrzebną do ich zasilania. Dzięki wykorzystaniu bezprzewodowych platform czujnikowych możliwe jest zdalne realizowanie pomiarów wartości parametrów środowiskowych (temperatura, wilgotność, stężenie CO₂, względne ciśnienie powietrza, stężenie LZO czyli lotnych związków organicznych itp.) w budynkach, co jest niezbędne dla efektywnej pracy układów automatyki i BMS CHRONOMATIK™. Realizacja wdrożeń z wykorzystaniem bezprzewodowych platform czujnikowych posiada niezaprzeczalne zalety: realizacja takich projektów gdyż jest znacznie szybsza, wymaga wykorzystania mniejszej ilości personelu (elektro-instalatorów) oraz pozwala na znaczną redukcję ilości okablowania w porównaniu do konwencjonalnych urządzeń przewodowych. W efekcie stosowanie rozwiązań bezprzewodowych jest nie tylko korzystniejsze pod względem kosztów, ale dodatkowo redukuje zużycie zasobów naturalnych stając się dzięki temu realną i już w praktyce wdrożoną alternatywą dla rozwiązań przewodowych.

Bardzo istotną cechą stosowania rozwiązań bezprzewodowych w realizacji systemów na bazie BMS CHRONOMATIK™ jest także możliwość łatwej realizacji projektów w budynkach istniejących, w szczególności w takich, w których instalacja konwencjonalnych przewodowych

urządzeń automatyki (w tym niezbędnych czujników różnych wielkości fizycznych, bez których system klasy BMS nie może w praktyce działać) jest znacznie utrudniona lub wręcz niemożliwa [6]. Wśród takich budynków należy wymienić liczne obiekty użyteczności publicznej, których charakter pracy nie pozwala na wyłączenie ich z funkcjonowania (szpitale, szkoły, uczelnie wyższe, itp.) czy też budynki zabytkowe objęte ochroną konserwatora zabytków, co w praktyce wyklucza prowadzenie w nich instalacji teletechnicznych w sposób przewodowy (np. zabytkowe dworce, ratusze, kamienice, itp.). Budynki te ze względu na wiek oraz technologię budownictwa, w której zostały zrealizowane bardzo często charakteryzują się niską efektywnością energetyczną. Dlatego są obiektami, w których instalacja systemów BMS pozwala na uzyskanie wysokich zysków energetycznych wynikających z poprawy efektywności pracy urządzeń HVAC oraz systemów automatyki budynkowej w nich zainstalowanych i zintegrowanych np. poprzez system BMS CHRONOMATIK™.

W oparciu o historię projektów wykonanych przez moją macierzystą firmę KMB Grupa silnym trendem widocznym w ostatnich 5-6 latach działalności jest znaczny wzrost ilości wdrożeń systemów BMS w budynkach istniejących, których realizacja byłaby praktycznie niemożliwa do wykonania bez wykorzystania bezprzewodowych urządzeń automatyki budynkowej. Przykładem mogą być choćby budynki w kompleksie fabryk B/S/H czy też projekt rozbudowy istniejącego systemu BMS CHRONOMATIK™ w centrum handlowym Wrocławia jak również szereg mniejszych inwestycji. Tym samym, strategicznym celem firmy KMB Grupa jest rozwijanie obecnie oferowanego systemu CHRONOMATIK™ w kontekście urządzeń bezprzewodowych, ze specjalnym uwzględnieniem ich autonomicznego, bezbaterijnego zasilania w oparciu o energię pozyskiwaną z otoczenia wewnątrz budynków, czyli poprzez tzw. harvesting energii. Na tym temacie zatem również skupiono się w dalszej części prezentowanej rozprawy doktorskiej.

1.1 BMS – Building Management System

Początki koncepcji automatyki budynkowej z systemami BMS sięgają lat 80-tych XX wieku i dotyczą inwestycji realizowanych w USA [7]. Obecnie większość powstających budynków użyteczności publicznej, zakładów produkcyjnych, biurowców, galerii handlowych, dworców i innych obiektów budowlanych i technicznych posiada rozbudowane systemy automatyki budynkowej integrowane w nadrzędne systemy BMS zamiennie oznaczane w literaturze także jako BAS (*ang. Building Automation System*) lub BMCS (*ang. Building Management and Control System*) [8]. W prezentowanej pracy będzie jednak stosowane najbardziej popularne oznaczenie BMS.

Zaawansowane systemy BMS posiadają liczne funkcjonalności wspólne dla systemów SCADA (*ang. Supervisory, Control and Data Acquisition*), umożliwiając użytkownikowi monitorowanie oraz sterowanie integrowanymi instalacjami z poziomu wizualizacji. System BMS pozwala efektywnie nimi zarządzać oraz automatycznie nadzoruje pracę urządzeń i integrowanych instalacji.

Najczęściej struktura systemów BMS prezentowana jest w postaci drzewiastej architektury przedstawionej na rysunku Rys. 1 na przykładzie architektury aplikacji WAGO WVB [9].



Rys. 1. Architektura systemu BMS na przykładzie aplikacji WVB. Źródło: www.wago.com [9].

Najwyżej w opisanej architekturze (oznaczonej na Rys. 1 jako warstwa „Zarządzanie”) znajduje się serwer aplikacji BMS. Serwer integruje wszystkie sterowniki obiektowe, konwertery oraz inne urządzenia podłączone bezpośrednio do systemu BMS z wykorzystaniem różnych sieciowych protokołów komunikacyjnych (jak np. BacNet, ModBus, KNX, LonWorks, itd.). Serwer aplikacji udostępnia także wizualizację systemu BMS poprzez terminale i stacje operatorskie, a także często zapewnia bezpieczny, zdalny dostęp sieciowy za pośrednictwem przeglądarek stron WWW. Serwer systemu BMS pełni rolę administracyjną, jest odpowiedzialny za zarządzanie kontami użytkowników i przydzielanie grupom użytkowników wymaganych uprawnień oraz zapewnienie odpowiedniego poziomu zabezpieczeń sieciowych. Równoległe z serwerem aplikacji system BMS współpracuje z serwerem bazodanowym (przy czym zwykle istnieje możliwość zarówno pracy na wewnętrznej bazie danych jak i zewnętrznym, zdalnym serwerze bazodanowym SQL). Dane pomiarowe logowane w bazie danych służą generowaniu trendów historycznych, analizie przyczyn występowania usterek oraz pracy algorytmów optymalizujących działanie urządzeń i instalacji integrowanych przez BMS. Serwer aplikacji realizuje także szereg funkcji dodatkowych jak np. generowanie listy alarmów oraz powiadamianie o wystąpieniu zdarzeń alarmowych (poprzez SMS, e-mail lub komunikaty Push).

Drugim poziomem architektury systemów BMS (oznaczonym na schemacie na Rys. 1 jako „Automatyka”) są sieciowe urządzenia obiektowe komunikujące się z serwerem BMS z wykorzystaniem sieciowych protokołów komunikacyjnych (Modbus TCP/IP, BACnet IP, OPC UA, Network Variables, itp.). Wśród tych urządzeń należy wyróżnić:

- Swobodnie programowalne obiektowe sterowniki PLC (*ang. Programmable Logic Controller*).
- Panele HMI (*ang. Human – Machine Interface*).
- Konwertery magistral komunikacji szeregowej na warstwę sieciową TCP/IP.
- Konwertery (bramki) komunikacji bezprzewodowej na warstwę sieciową TCP/IP.
- Wyniesione wyspy I/O (*ang. Input/Output*) konwertujące sygnały cyfrowe i analogowe na warstwę sieciową TCP/IP.

Wśród wymienionych urządzeń obiektowych najbardziej strategiczne role w systemie BMS pełnią sterowniki PLC, dzięki którym systemy BMS integrują sygnały zbierane z obiektu,

realizują algorytmy sterowania, kontrolują pracę urządzeń obcych, obsługują dwukierunkową komunikację z serwerem aplikacji BMS, a także sieciową komunikację poziomą z innymi sterownikami PLC oraz panelami HMI.

Trzecim – najniższym poziomem architektury konwencjonalnych systemów BMS (oznaczonym na Rys. 1 jako „Obiekt”) są pozostałe urządzenia obiektowe czyli: czujniki (realizujące pomiar temperatury, wilgotności, ciśnienia, stężenia CO₂, natężenia światła, itp.), panele sterowania (np. komfortem w pomieszczeniach biurowych – z komunikacją szeregową integrowane na poziomie sterowników PLC), wykonawcze urządzenia obiektowe (siłowniki, falowniki, wentylatory, pompy, obce sterowniki obiektowe, elementy stykowe – styczniki, przekaźniki, itp.). Warstwa ta obejmuje również wszelkiego rodzaju analizatory sieci oraz liczniki, a także szereg innych urządzeń (jak np. kontaktrony okienne, przepływomierze, itp.).

Systemy automatyki budynkowej BMS realizują często sterowanie istotnymi, strategicznymi instalacjami wewnątrz budynku, w tym: automatyka central wentylacyjnych i innych urządzeń systemów HVAC, sterowanie kotłowniami, węzłami ciepła, sterowanie węzłami instalacji chłodu w budynkach, instalacjami sprężonego powietrza w zakładach produkcyjnych, itp. [10]. Realizują także algorytmy opomiarowania i zarządzania rozpięciem energii elektrycznej [11].

W efekcie realizacja nadrzędnego systemu automatyki BMS nastawiona jest na ułatwienie zarządzania instalacjami technicznymi w budynkach, zwiększenie bezpieczeństwa pracy poszczególnych instalacji, osiągnięcie znaczących oszczędności zużycia mediów w budynkach w porównaniu do budynków niewyposażonych w taki system a zatem wzrost efektywności energetycznej budynków, [12].

1.2 Efektywność energetyczna budynków z systemem BMS

W oparciu o przedstawione we wstępie szacunkowe dane dotyczące globalnego zużycia energii na potrzeby funkcjonowania budynków, w ramach wspólnej polityki UE w 2010r. opublikowany został bardzo ważny z punktu widzenia efektywności energetycznej budynków dokument jakim jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE w zakresie charakterystyki energetycznej budynków (określana jako *EPBD – ang. Energy Performance of Buildings Directive*) [13]. Regulacje opisane w tej dyrektywie mają na celu ograniczenie zużycia energii oraz emisji gazów cieplarnianych związanych między innymi z eksploatacją budynków. W myśl dyrektywy, państwa członkowskie UE zostały zobowiązane aby już od 30 grudnia 2020 r. nowe budynki charakteryzowały się niemal zerowym zużyciem energii (czyli aby mogły być określane jako *NZEB – ang. Nearly zero-energy buildings*). Ponadto, co jest szczególnie ważne w kontekście instalacji systemów BMS w już istniejących budynkach, dyrektywna ta nakłada na państwa członkowskie obowiązek realizowania polityki renowacji budynków w celu poprawy ich efektywności energetycznej, tak aby do roku 2050, w sposób racjonalny pod względem kosztów umożliwić ich przekształcenie w budynki NZEB [14]. Konieczność poprawy efektywności energetycznej budynków dyktowana jest także przez przepisy prawa budowlanego obecnie funkcjonującego w Polsce [15].

W tekście przywołanej dyrektywy UE zawarto definicję efektywności energetycznej opisaną jako „*stosunek uzyskanych wyników, usług, towarów lub energii do wkładu energii*”. Efektywność energetyczna została również zdefiniowana w treści krajowej ustawy o efektywności energetycznej jako „*stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużycia energii przez ten obiekt, urządzenie techniczne lub instalację albo w wyniku usługi niezbędnej do uzyskania tego efektu*” [16].

W praktyce, efektywność energetyczna budynku może być mierzona na wiele sposobów, w zależności od obszaru prowadzonych w budynku działań. Może zatem dotyczyć zarówno pozyskiwania wewnątrz budynków energii odpadowej następnie wtórnie wykorzystywanej na cele utrzymywania i poprawy warunków środowiskowych w budynkach, jak również zużywanej w znacznie mniejszej skali na potrzeby bezbateryjnego zasilania np. bezprzewodowych platform czujnikowych. W tym ostatnim przypadku pośrednio wzrasta

produktywność systemów automatyki budynkowej, w efekcie podnosząc efektywność energetyczną budynku.

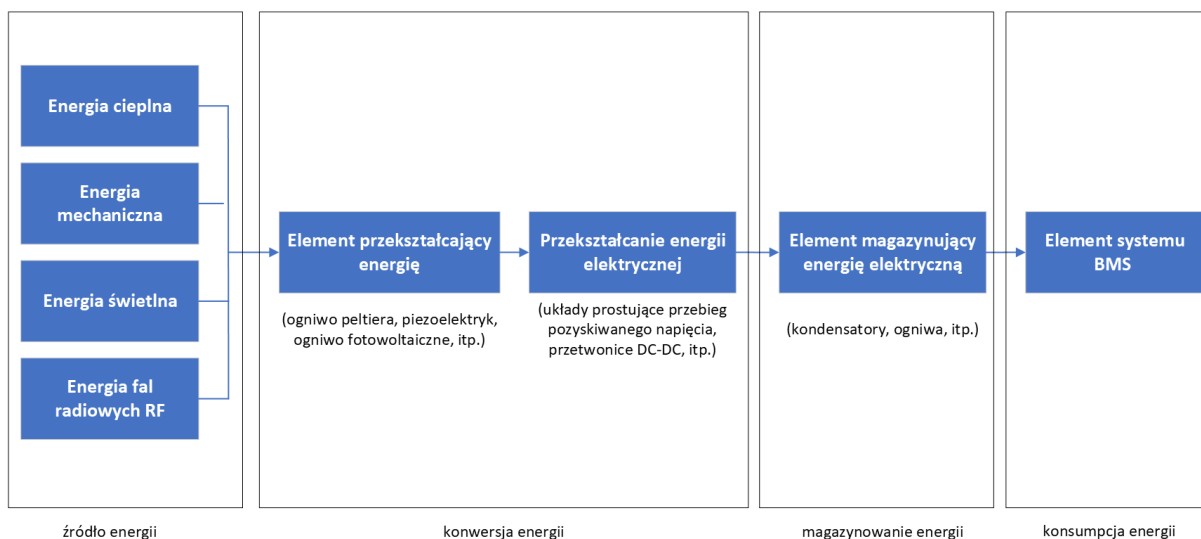
Ważnym jest podkreślenie, że zwiększenie efektywności energetycznej budynków nie może wiązać się z rezygnacją z komfortu osób w nich przebywających, ale raczej dąży do osiągnięcia tego samego poziomu jakości warunków środowiskowych wewnątrz budynku jednak przy mniejszym zużyciu energii.

Należy również zwrócić uwagę na to, że instalując w budynkach systemy BMS, integrujące instalacje budynkowe odpowiedzialne za sterowanie komfortem cieplnym, wentylacją, oświetleniem oraz innymi instalacjami budynkowymi można znacząco zredukować konsumpcję energii używanej przez wymienione instalacje od kilkunastu do nawet kilkudziesięciu procent [17][18].

1.3 Harvesting energii w budynkach z systemem BMS

Harvesting energii (*EH – ang. Energy Harvesting*) zamiennie określane również jako scavenging energii (*ES – ang. Energy Scavenging*) to proces przekształcania energii dostępnej w środowisku na energię elektryczną, przy czym odbywa się to w bezpośrednim otoczeniu zasilanego w ten sposób urządzenia [19]. *Energy Harvesting* nie ma dotychczas w języku polskim bezpośredniego, jednoznacznego tłumaczenia, dlatego na potrzeby rozprawy będzie wykorzystywany w formie „*harvesting energii*”, w skrócie EH. Spolszczone w ten sposób angielskojęzyczne określenie coraz częściej pojawia się już w polskim piśmiennictwie.

Wykorzystanie urządzeń pozwalających na przekształcenie energii pozyskiwanej z otoczenia na energię elektryczną stanowi bardzo atrakcyjny jak również realny sposób bezprzewodowego i bezbaterijnego zasilania urządzeń systemów BMS, przede wszystkim rozproszonych układów czujnikowych. Proces pozyskiwania i wykorzystania energii z otoczenia oraz przekształcenie jej na energię elektryczną można podzielić na cztery fazy: 1 – pozyskanie (zwykle w nieregularnych i nieprzewidywalnych odstępach czasu) energii z otoczenia, 2 – konwersja pozyskiwanej energii na energię elektryczną, 3 – magazynowanie energii elektrycznej, 4 – konsumpcja energii elektrycznej [20] co schematycznie zilustrowano na schemacie pokazanym na Rys. 2.



Rys. 2. Schemat procesu harvestingu energii do zasilania elementów urządzeń BMS.

Ponieważ współczesne układy czujnikowe coraz częściej działają zdalnie i przesyłają dane bezprzewodowo (radiowo), więc sposób ich zasilania staje się krytycznie ważny dla prawidłowego i niezaburzonego pozyskiwania, interpretacji i udostępniania danych środowiskowych nadrzędnym systemom automatyki BMS, które bez tych danych nie mogą prawidłowo (lub w ogóle) funkcjonować. Dlatego bezobsługowe rozwiązania bezbateryjne, pozyskujące energię odpadową z otoczenia i transformujące ją w energię elektryczną zwane harvestingiem energii, wykorzystywane przez elektroniczne platformy czujnikowe są tak atrakcyjne w odniesieniu do systemów BMS.

Poza pojęciem harvestingu energii w skali mikromocowej w odniesieniu do zasilania ultraniskomocowych elektronicznych układów czujnikowych i radiowych, pojęcie harvestingu energii odnosi się w budynkach także do pozyskiwania oraz przekształcania odpadowej energii na potrzeby zasilania energetycznych układów wielkoskalowych o mocach przekraczających nawet 100 kW [21]. Wśród systemów harvestingu energii wewnątrz budynków charakteryzujących się dużą mocą można wyróżnić układy pozyskujące oraz przetwarzające odpadową energię cieplną (instalacje sanitarne w budynku, instalacje sprężarek w budynkach produkcyjnych, procesy technologiczne w budynkach produkcyjnych wraz z towarzyszącymi im instalacjami chłodzącymi te procesy technologiczne), a także wykorzystujące energię mechaniczną (np. pozyskiwanie odpadowej energii mechanicznej wynikającej z aktywności ludzi w budynkach, pozyskiwanie odpadowej energii mechanicznej wynikającej z drgań budynków, i inne.) [22].

Realizacja układów o dużych mocach odzyskujących odpadową energię w budynkach znacząco wpływa na poprawę efektywności energetycznej tych budynków. Przykłady instalacji odzyskujących odpadową energię cieplną w budynkach sterowanych oraz monitorowanych z wykorzystaniem systemów BMS zostały zatem przedstawione w dalszej części dysertacji.

1.4 Tezy, cele i zakres pracy

Jak pokazano we wstępie pracy, systemy BMS z bezprzewodowymi platformami czujnikowymi mogą być skutecznym narzędziem do poprawy efektywności energetycznej budynków. W myśl obecnie obowiązujących przepisów prawa budowlanego, a także dyrektyw prawa unijnego poprawa efektywności energetycznej budynków obecnie powstających i projektowanych jest strategią już stosowaną, a w odniesieniu do budynków już istniejących narzuconą do wdrożenia do 2050 roku. Dlatego tezy niniejszej pracy doktorskiej Autor formułuje w następujący sposób:

Teza 1: Energia pozyskiwana z otoczenia (poprzez harvesting energii) umożliwia poprawę efektywności energetycznej budynków z systemem BMS CHRONOMATIK™.

oraz

Teza 2: Energia pozyskiwana z otoczenia (poprzez harvesting energii) umożliwia również autonomiczne, bezbateryjne zasilanie zdalnych układów czujnikowych instalowanych w budynkach i współpracujących z systemem zarządzania budynkiem BMS CHRONOMATIK™. Sieć zasilanych w ten sposób zdalnych układów czujnikowych pozwala na poprawę efektywności energetycznej budynków zarządzanych systemem BMS CHRONOMATIK™.

Udowodnienie tak postawionych tez pracy doktorskiej wymaga realizacji zadań, stanowiących zakres pracy:

- Analiza literatury w kontekście harvestingu energii wewnątrz budynków, identyfikacja źródeł odpadowej energii dostępnej wewnątrz budynków oraz technik i sposobów jej przekształcania, magazynowania i wykorzystywania w kontekście zasilania

bezprzewodowych elementów automatyki budynkowej współpracujących z systemem klasy BMS.

- Ocena zapotrzebowania energetycznego opracowanej przez firmę KMB Grupa bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa jako referencyjnego zdalnego czujnika dla systemu BMS CHRONOMATIK™.
- Analiza wielkości poprawy efektywności energetycznej budynków wyposażonych w system BMS CHRONOMATIK™ na przykładzie referencyjnych obiektów przemysłowych w świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E
- Analiza potencjalnych źródeł odpadowej energii wewnątrz budynków przydatnych do zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych.
- Opracowanie prototypów harvesterów energii cieplnej i mechanicznej wraz z układami przetwarzającymi i kondycjonującymi energię elektryczną zdolnych do bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa.
- Uruchomienie zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i polowych (przemysłowych) bezprzewodowych platform czujnikowych z prototypowym, bezbaterijnym zasilaniem harvestingowym współpracujących z radiową siecią LoRaWAN połączoną z obiektowym sterownikiem PLC jako symulacją rzeczywistego węzła systemu BMS CHRONOMATIK™.
- Analiza opracowanych rozwiązań bezbateryjnych w kontekście rozwoju systemu BMS CHRONOMATIK™ polegającym na opracowaniu i przyszłym wdrożeniu w pełni bezprzewodowego systemu BMS CHRONOMATIK™ 2.0. Jest to innowacyjna, autorska idea i rozwiązanie opracowane przez Autora niniejszej dysertacji, zgodnie z jego najlepszą wiedzą dotychczas nie publikowane w literaturze ani nie stosowane w praktyce. Bazuje ono na rozproszonej architekturze z całkowitą eliminacją szaf sterowniczych oraz okablowania strukturalnego. Rozwiązanie takie pozwoli na realizację systemów BMS we wszystkich budynkach (zarówno nowobudowanych jak i tych już istniejących, w tym „trudnych” z punktu widzenia wprowadzania klasycznego systemu BMS), w efekcie dając wyraźną przewagę konkurencyjną i wdrożeniową firmie KMB Grupa na tle systemów automatyki budynkowej obecnie dostępnych na rynku. Takie rozwiązanie doskonale wpisuje się w obecne oczekiwania rynku wynikające z ogólnoeuropejskiej polityki klimatycznej.

2. Efektywność energetyczna budynków z systemem BMS CHRONOMATIK™ w świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E

2.1 Wstęp

W odniesieniu do obowiązujących dyrektyw UE wymienionych w pierwszym rozdziale niniejszego manuskryptu w kontekście efektywności energetycznej budynków z systemem BMS zagadnienie to zostanie obecnie szerzej omówione w świetle obowiązującej normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E – *Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Wkład automatyzacji, sterowania i technicznego zarządzania budynkami* [23]. Norma ta zastąpiła wycofaną z dniem 09.09.2022 normę PN-EN 15232-1:2017-07 [24] (która była aktualna jeszcze w czasie realizacji niniejszego doktoratu). Najnowsza wersja normy została opracowana w celu ustanowienia zasad i metod niezbędnych do oceny wpływu systemów sterowania i automatyki budynków BACS oraz systemów technicznego zarządzania budynkami TBM (*ang. technical building management*) na efektywność energetyczną i zużycie energii w budynkach.

Wspomniana norma odnosi się co prawda do systemów BACS, jednak w rozdziale normy zawierającym definicje (*Part 1, Unit 3.3*), treść normy wprost wskazuje, że systemy BACS są równoważne i jednoznacznie określane jako systemy BMS. Są to zatem według omawianej normy określenia w pełni synonimiczne i wzajemnie wymienne.

2.2 Warunki wpływu systemów automatyki i sterowania na efektywność energetyczną budynku.

W normie PN-EN ISO 52120-1:2022-09E zdefiniowano cztery warunki stawiane systemom BMS, których spełnienie zapewnia najwyższą efektywność energetyczną budynków. Warunki te to:

Warunek 1. Wymagane jest, aby instalacje techniczne umożliwiały indywidualne sterowanie zużyciem każdej formy energii. W celu spełnienia warunku instalacje techniczne powinny posiadać elementy nastawcze oraz wykonawcze pozwalające sterować przepływem energii.

Warunek 2. Wymagane jest, aby lokalne (pomieszczeniowe) układy sterowania mogły identyfikować zapotrzebowanie na energię i w efekcie mogły dostosowywać dostarczanie energii w zależności od zapotrzebowania. System powinien również zapobiegać stratom energii wynikającym z aktywności osób oraz niekorzystnych energetycznie działań w budynku (np. otwarcie okna, otwarcie bramy przemysłowej w obszarze produkcyjnym).

Warunek 3. Wymagane jest, aby instalacje techniczne w budynku dostosowywały na bieżąco (lub nawet z predykcją) wydajności do aktualnego zapotrzebowania na różne formy energii dla budynku.

Warunek 4. Wymagane jest, aby instalacje techniczne w budynku były sterowane wspólnie z poziomu nadrzędnego systemu BMS w celu wykorzystywania w danej chwili najbardziej wydajnych energetycznie instalacji w budynku, a także wykorzystujących najmniej kosztownych energetycznie funkcji (np. schłodzenie powietrza w budynku poprzez nocne przewietrzanie, a nie uruchamianie systemu klimatyzacji).

2.3 Klasyfikacja wpływu funkcji systemów sterowania i automatyki oraz technicznego zarządzania budynków na efektywność energetyczną budynków.

Norma PN-EN ISO 52120-1:2022-09E identyfikuje cztery sposoby realizacji automatyzacji oraz sterowania instalacjami technicznymi w budynkach:

- Bez sterowania automatycznego.
- Z automatycznym sterowaniem centralnym.
- Z indywidualnym, autonomicznym sterowaniem lokalnym (pomieszczeniowym).
- Z indywidualnym sterowaniem pomieszczeniowym z dodatkową komunikacją z nadrzędnym systemem BMS z funkcją sterowania zależną od zapotrzebowania.

W normie zdefiniowano również cztery klasy (A, B, C i D) wpływu funkcji automatyzacji i sterowania oraz technicznego zarządzania budynków na efektywność energetyczną budynków dla budynków komercyjnych i mieszkalnych:

- Klasa D (najgorsza) – opisuje systemy BMS, które nie wpływają na efektywność energetyczną budynków. Budynki wyposażone w systemy klasy D powinny zostać poddane renowacji. Budynki nowopowstające nie powinny być budowane z systemami tej klasy.

- Klasa C – klasa referencyjna, opisuje standardowe systemy BMS.
- Klasa B – opisuje zaawansowane systemy BMS, wpływające na poprawę efektywności energetycznej budynków.
- Klasa A (najlepsza) – opisuje systemy BMS o wysokiej efektywności energetycznej z pełną funkcjonalnością technicznego zarządzania budynkiem. Dostarczanie różnych form energii do każdego pomieszczenia budynku jest realizowane z wykorzystaniem precyzyjnego sterowania, w zależności od chwilowego zapotrzebowania na daną formę energii w tym pomieszczeniu.

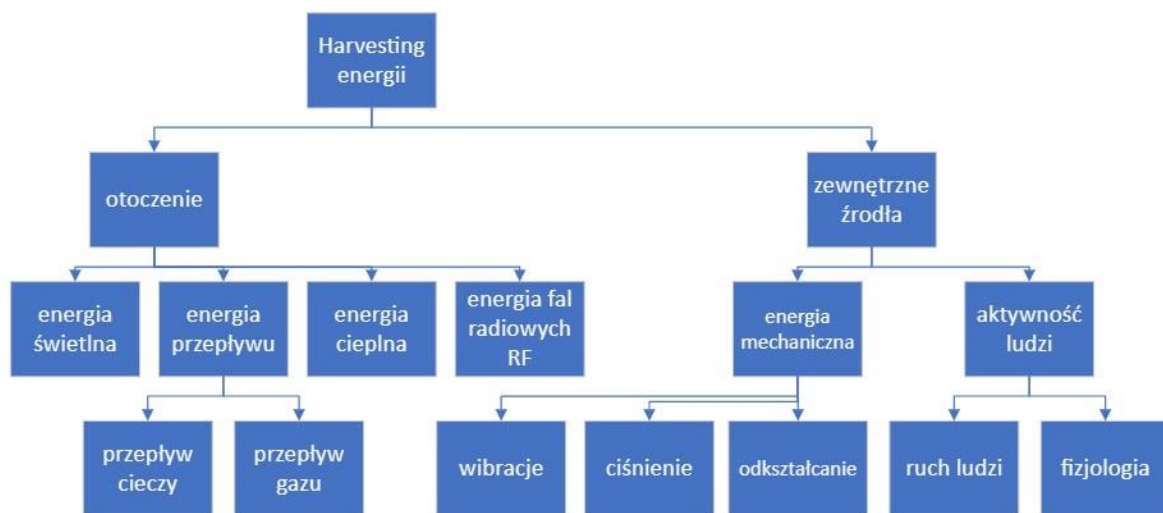
W odniesieniu do przedstawionych w tym rozdziale warunków stawianych systemom automatyzacji i sterowania w budynkach oraz definicji klas wpływu automatyzacji i sterowania na efektywność energetyczną budynków w dalszych rozdziałach niniejszej dysertacji opisane zostaną przykładowe aplikacje systemu BMS CHRONOMATIK™ (zrealizowane przez Autora podczas doktoratu) znacząco zwiększające efektywność energetyczną budynków, w których je zaimplementowano. Jednak zanim te autorskie realizacje systemów BMS poprawiających efektywność energetyczną budynków zostaną szczegółowo zaprezentowane przedstawiona zostanie analiza literaturowa, w tym również wybrane publikacje opisujące rozwiązania pozwalające na bezbateryjne, harvestingowe zasilanie zdalnych układów czujnikowych, instalowanych w budynkach i współpracujących z systemami BMS. Takie układy czujnikowe dostarczają systemom BMS danych środowiskowych i informacji o stanie urządzeń technicznych oraz przepływach energii w budynku, bez których działanie systemu klasy BMS jest niemożliwe. A zatem bezbateryjnie, harvestingowo zasilane układy czujnikowe w pośredni sposób poprzez system BMS również pozytywnie wpływają na poprawę efektywności energetycznej budynków.

3. Przegląd literatury

Zastosowanie bezprzewodowych czujników we współczesnych systemach automatyki budynkowej jest obecnie często spotykane [25]. Są to najczęściej urządzenia bezprzewodowe monitorujące warunki środowiskowe w budynkach. Mierzone parametry środowiskowe w budynkach to między innymi: temperatura i wilgotność powietrza, poziom stężenia CO₂ w powietrzu, poziom stężenia lotnych związków organicznych w powietrzu, obecność osób, natężenie oświetlenia, stan otwarcia okien i drzwi, itp. Każdy typowy czujnik bezprzewodowy zbudowany jest z sensora wielkości fizycznej (lub kilku wielkości fizycznych), odpowiedzialnego za pomiar wartości fizycznych, mikrokontrolera (digitalizującego i przetwarzającego sygnały pochodzące z sensora i przygotowującego dane do wysłania), modułu radiowego oraz źródła zasilania [26][27]. Obecnie najczęściej wykorzystywane i instalowane są czujniki wyposażone w klasyczne, bateryjne źródło energii powodujące skończony czas bezobsługowej pracy czujnika, a więc wymagające mniej lub bardziej regularnego serwisowania systemu zbudowanego z tak bateryjnie zasilanych elementów automatyki (ze względu na konieczność cyklicznej wymiany baterii) [28]. Rozwój technologii pozwala na daleko idącą redukcję poziomu konsumpcji energii elektrycznej potrzebnej na wykonanie pomiaru danej wartości fizycznej, przetworzenie zmierzonej wartości oraz wysłanie danych za pośrednictwem bezprzewodowej komunikacji radiowej dalekiego zasięgu w budynkach (w dalszej części dysertacji przedstawione zostaną m.in. badania związane z konsumpcją energii elektrycznej potrzebnej na wykonanie przykładowych pomiarów i wysłanie danych z wykorzystaniem energooszczędnego protokołu LoRa). Co prawda korzystając z mikrokontrolerów o ultra-niskim poborze energii, ograniczając częstotliwość realizacji pomiarów wartości fizycznych oraz używając niskoenergetycznych bezprzewodowych protokołów komunikacji radiowej można zdecydowanie (nawet do ponad 10 lat) wydłużyć czas pracy czujnika ze źródłem baterijnym w danym układzie pomiarowym [29]. Rozwiązaniem całkowicie eliminującym wyżej opisane wady bezprzewodowych czujników zasilanych bateryjnie w systemach automatyki budynkowej BMS jest jednak tylko opracowanie czujników zasilanych bezbateryjnie z wykorzystaniem harvestingu energii wewnątrz budynków.

3.1 Harvesting energii wewnątrz budynków.

Przypomnijmy istotę harvestingu energii przedstawioną w pierwszym rozdziale dysertacji: harvesting energii to proces przekształcania energii dostępnej z otoczenia na energię elektryczną. Wewnątrz budynków istotne jest zatem wykorzystanie odpowiedniego źródła energii w zależności od wymagań energetycznych zasilanego urządzenia oraz miejsca jego zamontowania wewnątrz budynku [30]. Na schemacie na Rys. 3. uporządkowane zostały źródła energii możliwe do pozyskania ze środowiska wewnątrz budynku w kontekście przekształcenia na energię elektryczną w celu zasilania bezprzewodowych czujników systemów automatyki budynkowej BMS.

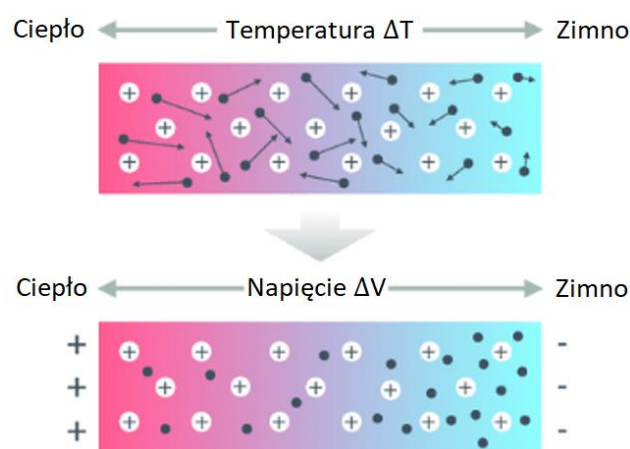


Rys. 3. Systematyka źródeł energii dla urządzeń przetwarzających energię odpadową w budynkach na podstawie [30].

Spośród wymienionych, dostępnych źródeł energii wewnątrz budynku, poniżej opisano wybrane z nich, charakteryzujące się powszechną obecnością wewnątrz budynku, a także możliwością względnie efektywnej konwersji na energię elektryczną.

Energia cieplna – powszechnie dostępna wewnątrz budynku (także w postaci źródeł energii o charakterze energii odpadowej). W literaturze opisano liczne przykłady konwersji energii cieplnej na energię elektryczną z wykorzystaniem źródeł wewnątrz budynków: ciepło pochodzące z urządzeń elektrycznych i mechanicznych generujących ciepło odpadowe podczas pracy, promieniowania słonecznego jako źródła ciepła, energia odpadowa urządzeń grzewczych czy też źródeł ciepła oraz chłodu technologicznego wewnątrz budynków [31].

Pozyskiwanie energii cieplnej najczęściej realizowane jest z wykorzystaniem termogeneratorów (TEG) na styku ośrodków o różnej wartości temperatury. Harvesting energii cieplnej charakteryzuje się najczęściej ciągłością dostępnego źródła energii wewnątrz budynku oraz wysoką niezawodnością urządzeń pozyskujących w ten sposób energię (ze względu na brak elementów mechanicznych najbardziej narażonych na zużycie) [32][33]. Często spotykanym sposobem przekształcenia energii cieplnej na elektryczną jest wykorzystanie odkrytego w 1821 roku efektu Seebeck'a. Zjawiska Seebeck'a zilustrowano na grafice przedstawionej na Rys. 4.

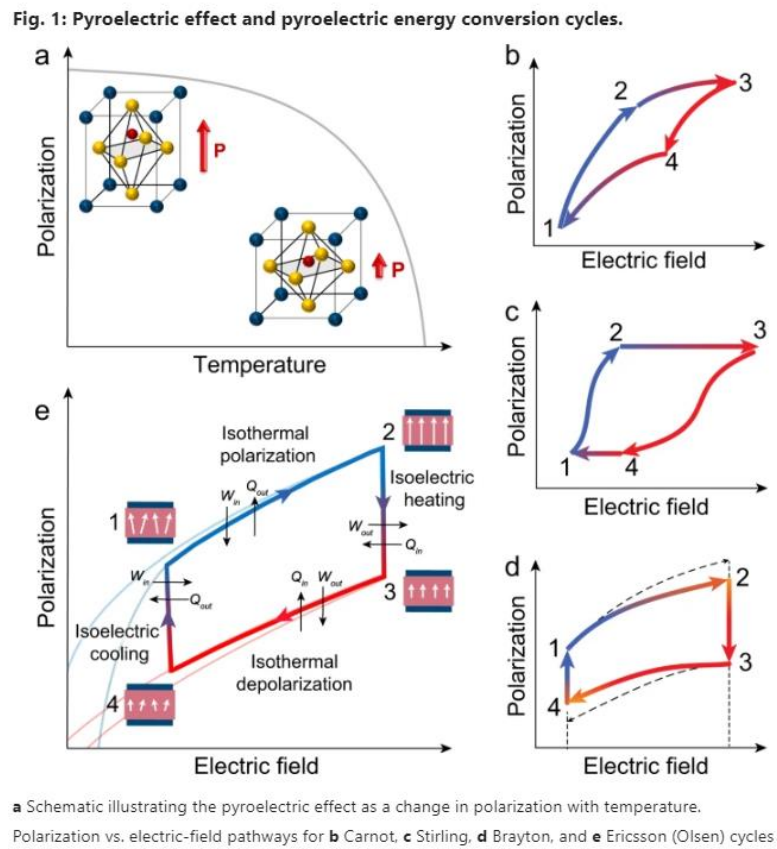


Rys. 4. graficzne przedstawienie zjawiska Seebeck'a na podstawie: [34].

W termogeneratorach (TEG) pracujących z wykorzystaniem zjawiska Seebeck'a wykorzystywane jest powstawanie siły elektromotorycznej w obwodzie elektrycznym zawierające dwa metale bądź materiały półprzewodnikowe o różnych wartościach temperatury, w efekcie generowany jest ruch ładunków z jednego złącza do drugiego. Najbardziej powszechnym materiałem półprzewodnikowym wykorzystywanym do budowy termogeneratorów TEG pracujących w temperaturach zbliżonych do pokojowych jest donorowo oraz akceptorowo domieszkowany tellurek bizmutu Bi_2Te_3 w postaci miniaturowych kostek meandrowo osadzonych na podłożu ceramicznym (zwykle Al_2O_3) [35].

Innym sposobem pozyskiwania energii elektrycznej na drodze przekształcenia energii cieplnej jest metoda piroelektryczna. W przeciwieństwie do efektu termoelektrycznego, zdolność wygenerowania siły elektromotorycznej nie wynika z gradientu temperatury, a z ogrzania całego kryształu. Zjawisko piroelektryczne występuje w niektórych kryształach dielektrycznych np. w turmalinie, winianie sodowo-potasowym (sól Seignette'a) czy kwasie

winowym [36]. Zjawisko powstawania potencjału w kryształach piroelektrycznych przedstawiono na grafice na Rys. 5.



Rys. 5. Zjawisko powstawania potencjału w materiałach piroelektrycznych [36].

Ze względu na charakter zjawiska, wykorzystywanie materiałów piroelektrycznych jest rozwiązaniem wymagającym jednak środowiska o zmiennej w czasie wartości temperatury ośrodka co jak na razie stanowi poważne ograniczenie stosowalności tej metody. Jednak w literaturze pojawiają się już propozycje rozwiązań bazujących na mikromechanicznych, oscylacyjnych termogeneratorach MEMS wykorzystujących bimetaliczne mikrodźwignie rezonansowo oscylujące pomiędzy dwoma powierzchniami o różnej temperaturze oraz wywołane w ten zmiennotemperaturowy sposób w materiale piroelektrycznym osadzonym na mikrodźwigni cykliczne zmiany polaryzacji i ładunku w cyklu Clingmana lub Olsena [37].

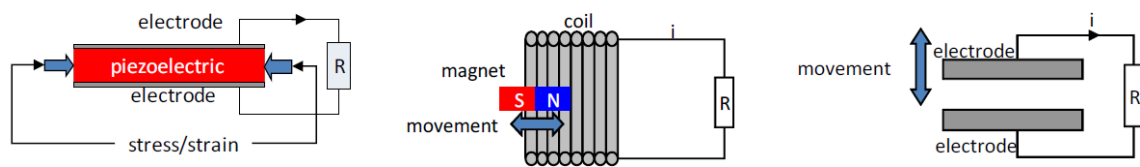
Oba sposoby (termogenerator TEG i materiały piroelektryczne) pozyskiwania energii elektrycznej na skutek przekształcania energii cieplnej z otoczenia są rozwiązaniami zapewniającymi względnie wysoką efektywność energetyczną takich rozwiązań (teoretycznie

do ok. 10% dla TEGów oraz nawet do ok. 30% dla mikrodzwigniowych, oscylacyjnych układów piroelektrycznych) oraz długą żywotność urządzeń. Wśród opracowań literaturowych poza wymienionymi wyżej - najbardziej powszechnymi sposobami przekształcania energii cieplnej na energię elektryczną można wyróżnić także pozyskiwanie energii elektrycznej w oparciu o nano-anteny pozyskujące energię ze słonecznego promieniowania elektromagnetycznego [38]. Warto również zwrócić uwagę na opracowane metody podnoszące sprawność powszechnie znanych harvesterów energii cieplnej wykorzystujące metodę impulsowania przepływu ciepła przez termogenerator [39]. Są to jednak rozwiązania laboratoryjne, dotąd nie dostępne komercyjnie.

Energia mechaniczna – rodzaj energii także powszechnie dostępny wewnątrz budynków. Podstawowy podział stosowany w literaturze dzieli dostępną energię mechaniczną na energię wibracji oraz na energię ruchu. Wibracje wewnątrz budynku wynikają z cyklicznej pracy urządzeń mechanicznych, poruszania się ludzi, elementów rotacyjnych, dynamicznych zmian ciśnienia w instalacjach sanitarnych, itp. [40]. Odpadowa energia ruchu generowana wewnątrz budynku albo przez urządzenia techniczne albo przez przebywające w nim osoby jest również możliwa do pozyskania na wiele sposobów. Wśród nich można wymienić metody wykorzystujące zjawiska elektrostatyczne, elektromagnetyczne oraz piezoelektryczne.

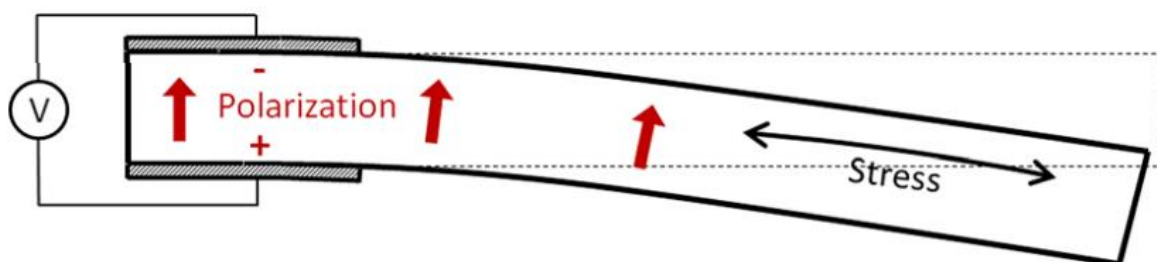
Metody elektrostatyczne wymagają wykorzystania układów zmiennopojemnościowych polaryzowanych zewnętrznym źródłem napięcia bądź elektretów, czyli materiałów o trwałej polaryzacji dipolowej, będących źródłem pola elektrostatycznego czyli elektrycznym odpowiednikiem magnesu trwałego [41]. Drgania przenoszone na elektrody spolaryzowanego układu zmiennopojemnościowego, powodują indukowanie na nich zmiennego w czasie ładunku elektrycznego i związanego z nim napięcia. Innym typem generatorów elektrostatycznych są tzw. TENgi (*ang. Tryboelectric Nano Generator*) czyli mikrogeneratory wykorzystujące efekt tryboelektryczny w celu mechanicznego wytworzenia zmiennego w czasie ładunku elektrycznego poprzez tarcie lub deformację materiałów o właściwościach tryboelektrycznych i elektrostatycznych [42]. Powstała w ten sposób na elektrodach różnica potencjałów w obszarze zbliżenia lub styku dwóch materiałów, wynikająca z nagromadzenia się nadmiaru ładunków elektrycznych przeciwnych znaków w każdym z nich oraz zjawiska indukcji elektrycznej zostaje wykorzystana bezpośrednio do generowania siły

elektromotorycznej w generatorach oraz nanogeneratorach o poziomie pozyskiwanej mocy elektrycznej od $0,1 \mu\text{W}$ [43].



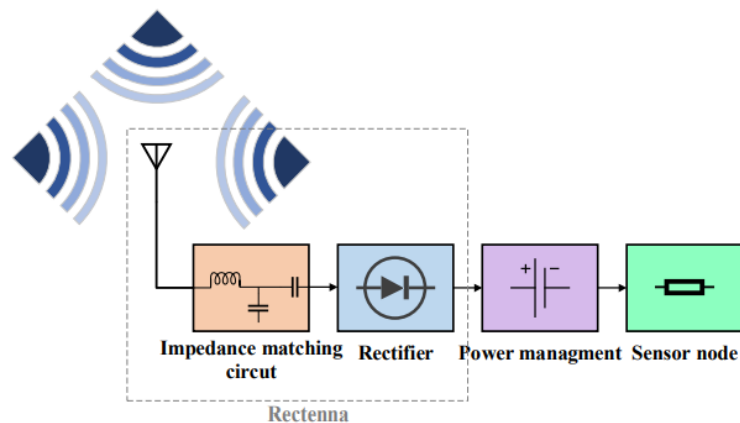
Rys. 6. Metody pozyskiwania energii mechanicznej z wykorzystaniem harvesterów opartych o zjawisko piezoelektryczne, elektromagnetyczne oraz elektrostatyczne [44].

Efekt piezoelektryczny polega na asymetrycznym przesunięciu ładunków lub jonów w strukturze materiałów wykazujących cechy piezoelektryczne pod wpływem odkształcenia mechanicznego. Harvestery energii mechanicznej działające w oparciu o zjawisko piezoelektryczne przetwarzają zatem energię mechaniczną poprzez konwersję siły (w postaci cyklicznego nacisku lub rozciągania albo skręcania) na zmienne w czasie naprężenie mechaniczne wywołujące wewnątrz materiału piezoelektrycznego zmienną w czasie polaryzację przekładającą się na indukowane na elektrodach zmienne napięcie elektryczne, co schematycznie zilustrowano na Rys. 7. Harvestery piezoelektryczne są zwykle budowane jako oscylacyjne, belkowe układy rezonansowe, w których belka wpada w drgania rezonansowe wywołane drganiami lub ruchem oscylacyjnym źródła energii mechanicznej. Niestety taki charakter pracy tego typu harvesterów utrudnia i ogranicza ich wykorzystanie w obszarach o zmiennym w czasie spektrum drgań mechanicznych lub gdy dostępny ruch jest niecykliczny. Obszerny przegląd tych urządzeń zawierają m.in. publikacja Erturka i Inmana [45], praca przeglądowa Sezera i Koc'a [46] czy też praca Li i Lee [47]



Rys. 7. Uproszczony schemat piezoelektrycznego harwestera energii mechanicznej [48].

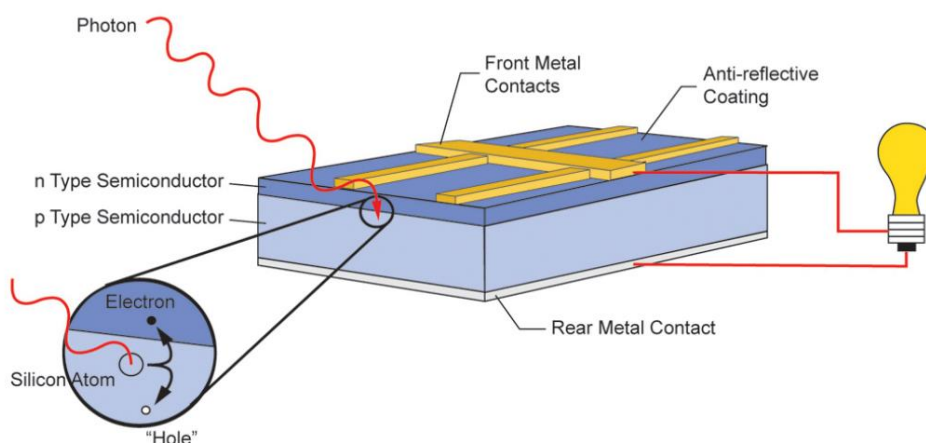
Energia promieniowania elektromagnetycznego w paśmie RF - podstawowym elementem budowy elektromagnetycznego generatora RF jest antena dopasowana do danego widma sygnału RF. Wewnątrz budynków najefektywniejsze zakresy częstotliwości sygnałów RF zawierają się w zakresie 902-928 MHz, co odpowiada pasmu GSM oraz częstotliwości 2,4 GHz, a także 5 GHz odpowiadające pasmu WiFi [49]. Dodatkowo harvestery energii elektromagnetycznej często wyposażone są w dodatkowe moduły dopasowujące impedancję anteny do impedancji wejściowej układu konwertera AC-AC lub AC-DC, co schematycznie zilustrowano na Rys. 8. Budowane są także układy harvestingowe energii promieniowania elektromagnetycznego w paśmie RF wyposażane w kilka rodzajów anten zaprojektowanych do pracy w różnych pasmach częstotliwości w efekcie znacząco zwiększając wyjściową moc elektryczną harvestera [50].



Rys. 8. Schemat przedstawiający zasadę działania Harvestera energii fal elektromagnetycznych [51].

Harvestery energii elektromagnetycznej charakteryzują się mocą wyjściową energii elektrycznej na poziomie ok $1\mu\text{W}$, natomiast eksperymentalne rozwiązania mogą osiągać moce przekraczające nawet $100\mu\text{W}$ [52].

Energia świetlna – wewnątrz budynku energia w tej postaci pochodzi ze sztucznych źródeł światła, zwykle o elektrycznej naturze zasilania) oraz naturalnego rozproszonego światła słonecznego (dostępnego jednak tylko w okresie dnia). Harvesting energii świetlnej to zatem przekształcanie energii świetlnej wprost na energię elektryczną z wykorzystaniem ogniw fotowoltaicznych różnych typów [53].



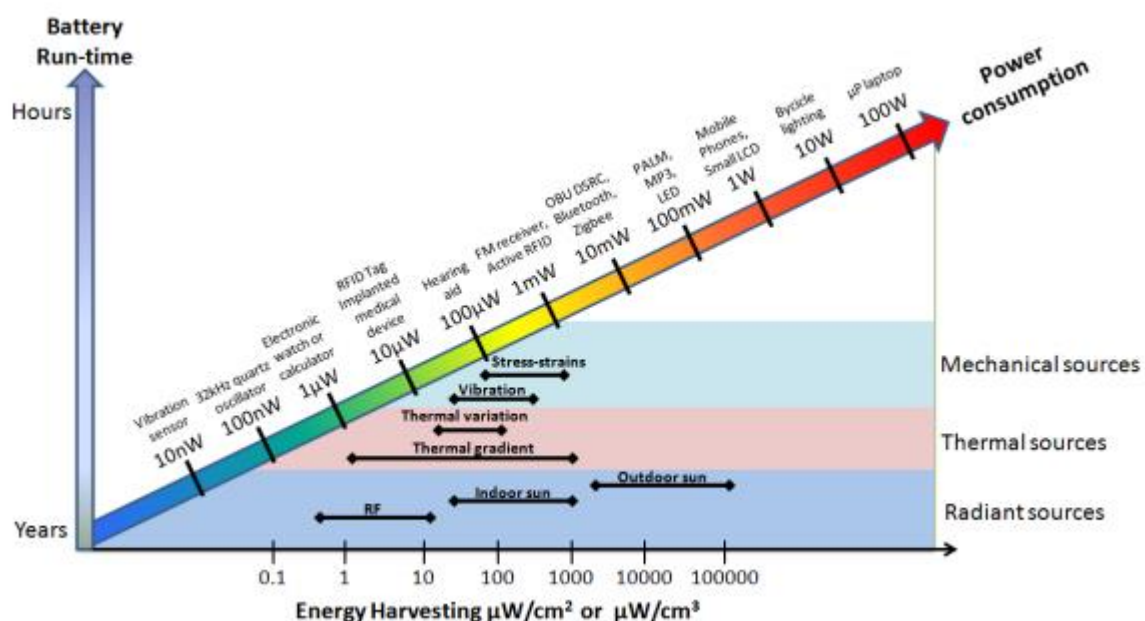
Rys. 9. Schemat przedstawiający zasadę działania fotowoltaicznego harvestera energii świetlnej [54].

Powszechnie używane ogniwa fotowoltaiczne zbudowane są z dwóch warstw materiału półprzewodnikowego np. krzemu tworząc złącze p-n. Warstwa typu n jest wystawiona na kontakt z energią świetlną. Fotony o energii większej od szerokości przerwy energetycznej półprzewodnika generują powstawanie par elektron - dziura. Na skutek rozdzielania ładunków w złączu p-n powstaje różnica potencjałów i zewnętrzne napięcie elektryczne [55].

Ogniwa fotowoltaiczne w zależności od technologii wykonania charakteryzują się różną efektywnością absorpcji energii świetlnej i jej konwersji na energię elektryczną w zakresach od 3-10% dla krzemowych ogniw o budowie amorficznej, 20,4% dla ogniw polikrystalicznych i ok. 25% dla ogniw monokrystalicznych w warunkach pracy z udziałem światła słonecznego. Jednak w zastosowaniach wewnętrzzbudynkowych krzemowe ogniwa amorficzne charakteryzują się efektywnością od 3% do 7% i w tej postaci są najczęściej wykorzystywane do zasilania zdalnych urządzeń IoT (Internet of Things) [56]. Widmo absorpcji ogniw krzemowych niestety nie jest dobrze dopasowane do spektrum światła obecnego wewnątrz budynków, szczególnie pochodzącego ze źródeł sztucznych o dużej zawartości krótkofalowego promieniowania widzialnego. W literaturze pojawiają się zatem propozycje wykorzystania układów wielozłączowych na bazie galu arsenku GaAs o efektywności nawet przekraczającej 40% (jednak o bardzo wysokiej cenie), perowskitowych elementów fotowoltaicznych (jednak o wciąż niezadowalającej trwałości i odporności na wilgoć) czy też organicznych układów fotowoltaicznych (o niskiej efektywności) [57][58].

Wśród publikacji tego typu występują na przykład harvestery energii świetlnej wyposażone w układy zarządzające energią elektryczną pozwalające zasilac czujniki mierzące poziom stężenia CO₂ w powietrzu wewnątrz budynków [59].

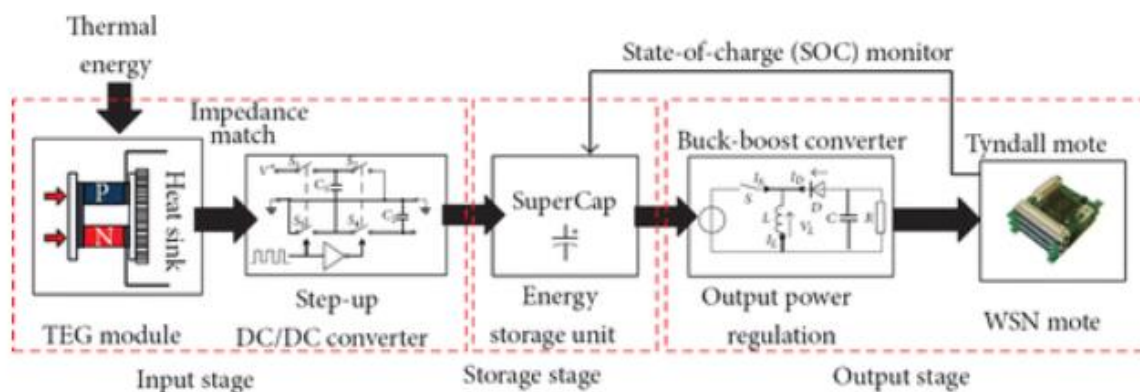
Kluczowym aspektem przy wyborze harvestingowego źródła energii dostępnego w budynkach jest jednak zarówno ocena „ilości” dostępnej energii (zwykle szacowanej na podstawie powierzchniowej gęstości energii), jak również powszechność jej występowania w budynku, a także ocena stabilności dostępnej energii pochodzącej z danego jej źródła (w aspekcie długich okresów czasu pozwalających na skuteczne pozyskiwanie w nich ilości energii wymaganej do zasilania urządzeń bezprzewodowych) [60]. Na wykresie na Rys. 10. przedstawiono szacunkową gęstość energii dostępną ze źródeł harvestingowych w budynku w zależności od ich źródła dla trzech głównych źródeł energii (energii promieniowania fal elektromagnetycznych, energii cieplnej, energii mechanicznej). Wśród tych źródeł najszerszy zakres mocy dostępnej w budynku zapewnia energia cieplna, natomiast drugim atrakcyjnym źródłem energii w budynku jest energia mechaniczna, jednak nie w postaci drgań lecz w postaci naprężeń mechanicznych i ruchu. Uzasadnia to wybór źródeł energii dokonany w dalszej części pracy, opisującej opracowane i przebadane wewnątrzbudynkowe harvestery energii przeznaczone do bezbateryjnego zasilania zdalnych układów czujnikowych współpracujących z BMS CHRONOMATIK™.



Rys. 10. Wykres przedstawiający gęstość energii dla harvesterów energii w budynkach w zależności od źródła pochodzenia energii [60].

W literaturze jest jednak stosunkowo mało przykładów wykorzystania wewnątrzbudynkowego harvestingowania energii cieplnej na potrzeby rzeczywistych systemów IoT (nie wspominając już o zdalnych układach czujnikowych współpracujących z systemami

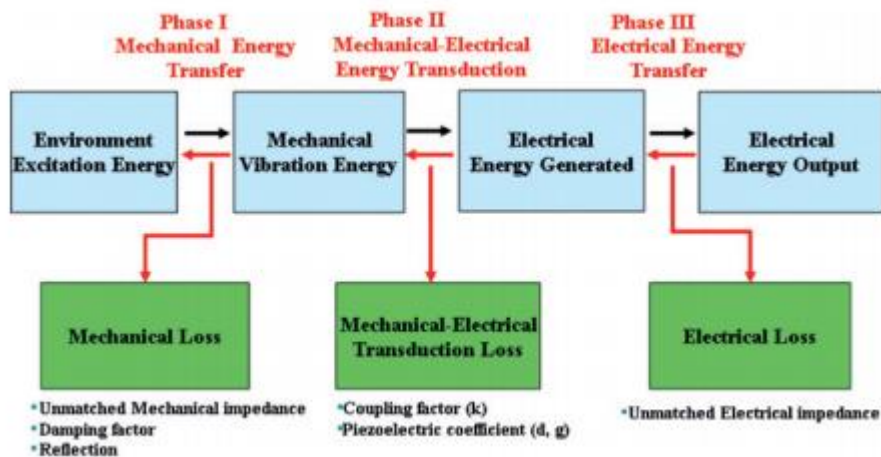
klasy BMS). Np. Wang wraz z zespołem w swojej pracy przedstawia koncepcję, projekt, budowę oraz uruchomienie termoelektrycznego harvestera energii wyposażonego w przetwornicę napięcia DC/DC zdolnego z pozyskanej energii cieplnej skutecznie zasilić moduł bezprzewodowego czujnika, a pozyskane w ten sposób dane przesyłać drogą radiową do nadrzędnego budynkowego systemu BMS. Schemat takiego harvestera energii przedstawiono na Rys. 11. [61]



Rys. 11. Schemat blokowy cieplnego harvestera energii zasilającego moduł czujnika bezprzewodowego współpracującego z systemem BMS [61].

Moduł platformy czujnikowej przedstawionej we wspomnianym artykule wyposażony jest w interfejs I²C, który pozwala integrować szeroką gamę czujników różnych parametrów środowiskowych w budynkach. Harvester energii cieplnej w omawianym rozwiązaniu oparty został o termogenerator TEG w literaturze anglojęzycznej często zastępowany pojęciem Seebeck generator.

Przedstawiane w literaturze skuteczne, bezbateryjne zasilanie budynkowych urządzeń IoT może być realizowane także za pomocą harvesterów energii wykorzystujących zjawisko piezoelektryczne. Priya wraz z zespołem opisuje: sposób przekształcania energii mechanicznej w energię elektryczną, materiały i technologie używane w produkcji struktur stosowanych do wytwarzania elementów przejawiających zjawisko piezoelektryczne oraz metody pozwalające znacząco wzmocnić efekt piezoelektryczny wykorzystując np. zjawisko rezonansu mechanicznego [62]. Przepływ energii w typowym harvestingowym mikrogeneratorze piezoelektrycznym zobrazowany został na Rys. 12. Z energii mechanicznej na wejściu schematu blokowego na skutek zjawiska piezoelektrycznego energia przetworzona zostaje na energię elektryczną.



Rys. 12. Przepływ energii przez generator piezoelektryczny [63].

Innym rozwiązaniem pozwalającym wykorzystywać harvester energii piezoelektrycznej w zastosowaniu budynkowym jest przykład przedstawiony w opracowaniu Songi i zespołu [64]. Opracowanie dotyczy koncepcji, projektu oraz wykonania testowego modelu płytki podłogowej umożliwiającej odzysk energii mechanicznej pozyskiwanej z przemieszczających się po niej osób. Podczas obciążenia urządzenia przez osobę ważącą 100 kg autorom udało się uzyskać moc chwilową rzędu 148 mW co odpowiada możliwości generowania gęstości mocy na poziomie $3,7 \text{ W/m}^2$ wykonanego harvestera. W artykule energia pozyskiwana z takiego harvestera była wystarczająca do zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych.

3.2 Harvesting energii w skali mikro – wnioski literaturowe

Biorąc pod uwagę przedstawione w literaturze przykłady harvesterów energii możliwych do zainstalowania wewnątrz budynków, które pozwalają skutecznie zasilać bezprzewodowe czujniki mierzące parametry środowiskowe, w dalszych rozdziałach dysertacji Autor przedstawia zatem własne przykłady realizacji zmierzających do użycia harvesterów energii cieplnej i mechanicznej wykorzystujących elementy i instalacje techniczne powszechnie występujące w budynkach, pozwalające na pozyskiwanie wystarczającej ilości energii dla zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych wdrażanych przez firmę KMB w systemach BMS CHRONOMATIK™.

3.3 Harvesting energii w skali makro

Poza harvestingiem energii wewnątrz budynków w skali mikro-energetycznej pozwalającym na bezbateryjne zasilanie energooszczędnych bezprzewodowych platform czujnikowych, odrębnym obszarem badań przedstawionych w doktoracie jest zastosowanie systemu BMS CHRONOMATIK™ w budynkach w zakresie automatyzacji procesów i instalacji odzyskujących odpadowe ciepło w budynkach przemysłowych. W tym rozdziale przedstawiono zatem opisane w literaturze przykładowe instalacje realizujące harvesting energii cieplnej w budynkach w skali makro.

Najczęściej opisane w literaturze realizacje harvestingu energii cieplnej w skali makro dotyczą użycia pomp ciepła w dwóch głównych obszarach. Jednym z nich jest odzysk ciepła odpadowego na potrzeby grzewcze (takiej jak ciepło bytowe lub ciepło wykorzystywane do procesu technologicznego), drugim obszarem jest natomiast zastosowanie pomp ciepła w procesach technologicznych charakteryzujących się dużym, jednoczesnym zapotrzebowaniem na energię cieplną w postaci ciepła technologicznego oraz chłodu technologicznego (np. przy produkcji piwa w browarach lub produkcji nabiału w mleczarniach). [65]

W artykule Fody i współpracowników dotyczącym projektu zrealizowanego w 2012 roku w Finlandii [66] autorzy opisują sposób odzysku ciepła odpadowego pochodzącego z procesu technologicznego wykorzystującego cięcie laserowe. Efektywność energetyczna takich laserowych głowic tnących jest na poziomie zaledwie 0,1% a cała pozostała część pobieranej energii elektrycznej jest oddawana do otoczenia w postaci energii cieplnej poprzez wodne chłodzenie wycinarek. Energia ciepła odpadowego przetwarzana z wykorzystaniem pomp ciepła w omawianym układzie była wykorzystywana w systemie HVAC na potrzeby ogrzewania budynku oraz w układzie przygotowania CWU (Ciepłej Wody Użytkowej). Ze względu na duży naddatek energii odzyskiwanej w stosunku do potrzeb HVAC i CWU w omawianym rozwiązaniu dodatkowo, jako magazyny energii cieplnej, pochłaniający szczytowy nadmiar energii cieplnej, wykorzystano zewnętrzny zbiornik wody o łącznej pojemności 6447 m³. W efekcie realizacji wspomnianego projektu autorzy wskazali na osiągnięcie sezonowego współczynnika efektywności energetycznej układu pomp ciepła na poziomie aż 6,75 przy rocznej wartości odzyskanej energii cieplnej na poziomie 1052 MWh. W artykule autorzy

zwracają jednak uwagę, że pomimo odzyskania wartości energii cieplnej większej niż całkowita wartość zapotrzebowania energetycznego budynku (która wynosiła ok. 920 MWh rocznie), układ niestety nie zapewniał pokrycia całości zapotrzebowania energetycznego budynku, ponieważ duża część energii cieplnej została odzyskana w okresie letnim, podczas którego jej wykorzystanie sprowadza się tylko do podgrzania ciepłej wody użytkowej.

W artykule Hermanucza i współpracowników opisano możliwość zastosowania układu pomp ciepła w procesie technologicznym jako jednoczesne źródło ciepła oraz chłodu technologicznego wykorzystywanego w procesie produkcji piwa [67]. W efekcie zastosowania takiego dwuźródłowego systemu odzysku energii cieplnej obliczony współczynnik COP (*ang. coefficient of performance*) pracy pomp ciepła był jednak równy zaledwie 2,5. W wyniku realizacji projektu szacowana redukcja emisji CO₂ wyniosła ok. 60%, natomiast redukcja konsumpcji energii całkowitej została oszacowana na zaledwie ok. 10%.

3.4 Harvesting energii w skali makro – wnioski literaturowe

Biorąc pod uwagę przedstawione w tym rozdziale literaturowe przykłady instalacji podnoszących efektywność energetyczną budynków oraz przemysłowych procesów technologicznych w skali makroenergetycznej w następnych rozdziałach dysertacji Autor przedstawi zaprojektowane przez siebie oraz uruchomione i nadzorowane w trakcie realizacji doktoratu instalacje automatyki budynkowej. Instalacje te umożliwiają harvesting odpadowej energii cieplnej w budynkach przemysłowych zarówno z bezpośrednim wykorzystaniem odpadowej energii cieplnej do ogrzewania hali produkcyjnej z układu chłodzenia sprężarek jak również wykorzystanie układu pomp ciepła odzyskujących odpadowe ciepło technologiczne na potrzeby bytowe kompleksu budynków.

4. Plan badań

Przeprowadzone i przedstawione w rozprawie doktorskiej badania oraz zaprezentowane wyniki tych badań związane są z dwoma obszarami harvestingu energii w budynkach. W rozdziałach związanych z harvestingiem energii cieplnej w skali makro w budynkach badania skupiają się nad określeniem wielkości poprawy efektywności energetycznej budynków i instalacji jako skutku realizacji projektów w zakresie szeroko rozumianej automatyki budynkowej integrowanej w systemie BMS CHRONOMATIK™.

Z kolei w rozdziałach rozprawy doktorskiej związanych z harvestingiem energii w budynkach w skali mikro tzn. harvestingiem energii wewnątrz budynków pozyskiwanej na potrzeby bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych badania skupiają się nad określeniem zapotrzebowania energetycznego platform czujnikowych LoRa produkowanych przez firmę KMB Grupa oraz nad określeniem potencjału energetycznego wielu źródeł odpadowej energii cieplnej oraz mechanicznej powszechnie dostępnej wewnątrz budynków i umożliwiającej bezbaterijne zasilanie takich platform czujnikowych.

Oba obszary badań przedstawionych w dysertacji ściśle ze sobą korespondują ze względu na koherentny charakter instalacji czujników warunków środowiskowych w budynkach jako jednego z głównych komponentów systemów BMS. Pomiar między innymi temperatury oraz wilgotności powietrza, a także coraz częściej realizowany pomiar stężenia CO₂ w powietrzu bądź koncentracji lotnych związków organicznych służących jako ocena jakości powietrza w budynkach jest kluczowy w zakresie sterowania instalacjami HVAC w budynkach wyposażonych w systemy automatyki BMS. Wydajne, oparte o pomiar wymienionych powyżej parametrów jakości powietrza w budynkach, sterowanie instalacjami HVAC wpływa bezpośrednio na efektywną energetycznie eksploatację budynków przy jednoczesnym zapewnieniu komfortu osób w nich przebywających.

Ważnym nurtem dotyczącym szeroko pojętego harvestingu energii w systemach realizowanych w mojej macierzystej firmie KMB Grupa, a bezpośrednio dotyczących zakresu realizacji doktoratu są systemy wykorzystujące odzysk odpadowej energii (głównie energii cieplnej) na potrzeby ogrzewania, bądź przygotowania ciepłej wody użytkowej w budynkach.

W zakresie inwestycji realizowanych w trakcie trwania studiów doktoranckich, zaprojektowałem, wdrożyłem oraz uruchomiłem kilka instalacji realizujących odzysk ciepła

odpadowego w zakładach produkcyjnych. Dwoma najbardziej reprezentatywnymi i najbardziej wydajnymi układami wśród zrealizowanych projektów są:

- Odzysk ciepła z hali produkcyjnej w kuźni aluminium z zastosowaniem tandemu dwóch pomp ciepła o łącznej mocy 134,2kW. Dzięki zastosowaniu wymiennika ciepła powietrze – woda o dużej mocy oraz układowi automatyki realizującemu algorytm regulacji zapewniający optymalną temperaturę pracy (tzw. parametr) dolnego źródła dla pomp ciepła – w efekcie osiągnięto bardzo wysoką wartości COP i wykonano system zapewniający nie tylko pełną obsługę instalacji CO (Centralne Ogrzewanie) oraz CWU przez cały rok, ale również stale utrzymujący najwyższy możliwy parametr COP. W efekcie tak zmodernizowany zakład produkcyjny całkowicie wyeliminował zużycie gazu ziemnego na potrzeby ogrzewania CO i CWU, tym samym znacznie podnosząc efektywność energetyczną całego budynku.
- Instalacja odzysku ciepła odpadowego z układu chłodzenia sprężarek w dziale przygotowania sprężonego powietrza jednego z wrocławskich zakładów produkcyjnych. Projekt ten realizuje odzysk ciepła na dwa sposoby. Jeden podukład odpowiedzialny jest za sterowanie szeregiem przepustnic na kanałach wentylacyjnych odprowadzających ciepło odpadowe z chłodzenia sprężarek i w zależności od potrzeb kieruje to ciepłe powietrze bądź do ogrzewania hali produkcyjnej, bądź do pomieszczenia sprężarek (ta funkcja grzewcza dla sprężarkowni stosowana jest tylko w okresie zapotrzebowania na ogrzewanie). Drugi podukład wykorzystujący wymiennik ciepła z układu chłodzenia sprężarek realizuje odzysk ciepła na potrzeby przygotowania CWU na cele bytowe pracowników zakładu. W efekcie realizacji tego projektu znacząco zredukowano w zakładzie konsumpcję gazu ziemnego na potrzeby ogrzewania oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Znacząca większość projektów automatyki budynkowej realizowanych przy moim współdziałaniu przez firmę KMB Grupa jest częścią składową zintegrowaną z nadrzędnym systemem BMS CHRONOMATIK™. Integracja tych projektów w ramach systemu nadrzędnego BMS CHRONOMATIK™ zapewnia ciągłe monitorowanie wartości wszystkich kluczowych parametrów pracy między innymi: temperatury, przepływu, ciśnienia, pomiaru energii, itp. dzięki czemu możliwa jest ciągła analiza danych, a w efekcie osiągnięcie największych korzyści w kontekście optymalizacji energetycznej oraz zwiększania efektywności energetycznej budynków z systemem BMS CHRONOMATIK™.

5. Harvesting ciepła odpadowego w kuźni aluminium.

5.1 Wstęp

Jak wspomniano w rozdziale trzecim harvesting energii cieplnej na dużą skalę jest możliwy (i realizowany w praktyce) głównie przy użyciu pomp ciepła. W niniejszym rozdziale opisany zostanie projekt harvestingu energii cieplnej w dużej skali (określanej w dysertacji jako „skala makro”) w zespole wielkopowierzchniowych budynków techniczno-socjalnych, opracowany, zrealizowany i nadzorowany przez Autora oraz wdrożony w jednym z zakładów przemysłowych na Górnym Śląsku.

5.2 Opis charakterystyki zakładu

Zrealizowany projekt modernizacji kotłowni gazowej w zakładzie produkcyjnym jakim była kuźnia aluminium w Rudzie Śląskiej zakładał całkowite wyeliminowanie konsumpcji gazu na potrzeby ogrzewania części biurowej oraz pomieszczeń funkcyjnych zakładu produkcyjnego, a także na przygotowanie CWU.

Charakter pracy zakładu produkcyjnego realizującego wykuwanie elementów układów hamulcowych dla przemysłu motoryzacyjnego wiąże się z generowaniem dużej ilości ciepła odpadowego pochodzącego z procesu technologicznego. Proces wykuwania elementów układu hamulcowego w pierwszym kroku polega na przygotowaniu materiału to znaczy cięciu prętów aluminium na walce o określonych wymiarach. Następnie materiał ten poddawany jest podgrzaniu do temperatury ok. 500 °C w piecach elektrycznych. Tak przygotowany materiał zostaje osadzony w matrycy prasy mimośrodowej i przekuty w element o pożądanym kształcie. Tak uzyskane półprodukty zostają następnie ostudzone oraz są poddawane kolejnym obróbkom chemicznym (wytrawianie) oraz mechanicznym (szlifowanie, polerowanie) w efekcie osiągając wymagane właściwości. Największym źródłem ciepła odpadowego w tym procesie produkcyjnym są stanowiska pras mimośrodowych. Przy każdej prasie znajduje się indywidualny piec elektryczny, a także stanowisko odstawcze produktu. Hala produkcyjna zakładu zajmuje powierzchnię 2600 m² na której znajduje się czternaście stanowisk pras. Poza

halą produkcyjną do zakładu przynależą: magazyny, pomieszczenia funkcyjne (sprężarkownia, warsztat, kotłownia) oraz część biurowo-socjalna.

Ciepło odpadowe z procesu produkcyjnego zapewnia temperaturę powietrza na hali produkcyjnej (mierzoną na wysokości ok. 1,5 m od posadzki) powyżej 30°C zimą oraz powyżej 40°C latem. Tak wysokie temperatury powietrza są rejestrowane pomimo możliwie największego udziału naturalnej wentylacji hali tj. otwartych bram segmentowych, otwartych czerpni w ścianach zewnętrznych oraz otwartych świetlików dachowych. Temperatura powietrza na hali produkcyjnej rejestrowana pod dachem jest jeszcze o ok. 5 °C wyższa.

Ze względu na tak dużą, niewykorzystaną ilość ciepła odpadowego w obszarze hali produkcyjnej Inwestor zdecydował się przeprowadzić modernizację kotłowni gazowej w sposób umożliwiający wykorzystanie co najmniej części ciepła odpadowego. W efekcie zaproponowanego przeze mnie rozwiązania jednak całkowicie wyeliminowano pracę kotła gazowego na potrzeby pracy kotłowni tj. zapewnienia ciepła technologicznego do ogrzewania obszaru magazynów, pomieszczeń funkcyjnych, biurowych i socjalnych, a także na potrzeby przygotowania CWU w pełnym całorocznym okresie eksploatacyjnym.

5.3 Stan pierwotny kotłowni

Opisywany projekt dotyczył modernizacji kotłowni gazowej wyposażonej oryginalnie w kondensacyjny kocioł gazowy De Dietrich C 230 stosowany przed modernizacją jako podstawowe źródło energii cieplnej dla obiektu kuźni aluminium. Kocioł gazowy o mocy znamionowej 217 kW zapewniał z dużym zapasem mocy całkowite pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną obiektu.

Wymienione w poniższym opisie elementy instalacji kotłowni zostały oznaczone na załączonym poniżej schemacie technologicznym kotłowni, przygotowanym przez firmę KMB i przekazanym w zakresie opracowania dokumentacji powykonawczej opisywanej instalacji oraz przedstawione na schemacie na Rys. 17.

Oryginalna instalacja kotłowni była wyposażona w dwa bufory wodne :

- Główny bufor ciepła o pojemności 1500 l pracujący w układzie zamkniętym na potrzeby magazynowania energii cieplnej, zapewniający stabilną i optymalną pracę kotła gazowego. Z tego bufora zasilany był rozdzielacz obsługujący pięć obwodów instalacji: CT1 – ciepło

technologiczne centrala wentylacyjna 1, CT2 – ciepło technologiczne centrala wentylacyjna 2, CO – ogrzewanie grzejnikowe części biurowej i socjalnej, CT3 – ciepło technologiczne aparaty grzewczo wentylacyjne oraz obieg CWU.

- Bufor CWU o pojemności 1000 l zapewniający zapas ciepłej wody użytkowej wystarczający na potrzeby wzmożonego zużycia wody wynikającego z kąpieli całego personelu zakładu produkcyjnego po każdej zmianie. Powodem tego jest bardzo brudne środowisko pracy wynikające z obecności smaru grafitowego stosowanego w procesie technologicznym.

Praca kotła gazowego w pierwotnym projekcie kotłowni zapewniała zasilanie układu grzewczego w czynnik o temperaturze 70 °C. Instalacje wrażliwe na tak wysoką wartość temperatury zasilania (instalacja ciepłej wody użytkowej, instalacja centralnego ogrzewania wyposażona w grzejniki) dodatkowo posiadały trójdrogowe zawory regulacyjne pozwalające na regulację temperatury zasilania i obniżenie jej do niższych wartości zadanych akceptowanych przez wspomnianą armaturę.

5.4 Koncepcja rozwiązania

Opracowany projekt modernizacji kotłowni zakładał wykorzystanie dwóch pomp ciepła (model WPF 66 firmy Stiebel Eltron) zasilanych ciepłem odpadowym pochodzącym z hali produkcyjnej. Ze względu na znaczną odległość pomieszczenia kotłowni od centralnej części hali produkcyjnej (gdzie zagęszczenie parku maszynowego jest największe, a temperatura powietrza osiąga najwyższe wartości) zdecydowano wykorzystać pompy ciepła zasilane cieczą. Jednostki WPF 66 są pompami ciepła typu woda/woda przeznaczonymi do zasilania strony niskotemperaturowej układu wodą lub roztworem glikolu.

Poza ograniczeniem technicznym wynikającym ze znacznej odległości pomieszczenia kotłowni od centralnej części hali (gdzie jak wspomniano panują najwyższe temperatury powietrza) dobór pomp ciepła typu woda/woda wynikał także ze względu na znaczne zanieczyszczenie powietrza wewnątrz hali produkcyjnej zawieszonym w powietrzu pyłem grafitowym, pochodzącym wprost z procesu technologicznego. Pył grafitowy wykorzystywany jest w postaci zawiesiny wodnej nanoszonej na formy i matryce jako smar. W efekcie po każdym cyklu pracy prasy znaczna część zawiesiny pyłu grafitowego w kontakcie z materiałem rozgrzanym do ponad 500 °C ulega rozproszeniu do otoczenia tworząc zawieszony w powietrzu pył grafitowy. Alternatywą dla zaproponowanego i wdrożonego rozwiązania

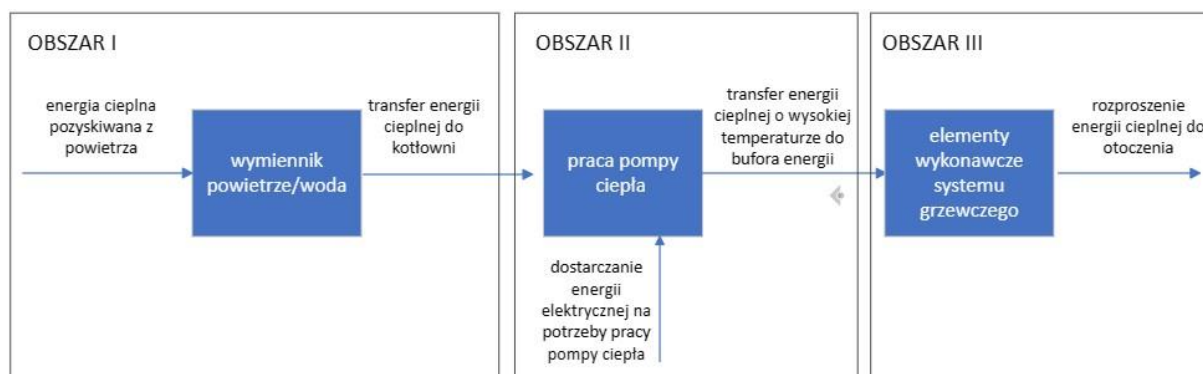
mogłyby być pompy ciepła typu powietrze/woda, które realizowałyby zadanie w znacznie prostszej technicznie instalacji. Podczas projektowania koncepcji rozwiązania uwzględniono jednak bardzo wysokie ryzyko szybkiego zabrudzenia wymiennika ciepła w jednostce zewnętrznej powietrznej pompy ciepła, spowodowane permanentną pracą poniżej punktu rosy, co skutkowałoby szybkim osadzaniem się pyłu grafitowego na powierzchni ciągle zwilżonego wymiennika. W rozwiązaniu z wykorzystaniem wybranych pomp ciepła woda/woda wymienniki zostały zabudowane w kanałach wentylacyjnych z filtrami powietrza oraz zabezpieczone programową obsługą monitorowania wartości temperatury punktu rosy oraz poziomu zabrudzenia filtrów. Pozwoliło to w znacznej mierze ograniczyć problem zanieczyszczenia strony powietrznej wymienników ciepła pyłem grafitowym.

Oprócz wyżej opisanych aspektów technicznych, wybór pomp ciepła typu woda/woda był podyktowany także wyższą wartością współczynników energetycznych COP dla tego rodzaju urządzeń w stosunku do pomp powietrze/woda [68]. Dla zastosowanych pomp ciepła Steiebel Eltron pracujących na czynniku chłodniczym R410A współczynnik wydajności energetycznej COP wyznaczany według normy EN14511 wynosi 4,56 [69] co oznacza, że w optymalnych warunkach pracy z wykorzystaniem ciepła odpadowego pobranego z hali produkcyjnej, z każdego 1 J dostarczonej energii elektrycznej pompa ciepła dostarcza 4,56 J energii cieplnej.

Przedstawione w rozdziale dotyczącym przeglądu literatury projekty związane z realizacją układów odzyskujących odpadową energię cieplną na cele bytowe w budynkach, a także projektowanie przemysłowych układów energetycznych w oparciu o pompy ciepła udowadniają, że prowadzenie badań i szukanie rozwiązań związanych z optymalizacją energetyczną procesów technologicznych w dużej skali, a także zastępowanie konwencjonalnych źródeł energii źródłami wykorzystującymi odpadową energię z otoczenia jest uzasadnionym kierunkiem rozwoju przyczyniającym się do globalnej redukcji konsumpcji paliw kopalnych, emisji CO₂, a także kosztów związanych wykorzystaniem energii na utrzymanie bytowe budynków. Te wstępne wnioski zostaną uzasadnione i szerzej mówione w dalszej części rozdziału.

5.5 Opis opracowanego rozwiązania

Zaproponowana innowacyjna instalacja odzysku odpadowego ciepła technologicznego na cele grzewcze została podzielona na trzy obszary, co zilustrowano poglądowo na Rys. 13.



Rys. 13. Schemat przepływu energii przez układ

Obszar I – odzysk energii cieplnej z powietrza na hali

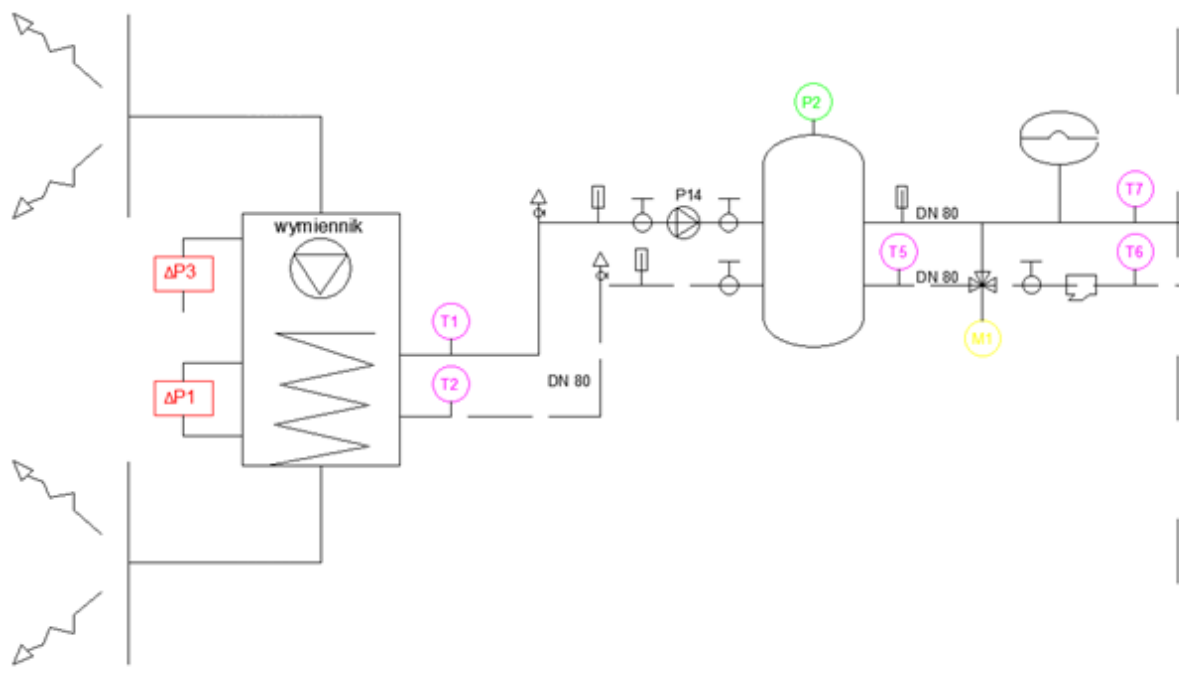
W centralnej części hali produkcyjnej, na antresoli technicznej zainstalowano układ wymiennika ciepła powietrze/woda pozyskującego energię cieplną z otoczenia. Wymiennik zaprojektowano i wykonano jako układ dwóch przelotowych kanałów wentylacyjnych, wyposażonych w wentylatory promieniowe zabezpieczone filtrami powietrza klasy G4, w których zainstalowano wymienniki ciepła, zapewniające swobodną wymianę ciepła z powietrza do wody realizując tym samym stały dostęp instalacji odzysku ciepła do energii cieplnej. Każdy z tych wymienników obsługuje instalację jednej z dwóch pomp ciepła zainstalowanych w kotłowni. Wpływ nieprzyjaznego, brudnego środowiska pracy, związanego ze znacznym zabrudzeniem powietrza pyłem grafitowym doskonale widać na zdjęciu przedstawionym na Rys. 14. Na zdjęciu A pokazano filtr powietrza wymiennika po tygodniu pracy układu. Po uruchomieniu układu, dla zachowania jego prawidłowej pracy, filtry powietrza wymagały wymiany serwisowej co tydzień. Już w trakcie eksploatacji układu w 2022 roku zainstalowano filtry powietrza zamontowane na odciągach każdej z pras, w efekcie czego nastąpiła poprawa czystości powietrza, tym samym znacznie redukując czasookres koniecznej wymiany filtrów z tygodnia do ośmiu tygodni.



Rys. 14. Zdjęcia przedstawiające układ wymiennika ciepła powietrze/woda: A) zabrudzenie filtra powietrza po tygodniu eksploatacji, B) widok antresoli z zainstalowanym wymiennikiem ciepła z poziomu hali produkcyjnej, C) widok obudowy wymiennika ciepła.

Schemat instalacji jednego z dwóch bliźniaczych wymienników ciepła powietrze/woda przedstawiono na Rys. 15. W lewej części schematu znajduje się fragment układu odpowiedzialny za pozyskiwanie energii cieplnej z powietrza (powietrze dostarczane do wymiennika kanałami stalowymi o przekroju 1200 x 1200 mm). Ruch powietrza zostaje wymuszony pracą wentylatora osiowego, napędzanego silnikiem jednobiegowym o mocy 180W, zapewniającym przepływ powietrza przez wymiennik na poziomie 3580 m³/h. Jak wspomniano wcześniej, wymiennik ciepła został zabezpieczony filtrem powietrza klasy G4. Filtr powietrza oraz wentylator posiadają presostaty powietrza, dzięki którym system automatyki BMS wykrywa zabrudzenie filtrów oraz sygnalizuje pracę bądź awarię wentylatorów. Układ hydrauliczny wymiennika ciepła został wyposażony w pompę obiegową Wilo, szereg urządzeń hydraulicznych (przeponowe naczynie wzbiorcze, filtr siatkowy, automatyczne odpowietrzacze instalacji, itp.), a także dwa rezystancyjne czujniki temperatury (typu Pt1000) mierzące temperaturę wody na zasilaniu oraz na powrocie wymiennika ciepła.

Pomiędzy instalacją wodną wymiennika ciepła, a instalacją pomp dolnego źródła ciepła (pracującą na roztworze glikolu propylenowego) zastosowano sprzęgło hydrauliczne pozwalające na przekazywanie energii cieplnej pomiędzy odseparowanymi układami hydraulicznymi bez mieszania się ich nośników energii.



Rys. 15. Schemat instalacji wymiennika ciepła obsługującego instalację niskiego źródła pompy ciepła „A” z zaznaczonymi elementami systemu automatycznej regulacji wartości temperatury źródła.

Po stronie instalacji pomp ciepła zainstalowano zawór mieszający, pełniący najważniejszą funkcję w systemie automatyki BMS CHRONOMATIK, zawiadującym pracą omawianego rozwiązania. Zawór mieszający zainstalowano pomiędzy zasilaniem a powrotem, blisko sprzęgła hydraulicznego na instalacji glikolowej. Jego zadaniem jest utrzymywanie zadanej temperatury czynnika zasilania pomp ciepła. Utrzymywanie parametru temperatury zasilania pomp ciepła pozwala uzyskać pracę pomp ciepła z możliwie najwyższą efektywnością energetyczną czyli najwyższą wartością współczynnika COP. Poza siłownikiem trójdrogowego zaworu mieszacza, instalacja została wyposażona w cyfrowy przetwornik ciśnienia oraz czujniki temperatury czynnika w instalacji zainstalowane w trzech punktach (temperatura zasilania, temperatura powrotu przed zaworem mieszającym, temperatura powrotu

za zaworem mieszającym). Parametry te są również przekazywane przewodowo do systemu automatyki BMS CHRONOMATIK™.

Wszystkie sygnały pomiarowe na antresoli technicznej zostały zintegrowane w systemie automatyki BMS CHRONOMATIK™ z wykorzystaniem sterownika WAGO 750-881 wyposażonego w niezbędne moduły rozszerzeń. Komunikacja sterownika z głównym sterownikiem BMS pracy kotłowni została zrealizowana z wykorzystaniem połączenia Ethernet oraz protokołu sieciowego Modbus TCP/IP. Na zdjęciu na Rys. 16. przedstawiono widok kompletnej rozdzielnic zainstalowanej na antresoli wraz zabudowanymi aparatami oraz sterownikiem PLC.

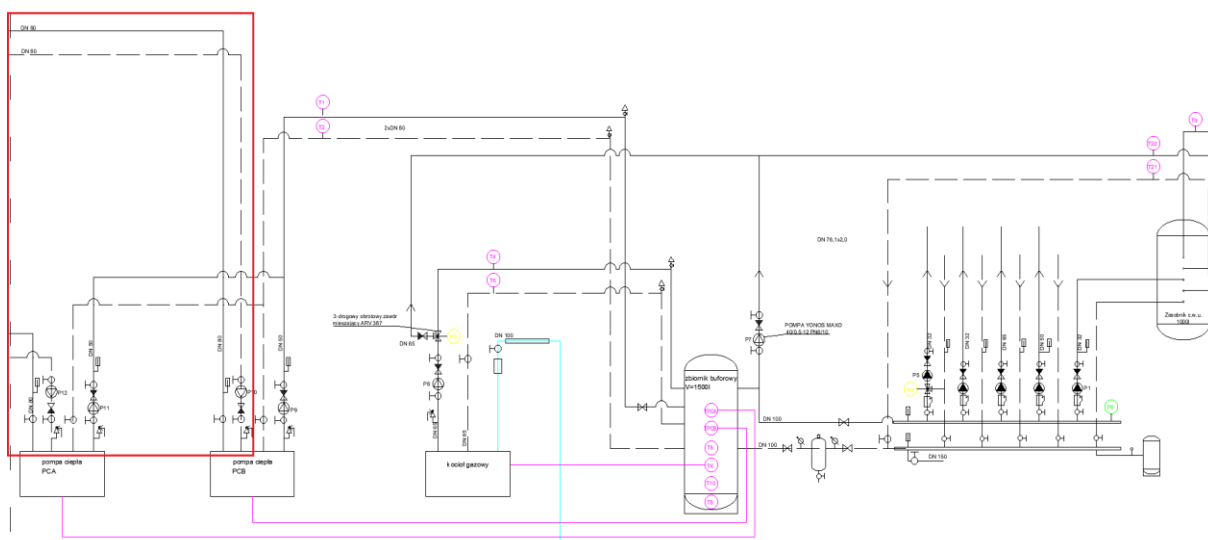


Rys. 16. Zdjęcia rozdzielnic RZS 1.1. (automatyka wymienników ciepła)

Obszar II – transfer energii cieplnej do wodnego układu zasilania pomp ciepła.

Na schemacie technologicznym przedstawionym na Rys. 17. kolorem czerwonym zaznaczono drugą część instalacji odpowiedzialną za transfer energii cieplnej od wymiennika powietrze/woda do pomp ciepła.

Transfer ciepła pozyskanego z wykorzystaniem wymienników ciepła powietrze/woda, jest realizowany termoizolowanym rurociągiem o średnicy DN80 do kotłowni na dystansie ok. 50 m. Transfer ciepła w Obszarze II obsługany został z wykorzystaniem urządzeń automatyki zabudowanych na instalacji w obszarze kotłowni. W tym obszarze system automatyki BMS CHRONOMATIK™ zapewnia prawidłową pracę pomp obiegowych instalacji, czyli przede wszystkim ich uruchomienie przed załączeniem pomp ciepła (gdyż w przeciwnym wypadku pompy ciepła o tak dużej mocy w przeciągu kilkadziesiąt sekund powodują zamrożenie wymiennika ciepła wewnątrz pompy ciepła co grozi poważną awarią pompy ciepła).. Po starcie układu system BMS CHRONOMATIK™ wymusza najszybsze możliwe schłodzenie układu (odbiór ciepła z instalacji przez pompy ciepła) do temperatury 20 °C czyli do wartości zapewniającej najwyższy wskaźnik COP dla użytych pomp ciepła. Następnie system BMS CHRONOMATIK™ utrzymuje wartość zadaną temperatury 20 °C w układzie tak aby pompy ciepła pracowały z optymalną wartością COP. Pompy obiegowe układu (Wilo Stratos-D 80/1-12) realizują pracę na stałym wydatku zapewniając przepływ cieczy gwarantujący dostarczanie wystarczającej ilości energii cieplnej do układu, osiągając praktycznie stałotemperaturową pracę pomp ciepła w ich najbardziej efektywnym energetycznie punkcie pracy. System automatyki BMS CHRONOMATIK™ zarządza także pracą trójdrogowego zaworu mieszającego. Instalacja hydrauliczna źródła niskotemperaturowego, czyli obwód cieczy pomiędzy sprzęgłem na antresoli, a pompami ciepła została zaprojektowana do pracy z roztworem glikolu w wodzie o stężeniu 39%. W efekcie wartość ciepła właściwego nośnika wynosi 3,38 kJ/kgK co oznacza, że jest ono niższe niż wartość ciepła właściwego czystej wody. W efekcie wydajność instalacji obiegowej dolnego źródła musi być większa, aby zapewnić dostarczanie wymaganej ilości ciepła dla poprawnej pracy pomp ciepła (tak aby uniknąć przechładzania czynnika w instalacji). Poza zastosowaniem wydajniejszych pomp obiegowych (Wilo Stratos) zainstalowanych po niskotemperaturowej stronie instalacji, w ramach kompensacji różnicy w fizycznych możliwościach przenoszenia ciepła, instalacja hydrauliczna została zaprojektowana w oparciu o rury o większej średnicy (DN80), w porównaniu do rur o średnicy DN50 zastosowanych po stronie instalacji zasilającej bufor ciepła (czyli po stronie wysokotemperaturowej układu).



Rys. 17. Schemat technologiczny instalacji kotłowni. Kolorem czerwonym zaznaczono część instalacji odpowiedzialnej za transfer energii cieplnej od wymiennika ciepła do pomp ciepła.

Obszar III – praca kotłowni, wykorzystanie ciepła odpadowego na cele ogrzewania oraz przygotowania CWU.

Obszar III transferu energii cieplnej w omawianym rozwiązaniu związany jest bezpośrednio z pracą pomp ciepła zainstalowanych w kotłowni, pokazanych na Rys. 18.

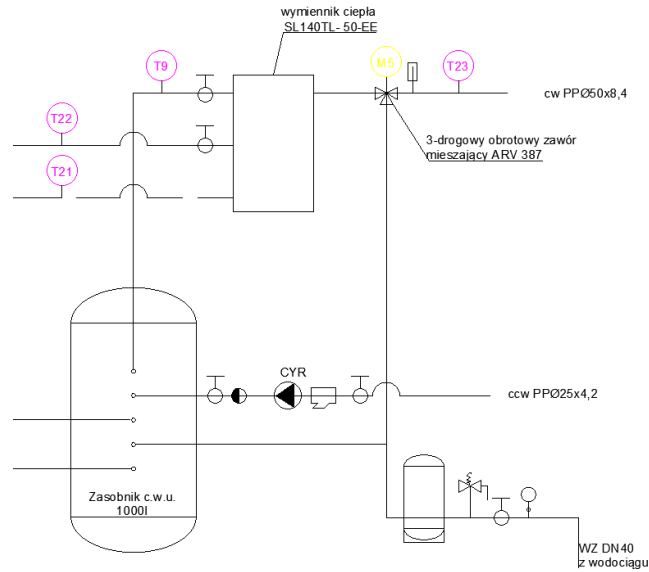


Rys. 18. Pompy ciepła Steibel Eltron WPF 66 zainstalowane w kotłowni.

Bardzo ważnym aspektem omawianego rozwiązania było zaprojektowanie, prefabrykacja, dostarczenie oraz uruchomienie kompletnej rozdzielnicy automatyki, wyposażonej w swobodnie programowalny sterownik PLC WAGO 750-8207 wraz z niezbędnymi modułami zapewniający w pełni automatyczną pracę kotłowni z zachowaniem szczególnej dbałości w zakresie utrzymywania zadanej wartości parametru temperaturowego czynnika zasilającego pompy ciepła, zapewnieniem poprawnej pracy kotłowni, monitorowaniem oraz zapisywaniem wartości mierzonych parametrów pracy kotłowni.

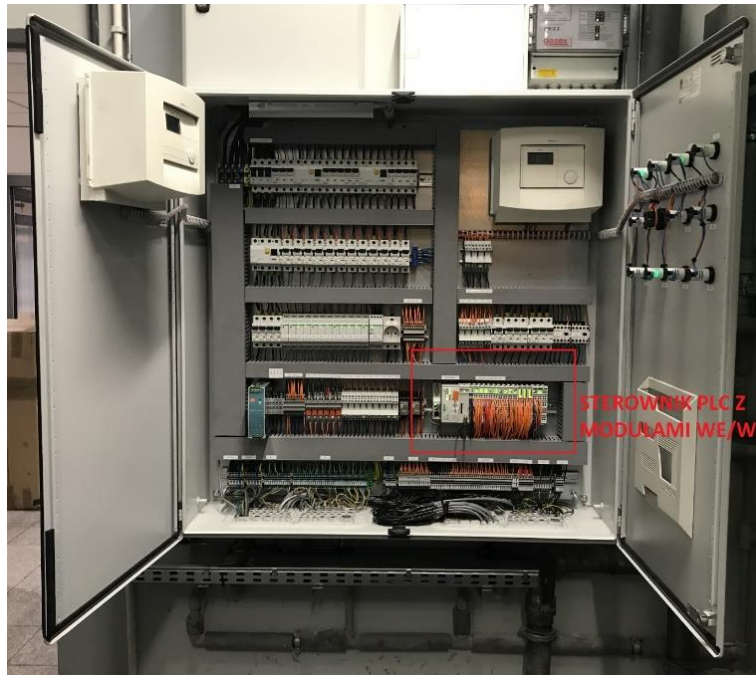
Układ zaprojektowano tak aby zapewnić zasilanie głównego bufora ciepła czynnikiem o temperaturze w zakresie 46 – 51 °C zasilającym bezpośrednio wszystkie obiegi grzewcze CT (ciepło technologiczne) tj. nagrzewnice wodne central wentylacyjnych oraz nagrzewnice wodne agregatów grzewczych w magazynach. Grzejnikowa instalacja CO została wyposażona w mieszający zawór trójdrogowy z elektrycznym siłownikiem, umożliwiającą regulowanie wartości temperatury zasilania instalacji CO względem krzywej grzewczej, w zależności od wartości temperatury zewnętrznej. Dynamiczny nadzór nad tym procesem pełni również system BMS CHRONOMATIK™.

Zasobnik CWU zasilany jest również czynnikiem z bufora głównego. Ze względu jednak na chwilowe duże pobory ciepłej wody użytkowej wynikające z kąpeli pracowników po każdej zmianie, układ CWU został rozbudowany o dodatkowy wymiennik ciepła SL140TL – 50-EE o mocy 200kW zainstalowany na zasilaniu CWU. Wymiennik ten jest zasilany bezpośrednio z bufora głównego. Zabieg ten całkowicie wyeliminował w obwodzie zasilania CWU efekt szybkiego wystudzenia się bufora CWU na skutek intensywnego poboru ciepłej wody. Ze względu na wysoką wartość temperatury zasilania CWU, instalacja CWU dodatkowo została również wyposażona w trójdrogowy zawór mieszający (ARV 387 z siłownikiem termostatycznym) zapewniający stałą wartość temperatury zasilania CWU na poziomie 42 °C.



Rys. 19. Schemat instalacji CWU rozbudowanej o wymiennik ciepła oraz trójdrogowy zawór mieszający.

Poza podstawowymi zadaniami sterowania i nadzoru pracy kotłowni rozbudowana automatyka nadzorczego systemu BMS zapewnia również szereg funkcji dodatkowych. Wykorzystując sterownik PLC WAGO 750-8207 wykonano wizualizację pracy kotłowni z wyszczególnionymi najważniejszymi parametrami pracy (temperatury obiegów, poziomy otwarcia siłowników zaworów mieszających, sygnały pracy oraz awarii strategicznych urządzeń systemu). Program sterownika PLC realizuje zapis danych na karcie SD w formacie dobowych plików CSV. Wśród danych pomiarowych oraz zbieranych sygnałów wypracowano wartości ostrzegawcze oraz krytyczne pracy kotłowni. Sterownik PLC wyposażony w moduł modemu GSM został zaprogramowany w sposób realizujący także algorytm powiadamiania za pośrednictwem wiadomości SMS grup użytkowników o wystąpieniu stanów awaryjnych i alarmów. Dzięki modemowi GSM skonfigurowane zostało połączenie VPN, umożliwiające również bezpieczne prowadzenie zdalnych prac serwisowych. Rozdzielnica automatyki kotłowni został przedstawiona na Rys. 20.



Rys. 20. Zdjęcie rozdzielnicy automatyki kotłowni.

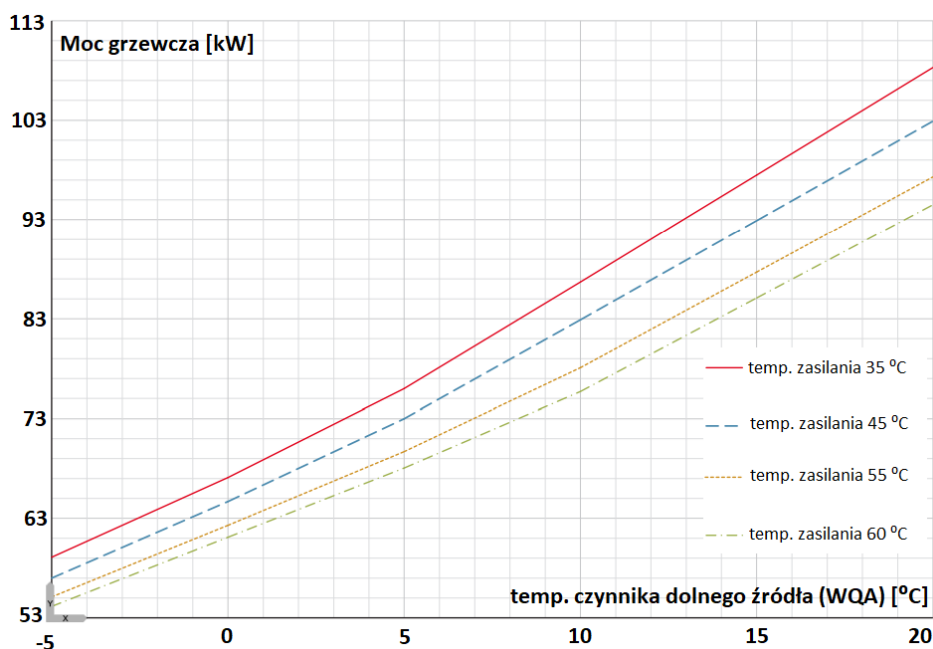
5.6 Badanie sprawności energetycznej układu

Opisane powyżej i zrealizowane zadanie modernizacji kotłowni miało charakter wdrożeniowy, przy czym podstawowym wymaganiem stawianym temu projektowi było osiągnięciem całkowitego pokrycia wydatku energetycznego we wszystkich obszarach fabryki na cele grzewcze w zimie oraz na przygotowanie ciepłej wody użytkowej przez cały rok poprzez harvesting odpadowej energii cieplnej z obszaru produkcyjnego kuźni aluminium. Nowa instalacja kotłowni oparta o pracę pomp ciepła zasilanych ciepłem odpadowym pochodzącym z obszarów produkcji w pełni realizuje to zadanie, odzyskując ciepło odpadowe i całkowicie eliminując pracę wcześniej wykorzystywanego kotła gazowego De Dietrich C230 (o mocy 217 kW).

Ze względu na komercyjny charakter projektu przy kalibracji wydajności energetycznej układu (to znaczy przy ustalaniu wartości optymalnej temperatury źródła, ustalaniu optymalnych wartości przepływu pomp obiegowych dolnego źródła oraz po stronie zasilania, ustawianiu szeregu innych parametrów pracy pomp ciepła) regulacji dokonywano w oparciu o dane przedstawione w rozszerzonych instrukcjach kalibracji pomp ciepła oraz o wytyczne ich producenta. Zmiany parametrów kluczowych dla efektywnej pracy pomp ciepła poza wskazywany przez producenta zakres bądź niezgodny z jego zaleceniami skutkowałby utratą

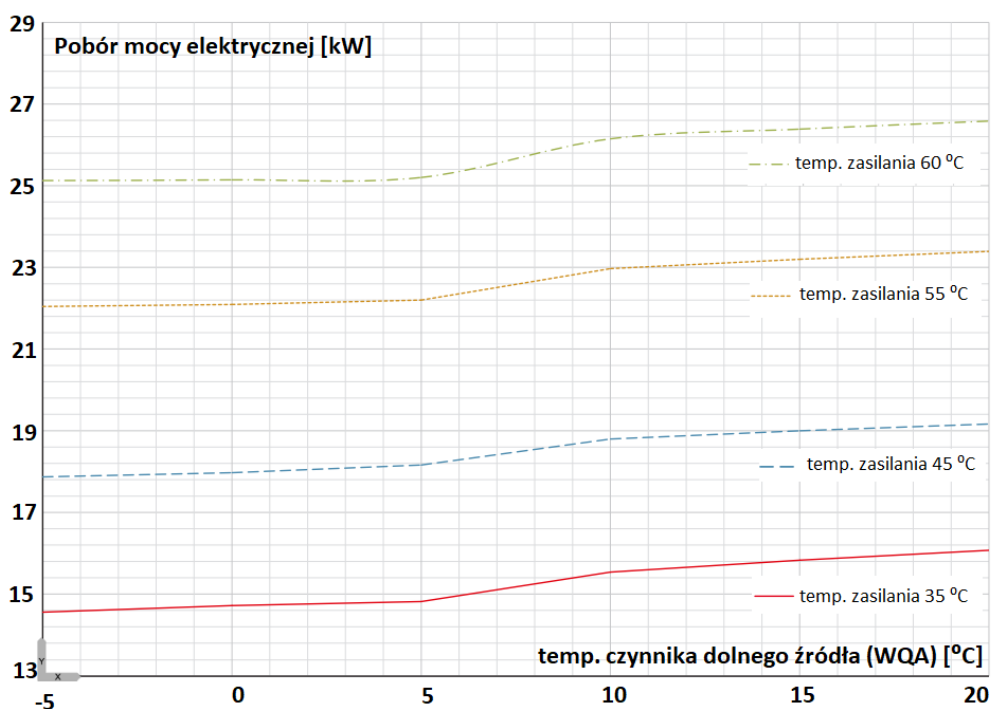
gwarancji urządzeń w przypadku wystąpienia awarii. Badania związane z określeniem sprawności energetycznej układu oraz porównanie danych pomiarowych z danymi przedstawionymi przez producenta zrealizowano w oparciu o mierzone wartości przepływu czynnika w instalacji z wykorzystaniem pomp obiegowych Wilo Stratos (regulowana wartość przepływu czynnika), pomiaru temperatur na obiegach oraz pomiaru wartości prądu zasilania pracujących pomp ciepła z wykorzystaniem cęgowego miernika Sonel CMP-400.

W dokumentacji urządzeń Stiebel Eltron serii WPF [70] producent przedstawia główne zależności związane z efektywnością pomp ciepła WPF 66 w zależności od wartości temperatury zasilania instalacji grzewczej. Głównym czynnikiem wpływającym na wartość mocy grzewczej pomp ciepła jest wartość temperatury zasilania. Generalną zasadą jest to, że im temperatura ta jest niższa, tym wartość mocy grzewczej pompy ciepła jest większa. Dla omawianych pomp ciepła wartość temperatury zasilania może być regulowana w zakresie 35°C – 60 °C. Najistotniejszym zadaniem w celu zwiększenia efektywności energetycznej układu (a tym samym efektywności energetycznej budynku, który jest ogrzewany tym harvestingowym systemem grzewczym) jest dobranie możliwie najniższej wartości temperatury zasilania instalacji grzewczych. W przypadku omawianej kotłowni, graniczna wartość temperatury bufora układu spełniająca wszystkie wymagania instalacji grzewczej oraz CWU została zaprogramowana na poziomie temperatury 46 °C dla załączenia pracy pompy ciepła i 51 °C dla wyłączenia pracy pomp ciepła. Osiągnięcie tak niskiej wartości temperatury zasilania kotłowni uzyskano przede wszystkim poprzez zwiększenie przepływu czynnika grzewczego obiegów CO i CT (czyli zasilania urządzeń grzewczych central wentylacyjnych oraz nagrzewnic w hali magazynu). Odpowiednio niską temperaturę zasilania przy dużych chwilowych poborach energii na cele CWU uzyskano również doposażając układ CWU w opisywany wyżej wymiennik ciepła o dużej mocy, zapewniający dostarczenie wystarczającej ilości ciepłej wody na cele sanitarne nawet podczas jednoczesnej kąpieli wielu osób po każdej zmianie produkcyjnej. Ten duży, lecz stosunkowo krótkotrwały pobór energii cieplnej jest najwyższym chwilowym wysiłkiem energetycznym dla układu kotłowni i zostanie szerzej omówiony w dalszej części rozdziału.



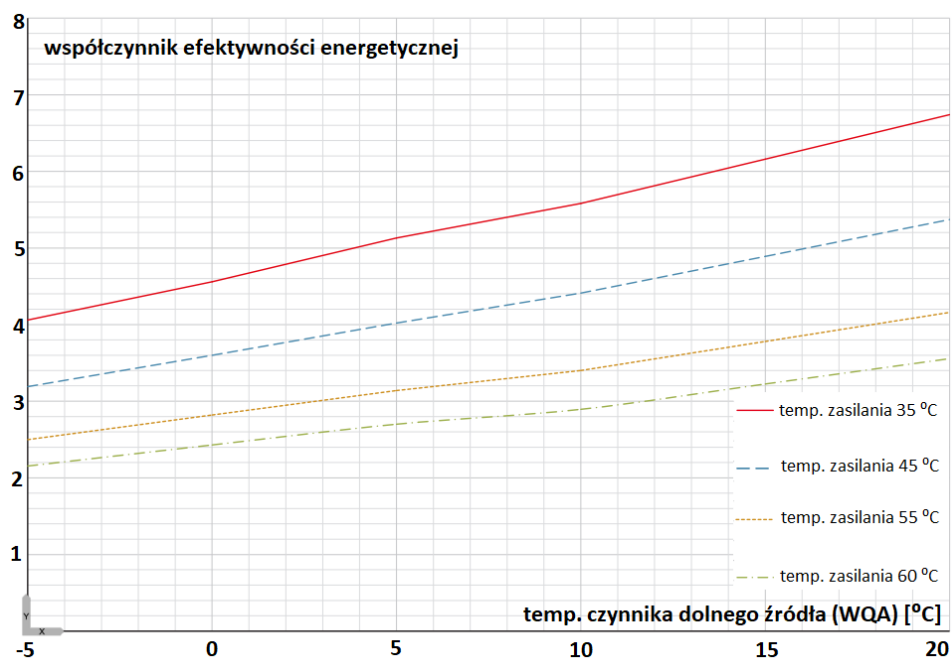
Rys. 21. Krzywe generowanej mocy grzewczej [kW] w zależności od wartości temperatury zasilania dolnego źródła - WQA [°C] dla czterech wartości temperatur zasilania na wyjściu z pompy ciepła. Opracowano na podstawie danych producenta Stiebel Eltron.

Z zależności (pokazanych na Rys. 21.) przedstawionych przez producenta zastosowanych pomp ciepła wynika, że dla osiągnięcia najwyższej mocy grzewczej pompa ciepła powinna pracować z możliwie najwyższą wartością temperatury źródła ciepła (w warunkach poprawnej pracy temperatura ta nie powinna być niższa od + 8 °C i nie wyższa niż 20 °C) oraz z możliwie najniższą temperaturą zasilania bufora ciepła. Dla omawianych pomp ciepła (zgodnie z danymi podanymi przez producenta) różnica pomiędzy skrajnymi, możliwymi do osiągnięcia przez pompy ciepła wartościami temperatury zasilania bufora ciepła przy największej dopuszczalnej temperaturze zasilania pompy ciepła równej 20 °C różnica wartości generowanej mocy grzewczej wynosi 14 kW, co stanowi zaledwie ok. 12,8 % mocy maksymalnej pompy ciepła. Dane te po zestawieniu z danymi dotyczącymi pobieranej mocy elektrycznej przy pracy dla tych samych warunków temperaturowych pozwolą określić różnice efektywności energetycznej, a także oszacować oczekiwaną wartość wskaźnika COP dla pracy pompy ciepła w przedstawionej instalacji.



Rys. 22. Krzywe pobieranej mocy elektrycznej [kW] w zależności od wartości temperatury zasilania dolnego źródła - WQA [°C] dla czterech wartości temperatur zasilania na wyjściu z pompy ciepła. Opracowano na podstawie danych producenta Stiebel Eltron.

Wykorzystane pompy ciepła Stiebel Eltron WPF 66 są pompami stało-obrotowymi. Zmiana wartości pobieranej mocy elektrycznej w zależności od wartości temperatur przedstawionych na wykresie Rys. 22. związana jest z fizyką pracy układu pompy ciepła a pobierana z sieci energia elektryczna jest niemal w całości zużywana przez sprężarkę pompy ciepła. Dla najwyższej, dopuszczalnej wartości temperatury zasilania pompy ciepła tj. 20 °C różnica poboru energii elektrycznej dla skrajnych wartości temperatury zasilania bufora ciepła tj. 35 °C (pobierana moc elektryczna 16 kW) i 60 °C (obierana moc elektryczna 26,6 kW) wynosi 10,6 kW, co z kolei stanowi 40 % mocy maksymalnej (dla temperatury zasilania 60 °C) i jest znaczącym parametrem obniżającym sprawność pracy pompy ciepła w kontekście różnicy wartości temperatury zasilania. Dysponując danymi dotyczącymi mocy grzewczej oraz konsumpcji energii elektrycznej producent przygotował zestawienie współczynników efektywności energetycznej pomp ciepła dla tych samych warunków temperaturowych, co zilustrowano na Rys. 23.



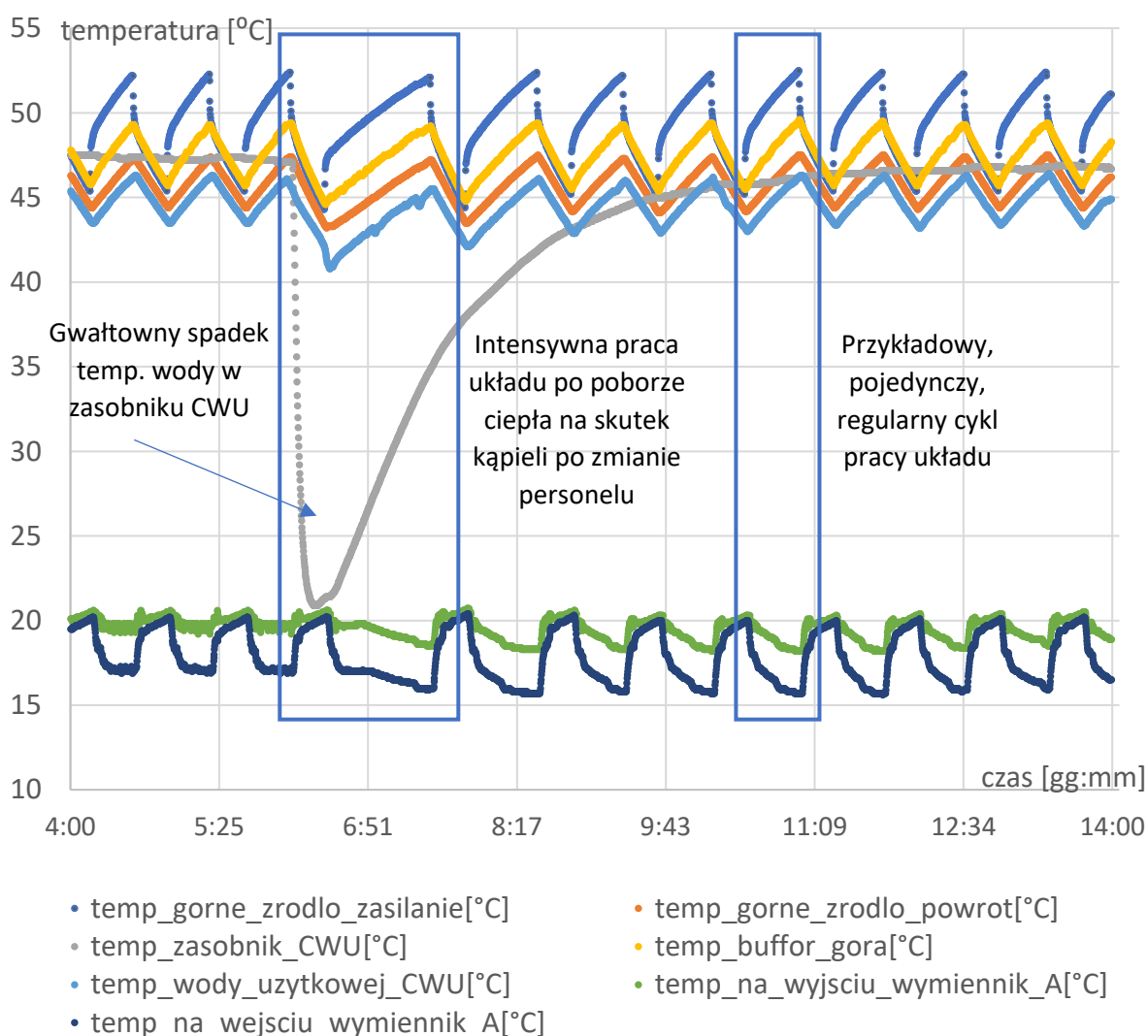
Rys. 23. Krzywe współczynników efektywności energetycznej w zależności od wartości temperatury zasilania dolnego źródła - WQA [°C] dla czterech wartości temperatur zasilania na wyjściu z pompy ciepła. Opracowano na podstawie danych producenta Stiebel Eltron.

Przy porównaniu mocy grzewczych z wartościami pobieranej mocy elektrycznej producent wyznaczył krzywe efektywności energetycznej. Podobnie dla najwyższej, dopuszczalnej wartości temperatury zasilania pompy ciepła (czyli 20 °C) porównując krzywe przy pracy pompy ciepła dla ustawionych skrajnych wartości temperatury zasilania różnica COP wynosi aż 3,2 (tzn. COP wynosi 6,7 dla temperatury zasilania 35 °C i 3,5 dla temperatury zasilania 60 °C). Wartość różnicy współczynników COP dla tych dwóch skrajnych przypadków pracy analizowanej pompy ciepła stanowi aż 47,8 % wartości maksymalnej parametru COP. Jednocześnie obrazuje to jak bardzo istotne z punktu optymalizacji efektywności energetycznej (zarówno samego układu grzewczego jak i całego budynku przez niego ogrzewanego) jest zestrojenie układu do pracy z możliwie największą temperaturą czynnika zasilania pompy ciepła oraz możliwie najniższą wartością temperatury zasilania bufora ciepła. Dla omawianej kotłowni osiągnięto regulację wartości temperatury zasilania pomp ciepła zapewniając maksymalną, dopuszczalną wartość temperatury na poziomie 20°C oraz ustalono wartość temperatury zasilania bufora głównego na poziomie wahań temperatury pracy od 46°C do 49°C co przekłada się na zmierzoną wartość temperatury zasilania pomp ciepła oscylującą w zakresie 45°C - 52°C. A to z kolei teoretycznie (to znaczy na bazie dokumentacji przedstawionej przez producenta zastosowanych pomp ciepła) pozwala na osiągnięcie

wartości współczynnika energetycznego (COP) od 4,5 do 5,4, co należy uznać za wartość bardzo wysoką biorąc pod uwagę to, że maksymalna wartość COP dla zastosowanych pomp wynosi COP wynosi 6,7.

5.7 Dane pomiarowe pracy kotłowni

W celu przybliżenia charakterystyki pracy pomp ciepła w omawianej kotłowni na wykresie na Rys. 24. przedstawiono 10-godzinny cykl pracy kotłowni zarejestrowany w styczniu 2022 roku przy dużym zapotrzebowaniu analizowanego budynku na energię ciepłą (uruchomione wszystkie odbiory ciepła na cele ogrzewania). Temperatura zewnętrzna powietrza wynosiła w analizowanym okresie ok. -4 °C.



Rys. 24. Wykres 10 godzinowego cyklu pracy kotłowni, przedstawiający zmiany wartości temperatur najważniejszych punktów pomiarowych w celu określenia efektywności energetycznej układu.

Przedstawiony przykładowy, reprezentatywny 10-godzinny okres pracy zmodernizowanej kotłowni harvestingowej ilustruje najsilniej obciążony energetycznie okres w trakcie doby, w dzień roboczy zakładu, czyli od godziny 4 do godziny 14. Zawarte na przedstawionym wykresie krzywe opisują kolejno (w poniższym opisie zastosowano identyczne kolory znaczników jak kolory krzywych na rys. 24):

- temp_górne_źródło_zasilanie – pomiar temperatury oznaczony na schemacie technologicznym kotłowni symbolem T1 mierzący wartość temperatury na wspólnym kolektorze obu pomp ciepła zasilającym bufor ciepła w kotłowni.
- temp_górne_źródło_powrót – pomiar temperatury oznaczony na schemacie technologicznym kotłowni T2 mierzący wartość temperatury na wspólnym kolektorze obu pomp ciepła powrotu zasilania buforu ciepła w kotłowni.
- temp_zasobnik_CWU – pomiar temperatury oznaczony na schemacie technologicznym kotłowni symbolem T9 mierzący wartość temperatury wody użytkowej na wyjściu z bufora wody użytkowej przed wymiennikiem ciepła, wspomagającym dogrzewanie wody użytkowej bezpośrednio z bufora głównego.
- temp_bufor_góra – pomiar temperatury oznaczony na schemacie technologicznym kotłowni symbolem T8 mierzący wartość temperatury wody w górnej części bufora ciepła w kotłowni (wartość temperatury zasilania wszystkich obiegów grzewczych w kotłowni).
- temp_wody_użytkowej_CWU – pomiar temperatury oznaczony na schemacie technologicznym kotłowni symbolem T23 mierzący wartość temperatury wody użytkowej za wymiennikiem ciepła wspomagającym dogrzewanie wody użytkowej i zaworze trójdrogowym, regulującym górną graniczną wartość temperatury zasilania CWU.
- temp_na_wyjściu_wymiennik_A – pomiar temperatury czynnika „po stronie niskiej” pompy ciepła oznaczony na schemacie technologicznym kotłowni symbolem T19 (antresola) mierzący wartość temperatury czynnika za zaworem mieszającym – zasilającym bezpośrednio pompę ciepła.
- temp_na_wejściu_wymiennik_A – pomiar temperatury czynnika „po stronie niskiej” pompy ciepła oznaczony na schemacie technologicznym symbolem T10 (antresola)

mierzący wartość temperatury czynnika na powrocie do wymiennika ciepła na antresoli.

Na podstawie wybranych danych zaprezentowanych na Rys. 24. poniżej przedstawiono analizę pracy kotłowni. Dane te w dalszej części dysertacji wykorzystano również do oszacowania rzeczywistej efektywności energetycznej układu grzewczego oraz efektywności energetycznej pracy pompy ciepła.

Wyjście układu zasilania z pompy ciepła jest podłączone do wężownicy wewnętrznej w zbiorniku – buforze ciepła o pojemności 1500 l, z którego energia cieplna zgromadzona w postaci dużej objętości wody ogrzanej do 48 °C jest dystrybuowana na wszelkie odbiory związane z ogrzewaniem budynków, a także do przygotowania ciepłej wody użytkowej. Ze względu na taką budowę instalacji hydraulicznej, zasilanie wężownicy bufora realizowane jest czynnikiem grzewczym o wyższej temperaturze niż temperatura czynnika utrzymywana w buforze. Z tego względu temperatura zasilania bufora ciepła oscyluje w każdym cyklu pracy pompy ciepła od wartości 45 °C do wartości 52°C. Każde załączenie pompy ciepła prezentowane jest jako „ząb” piłokształtnego przebiegu na wykresie. W trakcie prezentowanego 10 – godzinowego okresu pompa ciepła załączyła się 12 razy, średnia długość cyklu jej pracy wynosiła 30 min – wyjątkiem są dwa cykle pracy występujące bezpośrednio po godzinie 06:00 rano, trwające odpowiednio 60 minut (pierwszy cykl) i – 45 minut (drugi cykl). Wzmoczone zapotrzebowanie na energię cieplną obiektu po godzinie 06:00 spowodowane jest zakończeniem zmiany i kąpielą pracowników z działu produkcji. Podobne wzmoczone zapotrzebowanie na energię cieplną występuje po godzinie 14:00 (oraz – nie pokazanej już na rys. 24 – godzinie 22:00). W tym miejscu widoczny jest dynamiczny spadek wartości temperatury w zasobniku CWU (krzywa oznaczona kolorem szarym na rysunku Rys. 24.) spowodowany dużym poborem ciepłej wody. Rozwiązaniem tego problemu mogło być oczywiście zastosowanie bufora CWU o znacznie większej pojemności. Alternatywnym, zaproponowanym oraz wdrożonym podczas realizacji omawianego projektu modernizacji kotłowni rozwiązaniem było jednak zastosowanie w układzie zasilania CWU wymiennika ciepła o mocy 200kW zasilanego bezpośrednio z głównego bufora ciepła. Dzięki takiemu rozwiązaniu temperatura ciepłej wody użytkowej dostarczanej na cele sanitarne w najbardziej obciążonym energetycznie punkcie pracy kotłowni spada maksymalnie do wartości 42°C. Dodatkowo algorytm systemu automatyki i sterowania pracą kotłowni, realizowany przez BMS

CHRONOMATIK™, został zaprogramowany tak aby zabezpieczyć personel fabryki przed przekroczeniem dolnego limitu temperatury ciepłej wody użytkowej. W tym celu podczas jeszcze większego poboru CWU i spadku jej temperatury poniżej 42 °C załączana jest druga pompa ciepła (w trybie normalnej pracy pompy ciepła pracują naprzemiennie z okresem przełączania co tydzień – służy to zmniejszeniu zużycia ich elementów oraz wydłużeniu ich bezawaryjnej pracy). Natomiast w krytycznych sytuacjach awaryjnych po zanotowaniu spadku temperatury CWU poniżej 40 °C załączany jest pozostawiony kocioł gazowy dogrzewający instalację CWU. Jak widać, każda zmiana personelu pracującego na produkcji jest znacznym obciążeniem energetycznym dla omawianego układu harvestingu energii i skutkuje dłuższą pracą pomp ciepła w następnym cyklu.

Do analizy pracy kotłowni wybrano przebieg (pokazany na wykresie na Rys. 24.) w okresie znacznego zabrudzenia filtra wymiennika ciepła powietrze/woda (znajdującego się na antresoli hali produkcyjnej). W efekcie można zauważyć różnicę w wartościach temperatury zasilania pompy ciepła po stronie niskotemperaturowego źródła ciepła, czyli energii cieplnej dostarczanej do jednostki. Podczas trzech pierwszych, zaprezentowanych cykli pracy wartość temperatury zasilania pompy ciepła osiąga maksymalną dopuszczalną wartość parametru na poziomie 20 °C i jest stabilnie utrzymywana na tym poziomie dzięki pracy siłownika zaworu mieszacza. Następnie, pompa ciepła odbiera znaczną ilość energii cieplnej, w efekcie ochładzając czynnik do wartości 17 °C (jest to wartość temperatury czynnika mierzona na powrocie do wymiennika ciepła). Po znacznym wysyceniu energetycznym układu, pomimo całkowitego zamknięcia zaworu mieszacza układ nie jest w stanie osiągnąć maksymalnej dopuszczalnej wartości temperatury niskiego źródła pompy ciepła. Przy 2 – 3 stopniowym ochłodzeniu czynnika zasilającego pompę ciepła dla zadanego parametru pracy na podstawie danych producenta stratę wydajności energetycznej układu można oszacować na poziomie 4 % - 5 %. Dlatego system automatyki BMS CHRONOMATIK™ każdorazowo informuje (powiadomienia SMS do zdefiniowanej grupy odbiorców) obsługę techniczną budynku o wykryciu znacznego zabrudzenia filtrów wymienników tak aby dzięki ich wymianie uzyskać maksymalnie wysoką efektywność energetyczną układu grzewczego a tym samym budynków.

Podczas prawidłowej pracy układu (czyste filtry wymienników powietrze/woda) obiegowe pompy układu generujące przepływ czynnika po stronie wysokotemperaturowej (to

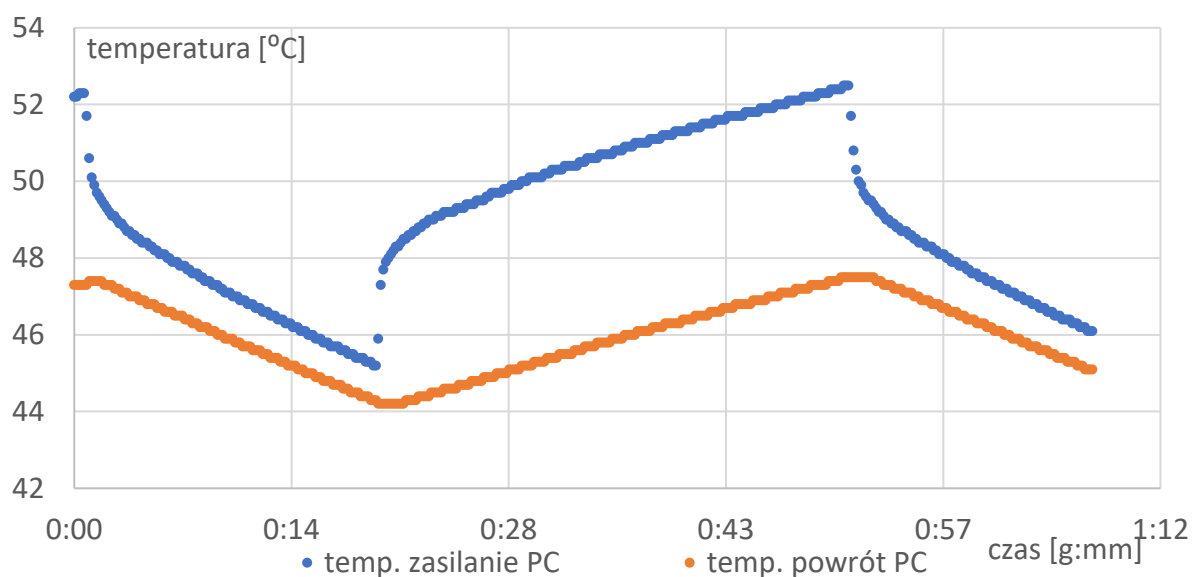
znaczy zasilania bufora ciepła w kotłowni) oraz po stronie niskotemperaturowej (zasilanie pomp ciepła energią cieplną z wymiennika powietrze/woda) pracują ze stałym wydatkiem „obustronnie” zapewniając wystarczający przepływ dla zachowania optymalnej wymiany energii cieplnej po obu stronach pomp ciepła. Zastosowane pompy (Wilo Stratos) pracują w trybie utrzymywania stałego przepływu, dzięki czemu wartości temperatur obiegów oscylują od 45 °C do 52,5 °C (jest to temperatura zasilania bufora ciepła) oraz od 44,5 °C do 47 °C (jest to temperatura powrotu z bufora ciepła).

Różnica wartości tych temperatur w zakresie 0,5 – 5,5 °C określa sprawność energetyczną węzownicy bufora ciepła, dla którego wartość temperatury w górnej części bufora oscyluje pomiędzy wartościami 45,5°C, a 49°C. W dalszej części dysertacji na podstawie tych temperatur oszacowana została wydajność energetyczna pompy ciepła.

5.8 Obliczenia efektywności energetycznej układu

W celu obliczenia wydajności energetycznej pompy ciepła pracującej w opisanym układzie na Rys. 25. przedstawiono półtora cyklu pracy pompy ciepła. Fragment przebiegu został zaimportowany z danych logowanych przez sterownik PLC w trybie stabilnej, ciągłej pracy układu w styczniowy dzień przy temperaturze zewnętrznej powietrza -4 °C. Wszystkie odbiory energii cieplnej w kotłowni były załączone, układ zasiliał także zasobnik CWU w trakcie zwykłego zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową. Na osi czasu punkt 0:00 to chwila wyłączenia się pompy ciepła (w poprzednim cyklu pracy) na skutek osiągnięcia zadanej temperatury czynnika grzewczego w górnej części bufora ciepła. Przez kolejne 19 minut do chwili 0:19 bufor ciepła na skutek oddawania energii cieplnej wystudza się do wartości temperatury 45,5 °C, przy której następuje kolejne załączenie pompy ciepła. Mierzona wartość temperatury zasilania na rurociągu w chwili załączeni pompy ciepła wynosi 45 °C, przy czym wartość temperatury wody w obiegu zasilania w pompie ciepła wynosi 48 °C. Różnica wartości temperatury wynika z miejsca montażu czujnika temperatury na rurociągu (szybciej oddającym ciepło do instalacji). W chwili załączenia pompy obiegowej układu zasilania, mierzona temperatura czynnika na zasilaniu bardzo szybko (w ciągu około 60 sekund) osiąga wartość właśnie 48 °C. W trakcie trwającego 30 minut cyklu pracy pompy ciepła temperatura zasilania bufora ciepła wzrasta z temperatury 48 °C do wartości 52,5 °C, natomiast temperatura powrotu zasilania bufora ciepła wzrasta z wartości 44,2 °C do wartości 47 °C,

utrzymując średnią wartość różnicy temperatur w trakcie trwania cyklu pracy na poziomie 5 °C.



Rys. 25. wykres przedstawiający wartość temperatury zasilania (wyjście pompy ciepła) – kolor niebieski dla 1,5 cyklu pracy pompy ciepła.

Po osiągnięciu zadanej wartości temperatury w buforze na poziomie 49,5 °C pompa ciepła wyłącza się i zaczyna się kolejny cykl oddawania zmagazynowanej energii cieplnej do instalacji grzewczych w budynku.

Podczas pracy przedstawionego harvestingowego układu grzewczego zmierzone zostały wartości prądu zasilania pomp ciepła oraz wartości napięcia w sieci. Przepływ czynnika w instalacji zasilania bufora ciepła generowany przez pompę obiegową Wilo Stratos jest stałowartościowy i utrzymywany na poziomie 14,8m³/h. W oparciu o te wartości pomiarowe poniżej wyznaczono wartość energii elektrycznej konsumowanej przez pompę ciepła, a także wartość energii cieplnej oddanej do bufora ciepła. Tym samym możliwe jest wyznaczenie rzeczywistego wskaźnika efektywności energetycznej pracy pompy ciepła w tak zaprojektowanym harvestingowym układzie grzewczym.

1. Objętość przetłoczonego czynnika grzewczego (wody) przez układ w trakcie trwania 30 minutowego cyklu pracy pompy ciepła wynosi 7,4 m³ (wyliczona na podstawie wydatku pompy wody w instalacji tzn. 14,8 m³/h).

2. Wartości energii cieplnej dostarczonej do bufora ciepła została obliczona na podstawie średniej różnicy wartości temperatury zasilania bufora i wartości temperatury powrotu zasilania bufora wynoszącego 5 °C. Przyjmując wartość ciepła właściwego dla wody $4\,200 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ oraz uwzględniając pracę układu w obiegu zamkniętym (przepływ czynnika na zasilaniu jest równy przepływowi czynnika na powrocie) wartość energii cieplnej przekazanej do bufora ciepła wynosi 43 kWh w trakcie 30 minutowego cyklu pracy, tym samym średnia wartość mocy grzewczej układu wynosi 86 kW.
3. Wartość energii elektrycznej dostarczonej do pompy ciepła podczas 30 minutowego cyklu pracy oszacowano na podstawie zmierzonej wartości prądu na każdej fazie zasilania elektrycznego omawianego układu grzewczego. Dla wartości prądu w fazie L1 = 35,56 A, L2 = 35,27 A oraz L3 = 35,61 A i dla zmierzonej wartości napięć międzyfazowych $U_1 - U_2 = 406\text{V}$, $U_1 - U_3 = 405\text{V}$, $U_2 - U_3 = 404\text{V}$, a także przyjmując wartość współczynnika mocy dla rozważanej pompy ciepła $\cos\phi = 0,8$ obliczona moc elektryczna pobierana przez pompę ciepła w trakcie stabilnej pracy wynosi 19,91 kW.
4. Wartość współczynnika efektywności energetycznej pracy pompy ciepła w opisanych warunkach można określić jako iloraz wartości energii cieplnej pozyskanej z pracy urządzenia oraz wartości energii elektrycznej dostarczonej do urządzenia. Obliczona wartość współczynnika efektywności energetycznej pompy ciepła wynosi zatem 4,32. Porównując tak wyznaczoną doświadczalnie wartość współczynnika efektywności energetycznej z wartością współczynnika przedstawioną w dokumentacji producenta dla podobnych warunków pracy pompy ciepła (COP podane przez producenta to 4,56) widać, że opisana kalibracja układu związana z wartością temperatury czynnika zasilania pomp ciepła, wartością przepływów czynnika po stronie niskotemperaturowej i wysokotemperaturowej pomp ciepła oraz niskiej wartości zadanej temperatury zasilania bufora ciepła została przeprowadzona prawidłowo, a osiągnięty wysoki wynik efektywności energetycznej COP pracy pompy ciepła potwierdza słuszność realizacji projektu w oparciu o wdrożone rozwiązanie.

Bazując na danych zapisywanych na sterowniku PLC podczas analizy pracy kotłowni porównano także wartość obciążenia energetycznego kotłowni w okresie zimowym oraz

letnim (to znaczy przy wyłączonych obiegach grzewczych). W okresie zimowym, przy średniej temperaturze powietrza zewnętrznego na poziomie -4°C całkowity czas pracy pompy ciepła w trakcie doby wynosił 13h45min. Natomiast w okresie letnim przy zapotrzebowaniu układu jedynie na energię cieplną na potrzeby przygotowania CWU dobowy średni czas pracy pompy ciepła wynosi 2h40min, co odpowiada ok. 20% zużycia energii cieplnej na przygotowanie CWU w całym bilansie energetycznym omawianego układu grzewczego w okresie zimowym i ok. 16% energii zużywanej w okresie całorocznym.

Porównując zużycie energii na cele grzewcze obiektu po modernizacji kotłowni (czyli w oparciu o harvestingową pracę pomp ciepła), w stosunku do stanu pierwotnego pracy kotłowni (gdy wykorzystywany był tylko kocioł gazowy De Dietrich C230 o podawanej przez producenta sprawności użytkowej na poziomie 97,6 %) została osiągnięta redukcja konsumpcji energii na cele grzewcze na poziomie 443%. Przedstawiona, procentowa wartość redukcji konsumpcji energii oznacza redukcję zużycia energii cieplnej, pierwotnie pochodzącej ze spalania gazu ziemnego w stosunku do konsumpcji ponad czterokrotnie mniejszej wartości energii elektrycznej konsumowanej przez układ pomp ciepła z zachowaniem zarówno wymaganej mocy grzewczej zmodernizowanej kotłowni „harvestingowej” jak i wysokiego komfortu cieplnego pracowników wyposażonego w niego zakładu.

W efekcie realizacji projektu również znacząco zwiększono efektywność energetyczną budynku. Roczna redukcja zużycia energii na potrzeby bytowe kompleksu budynku wynosi ok. 230 MWh energii. Pierwotne zużycie energii związane ze spalaniem gazu ziemnego wynosiło 295 MWh rocznie (wartość ta nie uwzględnia co prawda energii elektrycznej pobieranej przez automatykę kotła gazowego jednak ze względu na niską moc zasilania tego układu można ją zaniedbać), natomiast konsumpcja energii elektrycznej przez kotłownię po modernizacji wynosi 67 MWh (jest to porównanie zużywanej energii w postaci gazu ziemnego spalanego w kotle gazowym do wartości energii elektrycznej pobieranej przez pompy ciepła). Szacunkowa roczna oszczędność finansowa związana z pracą kotłowni przed i po modernizacji wynosi ok 45 000 zł rocznie (kwotę tą oszacowano na podstawie ceny nośników energii z dnia 01.01.2023 dla omawianego zakładu produkcyjnego) przy redukcji emisji CO_2 na skutek pracy kotłowni o wartości ok. 13 ton CO_2 rocznie (z analiz teoretycznych wynika, że średnia emisyjność CO_2 dla produkcji 1kWh energii elektrycznej w Polsce wiąże się z emisją ok. 700g CO_2 natomiast pozyskanie 1kWh energii cieplnej na skutek spalania gazu

ziemnego generuje emisję ok. 200g CO₂ [71] – co jest ciekawym wynikiem m.in. w świetle zapowiadanego przez Komisję Europejską zakazu instalacji kotłów gazowych od 2027 i 2030 r.). Należy również zwrócić uwagę na fakt, że pomimo oczywistych zysków energetycznych przy przejściu z ogrzewania gazowego na ogrzewanie pompą ciepła wraz ze wzrostem liczby instalacji grzewczych wykorzystujących pompy ciepła coraz bardziej palącym problemem będzie się stawała modernizacja nie tylko krajowej ale również europejskiej sieci energetycznej z możliwie największym udziałem pozyskiwania energii ze źródeł OZE (Odnawialne Źródła Energii), wpływających radykalnie na zmniejszenie emisyjności CO₂/1kWh energii.

Przeprowadzona i przedstawiona powyżej analiza wdrożonego rozwiązania harvestingu energii cieplnej w skali makro w zakładzie produkcyjnym potwierdza zatem pierwszą z postawionych tez dysertacji doktorskiej:

Dodatkowo realizacja zadania pozwala na spełnienie przez zakład produkcyjny zapisów dyrektyw i przepisów Unii Europejskiej przytoczonych w poprzednich rozdziałach dysertacji znacząco zwiększając efektywność energetyczną analizowanego budynku produkcyjnego.

5.9 Plany rozbudowy układu harvestingu energii

Warto nadmienić, że obecnie (tzn. w chwili pisanie tej części dysertacji doktorskiej) w omawianym obiekcie realizowane są kolejne prace projektowe związane z rozbudową zakładu produkcyjnego. Autor uczestniczy obecnie w pracach projektowych dotyczących rozbudowy systemu BMS CHRONOMATIK™, a także integracji układu odzysku ciepła odpadowego z instalacji sprężarek z wykorzystaniem wymiennika ciepła olej/woda. Układ grzewczy zasilany odpadową energią cieplną pozyskiwaną z układu chłodzenia sprężarek będzie osiągał wartość 70 °C i zostanie wprowadzony bezpośrednio jako zasilanie bufora wody w kotłowni.

5.10 Koncepcja system bezprzewodowego

Przedstawiony system automatyki kotłowni BMS CHRONOMATIK™ został zrealizowany w konwencjonalnej to znaczy przewodowej architekturze, z wykorzystaniem przewodowych,

rezystancyjnych czujników temperatury Pt1000, stykowych sygnalizatorów obecności ciśnienia w instalacji wodnej oraz innych przewodowych sygnalizatorów (np. zabrudzenia filtrów wymienników, pracy wentylatorów wymienników, obecności ciśnienia w instalacji, itp.). W odniesieniu do dalszej części rozprawy, w której przedstawione zostały sposoby skutecznego, bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych, omawiany projekt kotłowni jest idealnym środowiskiem do ich zastosowania. W całym systemie zainstalowano 32 czujniki temperatury, z których każdy posiada swobodny dostęp do źródła energii cieplnej w postaci powierzchni rury, na której został zainstalowany (są to czujniki przyłgowe). Budując system pomiarowy dostarczający systemowi nadzorcemu BMS niezbędnych danych operacyjnych w oparciu o bezprzewodowe platformy czujnikowe z łącznością radiową LoRa i wykorzystaniem bezbateryjnych układów zasilania, realizacja projektów harvestingowych podobnych do przedstawionego w tym rozdziale byłaby znacznie łatwiejsza i szybsza we wdrożeniu w aspekcie układu automatyki. W efekcie przyczyniłoby się to do redukcji kosztów pracy i materiału (kilkaset metrów przewodów, tras kablowych, koryt, itp.), w rezultacie obniżając koszty całej inwestycji nawet o kilkanaście procent.

Realizacja projektów niekonwencjonalnych i innowacyjnych, podobnych do opisanego tu projektu wykorzystującego zaawansowane technologie, w tym technologie komunikacji bezprzewodowej dalekiego zasięgu w budynkach (szczególnie budynkach wielkopowierzchniowych lub takich, w których komunikacja bezprzewodowa jest utrudniona przez metalową lub żelbetonową konstrukcję budynku), a także układów bezbaterijnego zasilania układów pomiarowych jest zatem trendem koniecznym w kontekście upowszechniania tego typu nowych instalacji oraz modernizacji mniej efektywnych energetycznie kotłowni gazowych, węglowych lub mazutowych. Wpłynie to niewątpliwie na wzrost sprawności źródeł energii cieplnych w budynkach, przyczyniając się tym samym do wzrostu efektywności energetycznej, redukcji konsumpcji paliw kopalnych, redukcji emisji CO₂, redukcji kosztów związanych z ogrzewaniem budynków i przygotowywaniem ciepłej wody użytkowej na cele bytowe.

6. Poprawa efektywności energetycznej budynku po zainstalowaniu systemu BMS CHRONOMATIK™ i układu harvestingu energii cieplnej ze sprężarek w świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E

6.1 Wstęp

W bieżącym rozdziale manuskryptu przedstawiony zostanie zrealizowany przez Autora podczas trwania doktoratu system BMS CHRONOMATIK™ zainstalowany w jednej z fabryk sprzętu AGD we Wrocławiu. Opisany w dysertacji system stanowi tak naprawdę część globalnego systemu BMS, integrującego w chwili obecnej już cztery fabryki sprzętu AGD i trzy centra logistyczne zlokalizowane w województwach dolnośląskim i łódzkim jednak ze względu na zapisy komercyjnych umów wykonawczych oraz NDA (*ang. Non Disclosure Agreement*) podpisanych z Inwestorem nie jest niestety możliwe ujawnienie informacji o całym tym systemie. Ale nawet przedstawiony w dysertacji fragment tego rozbudowanego systemu BMS CHRONOMATIK™ znacząco poprawia efektywność energetyczną budynków i stanowi precyzyjny opis narzędzi pozwalających na poprawę zdefiniowanej w pierwszym rozdziale doktoratu efektywności energetycznej budynków.

Opisywany obiekt został wybrany również ze względu na możliwość oceny poprawy efektywności energetycznej budynku po instalacji systemu BMS CHRONOMATIK™ ze względu na opomiarowanie zużycia gazu na cele grzewcze obiektu, a także dzięki udostępnionym przez Inwestora danym dotyczącym tego zużycia. Wykorzystując dane dotyczące zużycia energii na potrzeby utrzymywania wymaganej temperatury w obrębie hali produkcyjnej w zestawieniu rok do roku (tzn. przed instalacją systemu BMS CHRONOMATIK™ oraz po jego uruchomieniu) określono współczynnik efektywności energetycznej systemu automatyzacji i sterowania zgodnie z przytoczoną w drugim rozdziale manuskryptu normą PN-EN ISO 52120-1:2022-09E. Opisane zostały także mechanizmy automatyzacji pracy poszczególnych elementów systemu w kontekście przytoczonych w rozdziale drugim warunków stawianych zaawansowanym systemom automatyzacji i sterowania opisanych według wspomnianej normy jako systemy BMS klasy A.

6.2 Opis charakterystyki zakładu

Zrealizowany projekt dotyczył instalacji systemu BMS CHRONOMATIK™ w fabryce lodówek. Istniejący zakład produkcyjny o powierzchni 23 000 m² realizuje produkcję lodówek na trzech liniach produkcyjnych. Hala produkcyjna otoczona jest szeregiem pomieszczeń funkcyjnych. Wszystkie strategiczne z punktu widzenia pracy zakładu instalacje także zostały zintegrowane w systemie BMS CHRONOMATIK™. Są to m.in.: instalacja HVAC, oświetlenie, instalacja przyłącza średniego napięcia, węzeł wody lodowej, kotłownia i sprężarkownia. Ponadto zaprojektowany system BMS CHRONOMATIK™ realizuje funkcje automatyki budynkowej w części biurowej oraz socjalnej. Przedstawiony projekt został wybrany do opisu jako przykład bardzo udanego zastosowania systemu BMS CHRONOMATIK™ w dużym zakładzie produkcyjnym o złożonej strukturze, ale również jako przykład realizacji systemu BMS w obiekcie już istniejącym z istniejącymi instalacjami HVAC, które były wyposażone w lokalne sterowanie urządzeniami. Po uzgodnieniach z Inwestorem w trakcie projektowania i realizacji systemu automatyki budynkowej BMS nie przeprowadzono modernizacji istniejących lokalnych urządzeń sterujących i kontrolnych, a jedynie wyposażono obiekt w system BMS CHRONOMATIK™ realizujący algorytmy automatycznego, wspólnego sterowania wszystkimi instalacjami HVAC obecnymi już wcześniej w opisywanej fabryce.

6.3 Stan pierwotny obiektu

Hala produkcyjna obsługiwana jest przez system wentylacji mechanicznej z dziewięcioma centralami wentylacyjnymi z nagrzewnicami gazowymi z możliwością płynnej modulacji ich mocy grzewczej oraz falownikowo zasilane obrotowe wymienniki ciepła, a także w 56 wyciągowych wentylatorów dachowych oraz systemem destryfikatorów. W pierwotnym, zastanym stanie obiektu, wszystkie urządzenia wentylacyjne sterowane były z wykorzystaniem lokalnych zadajników pracy bez żadnej korelacji parametrów zadanych pomiędzy nimi. Lokalne urządzenia automatyki (czyli sterowniki poszczególnych central wentylacyjnych) realizowały algorytmy utrzymywania zadanych parametrów pracy na poziomie pojedynczych jednostek bez żadnej wzajemnej korelacji. Zmiana nastaw parametrów pracy (temperatura zdana, wydajność wentylatorów, itp.) wykonywana była przez pracownika działu technicznego obiektu w sposób manualny (z poziomu wyniesionego

zadajnika połączonego ze sterownikiem centrali wentylacyjnej) podczas obchodu technicznego, nierzadko zaledwie raz lub 2 razy dziennie.

Poza nagrzewnicami gazowymi zabudowanymi w centralach wentylacyjnych hala produkcyjna wyposażona jest w 22 gazowe, kondensacyjne agregaty grzewcze ApenGroup o mocy grzewczej 40,5 kW każdy. Jednostki te są zainstalowane na wysokości siedmiu metrów nad poziomem podłogi. W stanie pierwotnym wszystkie agregaty grzewcze załączane były ręcznie z 22 paneli zainstalowanych na hali. Jednostki grzewcze realizowały co prawda automatyczne utrzymywanie temperatury na hali na wartości zadanej (przy czym pomiar wartości temperatury powietrza realizowany był przez lokalne czujniki zainstalowane w panelach) jednak wszelkie zmiany temperatury zadanej jak i wyłączenie oraz włączenie jednostek było realizowane manualnie przez pracownika działu technicznego obiektu analogicznie do opisanego wcześniej sposobu sterowania centralami wentylacyjnymi.

Układ wentylacji hali produkcyjnej wyposażony jest także w dachowe wentylatory wyciągowe w ilości 56 szt. o wydajności 11000m³/godz. każdy. Wentylatory były załączane ręcznie przez pracownika administracji budynków. Podstawową funkcją tego zestawu wentylatorów jest usuwanie „poduszki” ciepłego powietrza nagromadzonego w przestrzeni pod dachem w okresach letnich.

Dodatkowo hala produkcyjna wyposażona jest 74 szt. trzybiegowych destryfikatorów producenta Soninger o wydajności 4800m³/godz. każdy. Destryfikatory połączone w grupy urządzeń załączane były przez pracownika działu administracji budynków. Praca jednostek po załączeniu przez pracownika sterowana była z wykorzystaniem lokalnych sterowników termostatycznych zainstalowanych pod dachem fabryki. Po przekroczeniu temperatury zadanej, w zależności od wartości temperatury zmierzonej pod dachem, sterownik termostatyczny przełączał biegi pracy urządzeń. Głównym zadaniem destryfikatorów jest z kolei dystrybucja ciepłego powietrza zgromadzonego pod dachem hali produkcyjnej w okresach grzewczych.

Dach hali produkcyjnej posiada łącznie 96 szt. dachowych klap przewietrzających z siłownikami elektrycznymi, pierwotnie sterowanych z poziomu przycisków zainstalowanych w dwóch rozdzielnicach zasilających siłowniki świetlików. Układ klap przewietrzających podzielony został na pięć stref, dzięki czemu użytkownik może sterować każdą sekcją dachowych klap przewietrzających osobno. Sterowanie odbywało się jednak ręcznie przez pracownika działu administracji budynku. Układ świetlików dachowych wyposażony jest

dodatkowo w stację pogodową, monitorującą zewnętrzne warunki atmosferyczne na podstawie których system zamykał świetliki dachowe przy niekorzystnych warunkach (np. silny wiatr, deszcz).

Hala produkcyjna ogrzewana jest także odpadowym ciepłem z instalacji sprężarek. Układ odprowadzania ciepła odpadowego z instalacji pięciu sprężarek Atlas Copco o łącznej mocy elektrycznej 715 kW wyposażony w układ kanałów wentylacyjnych z przepustnicami sterowanymi elektrycznie umożliwia wykorzystanie ciepła odpadowego pochodzącego z chłodzenia jednostek do ogrzewania hali produkcyjnej i samego pomieszczenia sprężarek. Pierwotnie układ ten sterowany był z wykorzystaniem prostego systemu automatyki, umożliwiającego przełączanie układu przepustnic, zapewniając przepływ ciepłego powietrza odpadowego albo do sprężarkowni, albo na hale produkcyjna bądź na usuwanie ciepłego powietrza na zewnątrz budynku.

Dodatkowo wewnętrzne połączenie hali produkcyjnej z budynkiem magazynu zapewnia szczelność systemu wentylacji hali produkcyjnej, co eliminuje konieczność częstego otwierania zewnętrznych bram przemysłowych. Część zewnętrznych bram przemysłowych wyposażono także w kurtyny powietrzne, sterowane lokalnie z wykorzystaniem termostatycznych sterowników pracy kurtyn powietrznych.

Podsumowując, hala produkcyjna wyposażona w zastany rozbudowany system urządzeń HVAC była ogrzewana i wentylowana przez szereg urządzeń sterowanych lokalnie przez sterowniki, proste układy automatyki pracujące lokalnie z pojedynczymi urządzeniami, realizujące lokalne utrzymywanie zadanych parametrów środowiskowych. System HVAC nie posiadał natomiast żadnych mechanizmów pozwalających na nadrzędne sterowanie pracą wszystkich składowych urządzeń systemu HVAC. W świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E przedstawiony zastany układ automatyzacji i sterowania można zaliczyć do klasy D, czyli obiektu posiadającego lokalne urządzenia automatyki:

- lokalne sterowniki central wentylacyjnych – utrzymywanie zadanych parametrów pracy (wydatek pracy centrali wentylacyjnej, temperatura nawiewu) poszczególnych jednostek,
- lokalne sterowniki agregatów grzewczych – utrzymywanie zadanej temperatury powietrza w stosunku do temperatury mierzonej przez lokalny zadajnik pracy każdego urządzenia grzewczego,

- lokalne sterowniki systemu destyryfikatorów, umożliwiające złącznie jednostek po przekroczeniu zadanej wartości temperatury mierzonej przez dane urządzenie pod dachem hali produkcyjnej,
- lokalne rozdzielnice sterowania systemem dachowych klap przewietrzających z automatycznym układem zabezpieczającym system przewietrzania podczas niekorzystnych zewnętrznych warunków atmosferycznych,
- lokalne sterowanie systemem odzysku odpadowego ciepła z instalacji sprężarek.

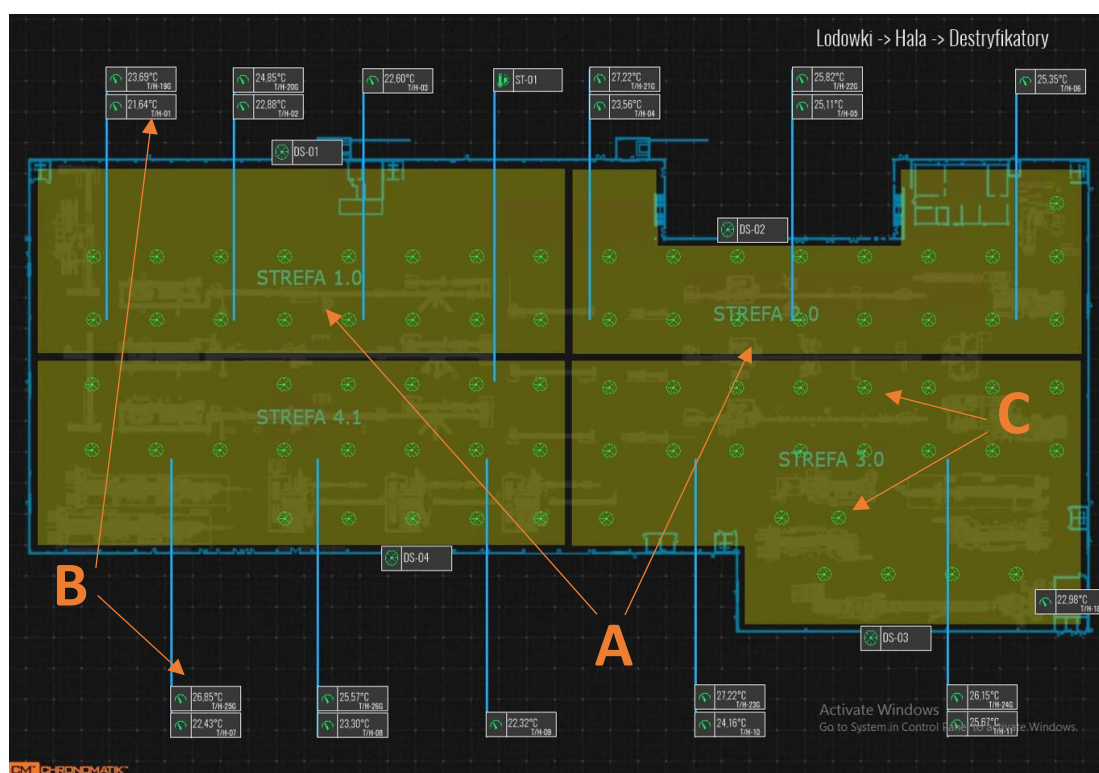
6.4 Realizacja systemu BMS CHRONOMATIK™.

Realizacja systemu BMS CHRONOMATIK™ obejmowała nie tylko pełną integrację wszystkich wymienionych w poprzednim podrozdziale urządzeń systemu HVAC, zainstalowanych w obszarze hali produkcyjnej ale również dodatkowo integrację systemu oświetlenia hali z wykorzystaniem protokołu komunikacyjnego DALI (*ang. Digital Addressable Lighting Interface*), a także instalacji technicznych bezpośrednio wspierających produkcję (w tym automatyka kotłowni gazowej, integracja węzła wody lodowej oraz integracja węzła wody obiegowej).

System BMS CHRONOMATIK™ dla obszaru hali produkcyjnej lodówek wykonano w oparciu o pięć głównych rozdzielnic automatyki, wyposażonych w sterowniki PLC WAGO serii 750-881, a także zestaw paneli HMI Waintek serii iP, umożliwiających lokalne monitorowanie i sterowanie pracą integrowanych urządzeń. Zaplanowane rozmieszczenie czterech głównych rozdzielnic automatyki na hali produkcyjnej bezpośrednio koresponduje z podziałem hali produkcyjnej na cztery strefy. Wszystkie urządzenia sieciowe (sterowniki PLC, panele HMI, sterowniki central wentylacyjnych, sterowniki gazowych agregatów grzewczo wentylacyjnych, sterownik układu sprężarek) zostały zintegrowane z wykorzystaniem zakładowej sieci Ethernet w wydzieloną na potrzeby działania systemu BMS podsiecią VLAN (*ang. Virtual Local Area Network*), dzięki czemu możliwa jest całkowicie swobodna wymiana danych pomiędzy wszystkimi sterownikami urządzeń HVAC, bez konieczności budowania odrębnej sieci LAN (*ang. Local Area Network*) na potrzeby tylko systemu BMS.

Podstawowym zakresem realizacji poprawnie działającego systemu BMS było zrealizowanie systemu monitorowania warunków środowiskowych (temperatura, wilgotność

powietrza) na hali produkcyjnej o dużej kubaturze. W tym celu wykorzystano dwadzieścia czujników temperatury i wilgotności komunikujących się z systemem BMS CHRONOMATIK™ z użyciem protokołu Modbus RTU (komunikacja szeregową RS 485), które monitorują wartość temperatury powietrza w obszarze przebywania ludzi (ok. 1,5m wysokości) oraz pod dachem hali. Precyzyjny pomiar temperatury we wszystkich strefach na dwóch poziomach jest niezbędny przy realizacji algorytmów globalnego sterowania urządzeniami HVAC na hali produkcyjnej o tak dużej kubaturze.



Rys. 26. Widok ekranu systemu BMS CHRONOMATIK™ zainstalowanego w omawianym zakładzie produkcyjnym, przedstawiający: A) podział hali na 4 strefy, B) flagi zainstalowanych czujników temperatury i wilgotności, C) ikony odzwierciedlające rozmieszczenie i statusy pracy poszczególnych destryfikatorów.

Wyjściowym założeniem przy realizacji tego systemu BMS CHRONOMATIK™ (to znaczy integracji automatyki i sterowania HVAC na hali produkcyjnej) jest zcentralizowanie systemu sterowania, w efekcie umożliwienie pracy wszystkich urządzeń HVAC do wspólnego punktu pracy (temperatura, wilgotność, wskaźnik jakości powietrza np. pomiar CO₂, LZO (Lotnych związków organicznych), itp.). Dzięki temu możliwe jest wyeliminowanie wcześniej możliwych (i niestety często zdarzających się) scenariuszy pracy urządzeń HVAC, w których składowe

urządzenia systemu HVAC pracują przeciw sobie (np. praca urządzeń grzewczych przy jednoczesnej pracy wentylatorów wyciągowych i/lub otwartych klapach dachowych).

Scentralizowany algorytm sterowania pozwala także na wspólne wypracowanie wydajności systemu wentylacji hali produkcyjnej. Poza udziałem central wentylacyjnych w całkowitym bilansie wymiany powietrza na hali produkcyjnej biorą udział wyciągowe wentylatory dachowe oraz klapy dachowe. Monitorując sumaryczny udział tych składowych systemu HVAC w ogólnym bilansie wymiany powietrza system BMS CHRONOMATIK™ może ograniczać udział central wentylacyjnych w procesie wentylacji hali produkcyjnej (dzięki temu, że silniki wentylatorów central wentylacyjnych są zasilane z wykorzystaniem przemienników częstotliwości, umożliwiając płynną regulację ich wydatku).

Kolejnym istotnym wymaganiem dla efektywnego energetycznie układu sterowania instalacjami HVAC w omawianym budynku przemysłowym jest priorytetyzowanie wykorzystywanych źródeł energii na potrzeby zapewnienia wymaganych parametrów warunków środowiskowych. W odniesieniu do omawianego budynku przemysłowego centralny algorytm sterowania urządzeniami HVAC w budynku realizuje algorytm sterowania oparty o największy udział wykorzystania odpadowej energii cieplnej w okresach grzewczych oraz z największym udziałem nocnego, chłodnego powietrza w okresach letnich (w celu nocnego schładzania hali). Udział mechanizmu harvestingu energii cieplnej z systemu sprężarek zostanie przedstawiony w odrębnym podrozdziale pracy.

Ze względu na to, że system HVAC hali produkcyjnej nie posiada źródeł chłodu hala produkcyjna jest wentylowana i ogrzewana. Głównym źródłem zużycia energii na potrzeby utrzymywania wymaganych warunków środowiskowych jest zatem konsumpcja gazu przez wszystkie urządzenia grzewcze zainstalowane na hali produkcyjnej w okresie grzewczym. Zaproponowany energooszczędny priorytetowy schemat ogrzewania hali produkcyjnej w sezonie grzewczym można przedstawić w punktach (według spadku priorytetu):

1. Największy udział odpadowej energii cieplnej pochodzącej z instalacji chłodzenia sprężarek na potrzeby ogrzewania hali produkcyjnej.
2. Udział odzysku energii cieplnej z wykorzystaniem obrotowych wymienników ciepła w centralach wentylacyjnych obsługujących obszar produkcyjny fabryki lodówek.
3. Praca destryfikatorów w okresach grzewczych z uwzględnieniem różnicy temperatury powietrza pod dachem hali oraz na wysokości przebywania osób. Wykorzystanie

energii ciepłej zgromadzonej w ciepłym powietrzu pod dachem dla zapewniania wymaganych warunków temperaturowych w obszarze przebywania pracowników.

4. W okolicznościach, w których wymienione w punktach 1, 2 i 3 działania nie zapewniają wymaganych warunków temperaturowych na hali załączana jest praca gazowych urządzeń grzewczych (gazowe nagrzewnice central wentylacyjnych, gazowe agregaty grzewcze). Gazowe urządzenia grzewcze wyposażone są w palniki z modulowaną mocą, algorytm automatyki zapewnia pracę urządzeń grzewczych w punkcie ich najwyższej sprawności energetycznej (a punkt optymalnej pracy dobierany jest na podstawie dokumentacji producentów tych urządzeń).

5. Zastosowanie harmonogramów pracy urządzeń HVAC z możliwością nastawy głównych parametrów pracy (zadana temperatura powietrza na hali produkcyjnej, zadana wydajność systemu wentylacji) umożliwi redukcję zużycia energii w okresach ograniczonej lub wyłączonej produkcji (harmonogram pracy fabryki, weekendy, przerwy świąteczne, itp.).

Podczas pracy scentralizowanego algorytmu systemu BMS CHRONOMATIK™ blokowana jest praca wentylatorów wyciągowych, praca systemu przewietrzania z wykorzystaniem dachowych klap przewietrzających, a także nieautoryzowane oraz zbyt długie otwarcie przemysłowych bram zewnętrznych (sygnały ze sterowników bram oraz kontaktronów otwarcia bram są także monitorowane przez system BMS CHRONOMATIK™)

Zrealizowana w opisany powyżej sposób automatyzacja sterowania urządzeniami systemu HVAC obsługującymi obszar produkcyjny fabryki lodówek ściśle koresponduje z mechanizmami poprawy efektywności energetycznej budynków z systemem BMS przedstawionymi w normie PN-EN ISO 52120-1:2022-09E. W dalszej części manuskryptu zaprezentowane i omówione zostanie wyznaczenie wartości współczynnika poprawy energetycznej przedstawionego obiektu na podstawie danych dotyczących zużycia gazu na cele grzewcze hali produkcyjnej uzyskanych od Administracji obiektu.

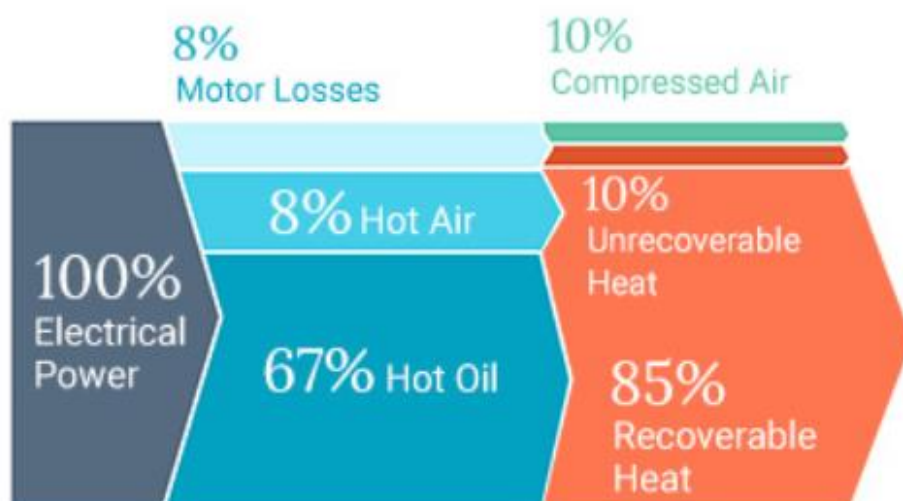
6.5 Harvesting energii – odzysk ciepła odpadowego na cele grzewcze obiektu

W ramach przedstawianego projektu systemu BMS CHRONOMATIK™ zmodernizowano także zastany, częściowo automatyczny układ odzysku ciepła odpadowego z systemu sprężarek. Układ pięciu sprężarek o łącznej mocy elektrycznej 715 kW wyposażony jest

w zestaw kanałów wentylacyjnych rozprowadzających ciepłe powietrze z układu chłodzenia sprężarek, w zależności od zapotrzebowania - na potrzeby ogrzewania hali produkcyjnej, pomieszczenia sprężarek oraz w warunkach braku zapotrzebowania na ciepło wcześniej wymienionych obszarów wyrzut ciepłego powietrza na zewnątrz.

Systemy przygotowujące sprężone powietrze w zakładach produkcyjnych są odpowiedzialne za konsumpcję ok. 20 % globalnej wartości energii elektrycznej zużywanej przez obiekty przemysłowe [72] i stanowią jedno z najistotniejszych źródeł opadowej energii cieplnej w budynkach, z dużym potencjałem wykorzystania ciepła odpadowego na cele grzewcze obiektów, bądź z wykorzystaniem wymienników ciepła olej-woda do zasilania węzłów ciepła. Według danych firmy Atlas Copco [73] sprawność energetyczna sprężarek przemysłowych wynosi zaledwie kilka – kilkanaście procent, a nawet 94 % energii elektrycznej często jest tracone i rozpraszane do otoczenia w postaci ciepła. W rezultacie sprawność energetyczna układu sprężarkowego bez systemów umożliwiających odzysk energii cieplnej wynosi zaledwie kilka procent. Automatyczny system odprowadzania ciepła z instalacji sprężarek stanowi zatem istotny element instalacji grzewczej, a także zapewnia wymagane warunki środowiskowe pracy sprężarek w pomieszczeniach sprężarkowni. Utrzymywanie niskiej wartości temperatury powietrza w pomieszczeniu sprężarkowni poprzez właściwe, nadążne sterowanie siłownikami klap przepustnic kanałowych i czerpni ściennych (zapewniających swobodny przepływ powietrza przez układ chłodzenia sprężarek) wpływa także pozytywnie na poprawę efektywności energetycznej sprężarek [74][75].

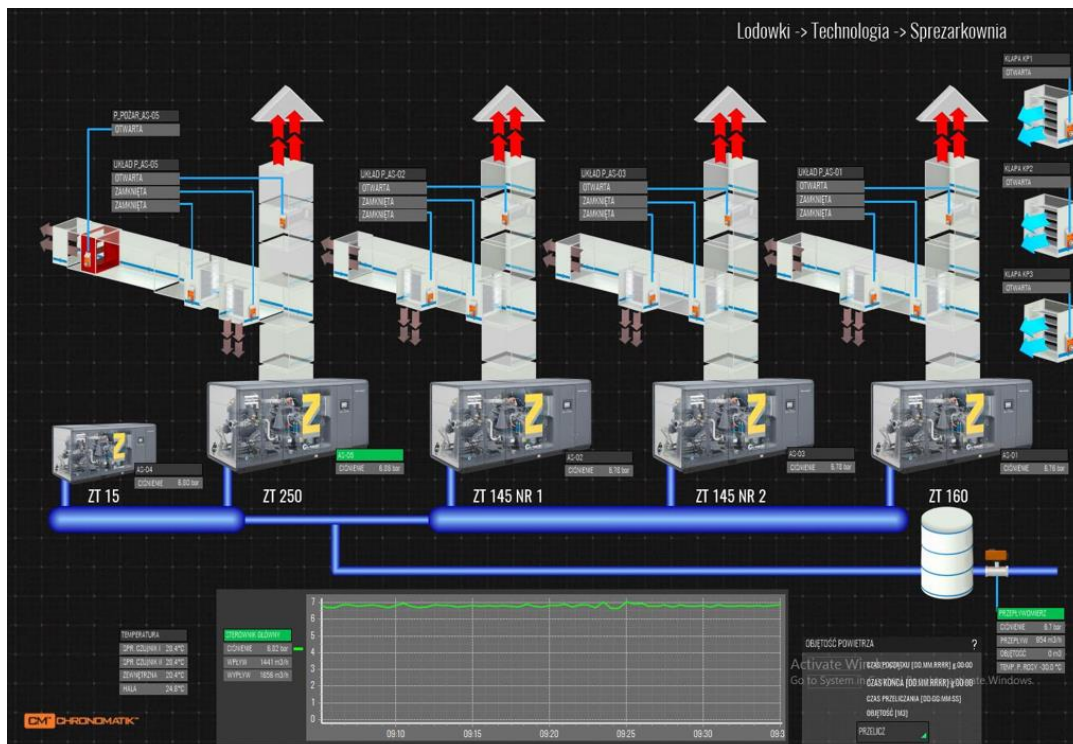
A zatem podczas pracy sprężarek większość energii elektrycznej przetwarzana jest na energię cieplną możliwą do odzyskania. W zależności od konstrukcji sprężarki odzyskane może być nawet około 85% całkowitej opadowej energii cieplnej. Pozostała część energii cieplnej tj. ok 15% jest energią rozpraszaną do otoczenia niemożliwą do odzyskania. Zilustrowano to schematycznie na Rys. 27 na podstawie danych udostępnianych przez firmę Atlas Copco dla przykładowych olejowych sprężarek śrubowych, powszechnie wykorzystywanych w dużych, przemysłowych układach przygotowania sprężonego powietrza.



Rys. 27. Ogólna struktura rozplywu energii dla olejowych sprężarek śrubowych. [76]

Ważnym zadaniem realizowanym przez omawiany tu system automatyki budynkowej BMS CHRONOMATIK™ w kontekście poprawy efektywności energetycznej budynku jest zatem również efektywne zarządzanie pracą układu odzysku ciepła odpadowego ze sprężarek.

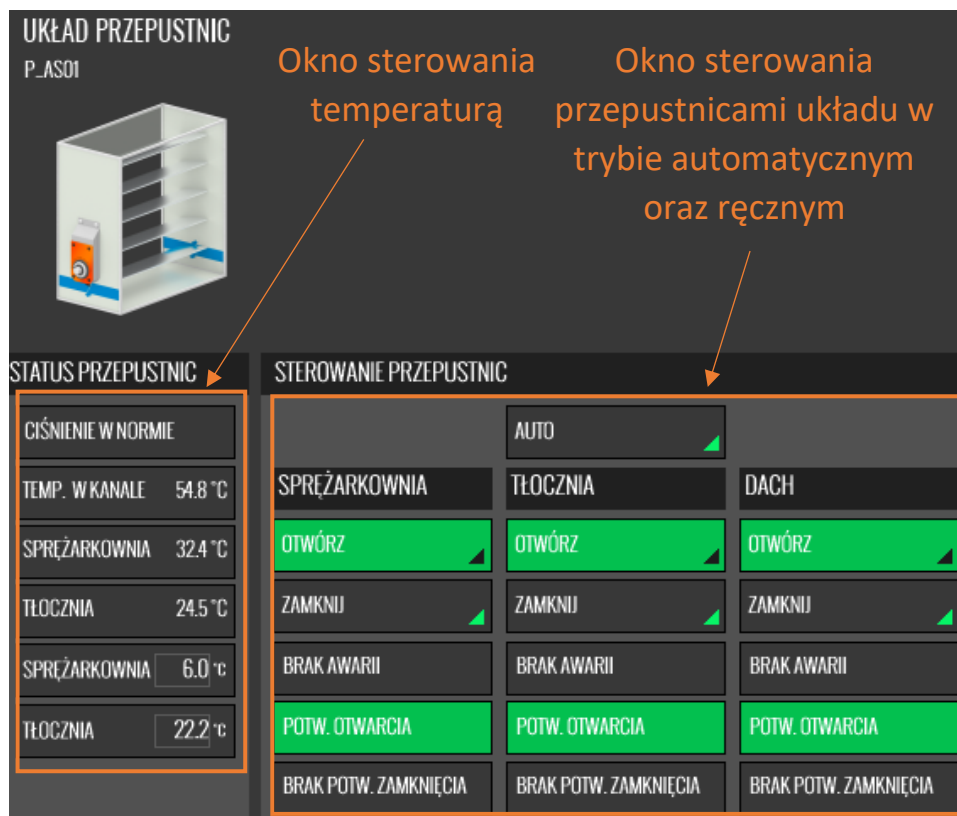
System BMS CHRONOMATIK™ integruje automatykę pięciu sprężarek, osuszacza sprężonego powietrza i przepływomierza, a także zastany, nadrzędny sterownik Atlas Copco ES16 zawiadując pracą całego układu sprężarkowego. Wykorzystując protokół komunikacyjny Modbus RTU dane ze wszystkich sprężarek, a także informacje z nadrzędnego sterownika Atlas Copco ES16 są odczytywane przez sterownik PLC i przesyłane do systemu BMS CHRONOMATIK™. Integracja systemu sprężarek ma charakter zarówno monitoringu wszystkich strategicznych parametrów jego pracy, a także sterowania wartością ciśnienia roboczego w instalacji sprężonego powietrza. Na poziomie sterownika PLC dane te są odpowiednio interpretowane oraz konwertowane na warstwę transportową UDP używając protokołu NV (*ang. Network Variables*). Informacje te w postaci struktur danych przekazywane są następnie do serwera systemu BMS CHRONOMATIK™, a następnie przetwarzane, archiwizowane i wizualizowane w postaci czytelnych ekranów przedstawiających w sposób intuicyjny wszystkie istotne dla użytkownika parametry pracy całego systemu.



Rys. 28. Widok ekranu systemu BMS CHRONOMATIK™, wizualizacja instalacji sprężarek wraz z instalacją odprowadzania ciepła odpadowego.

W oparciu o pomiar temperatury powietrza w sprężarkowni, a także w strefie czwartej hali produkcyjnej (strefie sąsiadującej z pomieszczeniem sprężarkowni) oraz wartości temperatury powietrza z układu odprowadzającego ciepło odpadowe ze sprężarek system BMS CHRONOMATIK™ automatycznie zarządza układem przepustnic na kanałach wentylacyjnych dążąc do zapewnienia zadanych warunków środowiskowych w pomieszczeniu sprężarek oraz na hali produkcyjnej. Priorytetem w okresie zimowym jest utrzymywanie niskiej wartości temperatury w pomieszczeniu sprężarkowni (wartość zadana w zakresie 6 – 7 °C – jest to wartość temperatury wskazana przez producenta sprężarek, przy której pracują one z największą efektywnością) oraz zadanej temperatury w obszarach produkcyjnych. Latem większość ciepła odpadowego ze sprężarkowni jest niestety nadal wyrzucana na zewnątrz budynku kanałem realizującym wyrzut na dach.

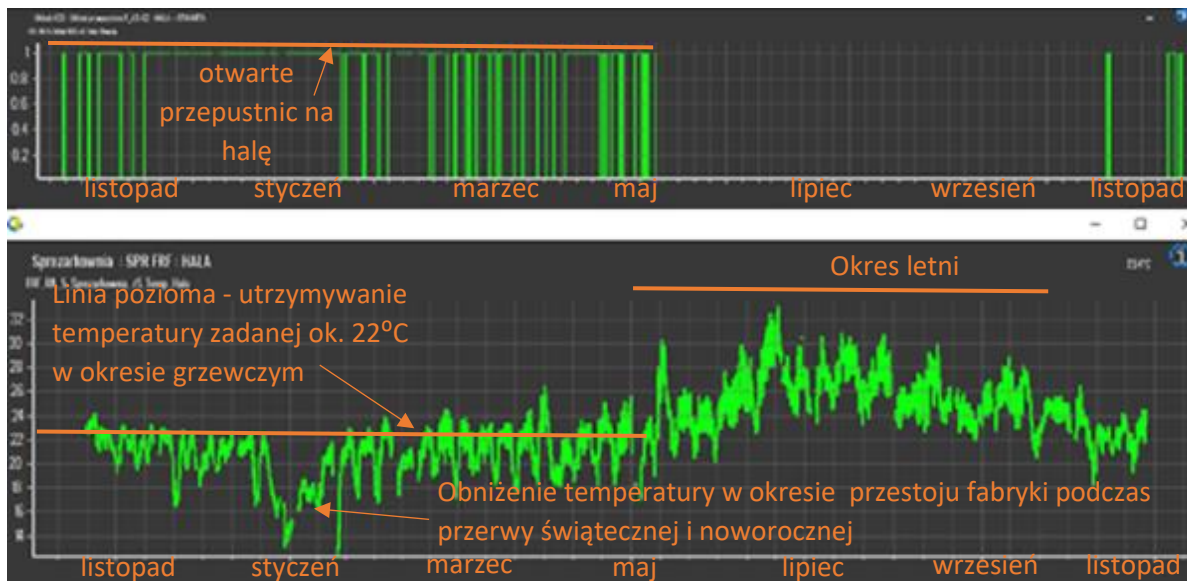
System BMS umożliwia użytkownikowi zarządzanie pracą odzysku ciepła z poziomu wizualizacji. Poniżej na Rys. 29 przedstawiono przykładową stacyjkę systemu BMS CHRONOMATIK™ dla pojedynczego układu przepustnic w opisywanej sprężarkowni.



Rys. 29. Widok ekranu systemu BMS CHRONOMATIK™, okno zarządzania pracą systemu przepustnic zainstalowanych na kanałach wentylacyjnych.

Należy zauważyć, że opisywana instalacja sprężarek jest w znacznym stopniu przewymiarowana na potrzeby przyszłej rozbudowy omawianej fabryki. W efekcie z analizy danych historycznych wynika, że najczęściej, w zależności od obciążenia instalacji sprężonego powietrza, pracuje jedna duża sprężarka stałobrotowa o mocy 90 kW – 160kW oraz jedna sprężarka zmienneobrotowa o mniejszej mocy, która odpowiada za precyzyjną regulację wartości ciśnienia w instalacji do wartości zadanej.

Wykorzystując dane historyczne zgromadzone przez system BMS CHRONOMATIK™ w sezonie grzewczym 2019/2020 przeprowadzono poniżej analizę wpływu automatyzacji systemu odzysku ciepła odpadowego na redukcję czasu pracy urządzeń grzewczych na hali produkcyjnej w strefie ogrzewanej z wykorzystaniem instalacji odzysku ciepła odpadowego z instalacji sprężarek.



Rys. 30. Roczny przebieg otwarcia przepustnic kanałów wentylacyjnych na halę oraz wartości temperatury panującej w części hali produkcyjnej - zlokalizowanej najbliżej wylotu powietrza z układu chłodzenia sprężarek.

Na Rys. 30. przedstawiono zestawienie przebiegów wartości temperatury powietrza na hali produkcyjnej w strefie ogrzewanej z udziałem harvestingu energii cieplnej ze sprężarek oraz przebieg przedstawiający czas otwarcia przepustnicy obsługującej udział powietrza z instalacji chłodzenia sprężarek na cele grzewcze hali produkcyjnej. W okresie zimowym celowym zabiegiem jest przegrzewanie hali produkcyjnej z udziałem ciepła odpadowego – zadana zostaje temperatura 22 °C w celu kumulacji energii cieplnej na hali produkcyjnej. Dzięki temu prostemu i nie generującemu dodatkowego zużycia energii pierwotnej zabiegowi praca central wentylacyjnych z obrotowymi wymiennikami ciepła pozwala na równomierną dystrybucję tak odzyskanej energii cieplnej w obrębie całej hali produkcyjnej.

Na Rys. 30. linią poziomą zaznaczono okres w trakcie sezonu grzewczego utrzymywania przez układ harvestingu energii cieplej zadanego poziomu temperatury 22°C na hali produkcyjnej. Na wykresie tym można również zaobserwować cykliczne, cotygodniowe obniżenie temperatury mierzonej na hali produkcyjnej wynikające z weekendowych przestojów pracy zakładu. Z analizy czasu otwarcia przepustnic w celu ogrzewania hali produkcyjnej wynika, że nałożone warunki temperaturowe były spełnione i wykorzystanie odpadowego ciepła z instalacji sprężarek w trakcie sezonu grzewczego było realizowane przez 89 % czasu okresu grzewczego od listopada 2019 do maja 2020 (sezon grzewczy 2019/2020 był wyjątkowo długi ze względu na wyjątkowo zimny okres wiosenny). Analiza czasu pracy sprężarek wskazuje, że urządzenia te pracowały 47% czasu w trakcie badanego sezonu

grzewczego z zaangażowaniem jednostek ze średnią mocą ok. 140 kW. Na podstawie tych danych, przy założeniu sprawności układu odzysku ciepła ze sprężarek na poziomie 90% oraz wspomnianej wcześniej zakładanej 85% straty energii elektrycznej w sprężarkach [73] oszacowano średnią, chwilową moc cieplną całego układu na poziomie 108 kW. Uwzględniając 47% czas pracy sprężarek w trakcie trwającego 180 dni (od listopada 2019 do maja 2020) sezonu grzewczego, daje to całkowitą energię cieplną dostarczoną na halę produkcyjną o wartości 220 MWh. Na podstawie przedstawionych tu obliczeń w dalszej części rozdziału oszacowano jaki jest udział odzyskanej wartości energii cieplnej w procesie ogrzewania hali produkcyjnej wynikający z samej analizy pracy urządzeń grzewczych.

Poza urządzeniami grzewczymi zainstalowanymi w centralach wentylacyjnych (kanałowe nagrzewnice gazowe) za zapewnienie wymaganych warunków temperaturowych wewnątrz hali produkcyjnej odpowiedzialne są opisywane wcześniej gazowe aparaty grzewcze ApenGroup. Udział central wentylacyjnych w procesie ogrzewania hali traktowany jest globalnie z założeniem, że jego praca wpływa równomiernie na utrzymywanie zadanych warunków środowiskowych na całej hali produkcyjnej. W celu analizy wpływu układu harvestera energii cieplnej (w postaci instalacji odzysku ciepła ze sprężarek) na redukcję pracy urządzeń grzewczych przeprowadzono analizę pracy aparatów grzewczo-wentylacyjnych. W tym celu na Rys. 31. zestawiono statusy pracy dwóch gazowych urządzeń grzewczych. Jednostka nr 1 zlokalizowana jest w strefie 1.0. znacznie oddalonej od pomieszczenia sprężarkowni, natomiast jednostka nr 2 została zainstalowana w strefa 4.1 bezpośrednio ogrzewanej ciepłem z instalacji sprężarek. Jednostki pracowały tak aby utrzymać wspólny parametr temperatury zadanej na hali produkcyjnej wynoszącej przez większość okresu grzewczego 21 °C.



Rys. 31. Zestawienie czasu pracy dwóch gazowych aparatów grzewczych. Jednostka nr 1 znacznie oddalona od pomieszczenia sprężarkowni na hali produkcyjnej, jednostka nr 2 zlokalizowana blisko hali pomieszczenia sprężarkowni.

Na zestawieniu wykresów na Rys. 31 przedstawiono różnicę w rocznym czasie pracy obu rozważanych jednostek. Czas pracy jednostek zlokalizowanych w strefach bezpośrednio sąsiadujących z pomieszczeniem sprężarkowni jest zdecydowanie krótszy, gazowe jednostki grzewcze pracują o około 66% czasu mniej niż bliźniacze jednostki zainstalowane w strefach zlokalizowanych najdalej od pomieszczenia sprężarkowni. Obie analizowane strefy hali produkcyjnej tzn. 1.0 i 4.1 zbliżone są do siebie powierzchniowo oraz obie są obsługiwane przez cztery identyczne gazowe agregaty grzewcze każda. Szczegółowa analiza czasu pracy tych jednostek w rozważanym sezonie grzewczym została przedstawiona w tabeli Tabela 1.

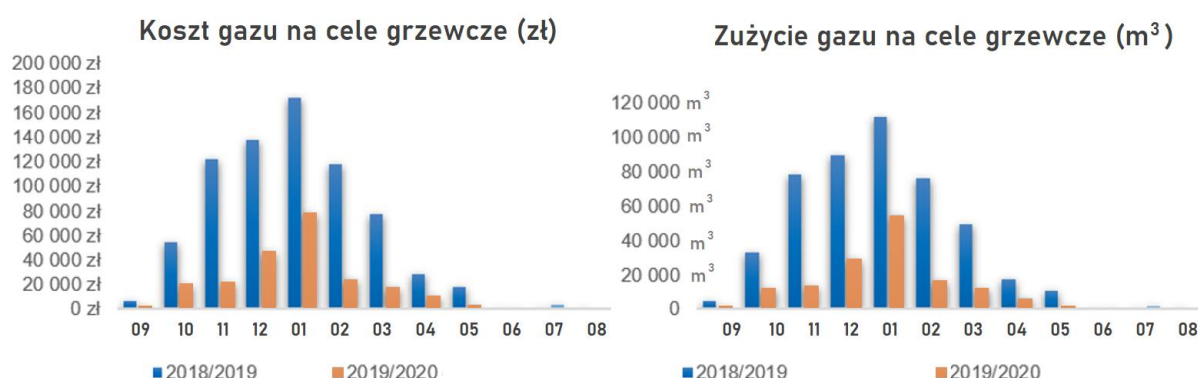
Tabela 1. Zestawienie dostarczonej energii cieplnej przez agregaty grzewcze w wybranych strefach w trakcie sezonu grzewczego 2019/2020

Jednostka grzewcza	Strefa	Procentowy czas pracy w sezonie grzewczym [%]	Godzinowy czas pracy w sezonie grzewczym [godz.]	Dostarczona energia grzewcza [MWh]
AGW 13	Strefa 1.0.	58 %	2505	80,2
AGW 14	Strefa 1.0.	61 %	2635	84,3
AGW 15	Strefa 1.0.	57 %	2462	78,8
AGW 16	Strefa 1.0.	55 %	2376	76,1
ŁĄCZNIE W STREFIE				319,4
AGW 4	Strefa 4.1.	21 %	907	29,1
AGW 5	Strefa 4.1.	19 %	820	26,2
AGW 6	Strefa 4.1.	18 %	778	24,9
AGW 7	Strefa 4.1.	20 %	864	27,6
ŁĄCZNIE W STREFIE				107,8

Analizując pracę urządzeń grzewczych widać wyraźny wpływ układu harvestingu energii cieplnej ze sprężarek na obciążenie jednostek grzewczych w strefie dogrzewanej. Obciążenie tych jednostek (strefa 4.1.) w skali sezonu grzewczego to zaledwie 34 % obciążenia jednostek zainstalowanych w „oddalonej” strefie referencyjnej (strefa 1.0.) ogrzewanej bez udziału źródeł odpadowej energii cieplnej. Warto zaznaczyć, że sumaryczna energia cieplna pochodząca z pracy urządzeń grzewczych w strefie 4.1 – 107,8 MWh oraz szacowana energia cieplna pozyskiwana z układu sprężarek w sezonie grzewczym wynosząca ok. 220 MWh daje łącznie 327,8 MWh energii cieplnej co jest wartością zbliżoną do sumarycznej energii cieplnej dostarczonej przez identyczne cztery jednostki grzewcze zainstalowane w strefie 1.0, która wynosi 319,4 MWh. Potwierdza to zatem prawidłowość poczynionych założeń i obliczeń.

6.6 Wyznaczenie poprawy efektywności obiektu na skutek instalacji systemu BMS CHRONOMATIK™ w świetle normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E

Na podstawie otrzymanych od Administracji obiektu danych dotyczących zużycia energii na cele grzewcze zakładu produkcyjnego przygotowano wykres pokazany na Rys. 32, przedstawiający porównanie zużycia energii w sezonach grzewczych 2018/2019 i 2019/2020 co bezpośrednio odpowiada sezonom grzewczym przed i po instalacji omawianego tu systemu BMS CHRONOMATIK™.



Rys. 32. Zestawienie kosztów ogrzewania zakładu produkcyjnego oraz wielkości zużycia gazu na cele grzewcze dla sezonów grzewczych 2018/2019 i 2019/2020 tj. przed i po realizacji systemu BMS CHRONOMATIK™ w obiekcie.

W sezonie grzewczym 2018/2019 czyli przed instalacją systemu BMS CHRONOMATIK™ z rozproszonymi systemami automatyki realizującymi zadanie sterowania klasyfikowane jako klasa D według przytoczonej normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E zużycie gazu wyniosło 467,4 tys. m³ co przy założonym przez dział administracji obiektu współczynniku konwersji 11,1 m³/kWh odpowiada konsumpcji energii o wartości 5188 MWh. Po realizacji systemu BMS CHRONOMATIK™ z przedstawianymi w tym rozdziale dysertacji funkcjami automatyzacji i sterowania zużycie gazu w pierwszym sezonie grzewczym po uruchomieniu systemu wyniosło 147,5 tys. m³ gazu, co przy współczynniku konwersji 11,1 m³/kWh odpowiada konsumpcji energii o wartości 1637 MWh. W efekcie poprawa efektywności energetycznej budynku w odniesieniu do konsumpcji energii na cele grzewcze obiektu to aż 3551 MWh w jednym pełnym i reprezentatywnym sezonie grzewczym. Redukcja zużycia energii na cele grzewcze budynku wyrażona procentowo jako iloraz energii cieplnej konsumowanej przez obiekt po realizacji systemu oraz przed jego realizacją wynosi 68 %. Porównanie tych dwóch sezonów grzewczych pokazuje redukcję konsumpcji gazu ziemnego przez urządzenia grzewcze o 319,9 tys. m³, co dział administracji omawianego obiektu oszacował na oszczędność rzędu 118 000 € tylko w 2020 roku (co przy średnim kursie Euro 4,4459 zł wg NBP w 2020 r daje niebagatelną kwotę ponad 520 tys. zł). Niestety w normie PN-EN ISO 52120-1:2022-09E dla budynków niemieszkalnych o charakterze produkcyjnym, nie została podana wartość współczynników efektywności energetycznej systemów automatyzacji i sterowania względem referencyjnej klasy C. Tabelę A.5 ze wspomnianej normy przedstawiono na Rys. 33.

A.3 Detailed BAC efficiency factors for heating and cooling

Table A.5 — Detailed BAC Efficiency factors f_{BACH} and f_{BACC} - Non-residential buildings

Non-residential building types	Overall BAC efficiency factors f_{BACH} and f_{BACC}							
	D		C Reference		B		A	
	Non energy efficient		Standard		Advanced		High energy performance	
	f_{BACH}	f_{BACC}	f_{BACH}	f_{BACC}	f_{BACH}	f_{BACC}	f_{BACH}	f_{BACC}
Offices	1.44	1.57	1	1	0.79	0.80	0.70	0.57
Lecture hall	1.22	1.32	1	1	0.73	0.94	0.3 ^a	0.64
Education buildings (schools)	1.20	-	1	1	0.88	-	0.80	-
Hospital	1.31	-	1	1	0.91	-	0.86	-
Hotels	1.17	1.76	1	1	0.85	0.79	0.61	0.76
Restaurants	1.21	1.39	1	1	0.76	0.94	0.69	0.6
Wholesale and retail trade service buildings	1.56	1.59	1	1	0.71	0.85	0.46 ^a	0.55
Other types:			1	1				
— sport facilities,								
— storage,								
— industrial buildings,								
— etc.								

^a These values highly depend on heating/cooling demand for ventilation.

Rys. 33. Tabela A.5. z normy PN-EN ISO 52120-1:2022-09E.

W oparciu o przedstawione obliczenia, wyliczony współczynnik poprawy efektywności względem stanu zastanego bez ingerencji w urządzenia systemu HVAC współczynnik poprawy $f_{BAC,H}$ przyjmuje wartość 0,32 co w kontekście innego rodzaju budynków (biurowców, szpitali, hoteli, itd.) opisanych w normie jest wartością wysoką, wskazującą na znaczną poprawę efektywności energetycznej budynku i klasyfikacji systemu BMS CHRONOMATIK™ jako system klasy A.

Rozwiązanie harvestingu energii cieplnej z systemu sprężarek ograniczyło zużycie energii na cele grzewcze przedstawionego obiektu o 220 MWh w sezonie grzewczym 2019/2020 czyli po instalacji systemu BMS CHRONOMATIK™, co odpowiada wartości 13,4 % całkowitej energii cieplnej zużywanej na ogrzewanie rozważanej hali produkcyjnej w tym sezonie grzewczym. Jest to wartość wyraźnie podkreślająca zauważalny udział systemu harvestingu energii w podnoszeniu efektywności energetycznej budynku z systemem BMS CHRONOMATIK™.

Przedstawiona analiza wpływu systemu BMS CHRONOMATIK™ na znaczną poprawę efektywności energetycznej budynku przemysłowego potwierdza pierwszą z tez postawionych w niniejszej rozprawie doktorskiej.

W kolejnych rozdziałach dysertacji wskazano, że kanały wentylacyjne odprowadzające ciepło odpadowe ze sprężarek mogą również zostać wybrane jako źródło odpadowej energii cieplnej zdolnej do harvestingowego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych realizujących pomiar warunków środowiskowych w sprężarkowni, będąc tym samym elementem systemu BMS CHRONOMATIK™ uczestniczącym w złożonym systemie automatyzacji i sterowania układem HVAC w omówionej właśnie hali produkcyjnej fabryki lodówek.

7 Harvesting energii w skali mikro

Harvesting energii jako sposób bezbateryjnego zasilania bezprzewodowych, niskomocowych platform czujnikowych pośrednio stanowi także ważny aspekt w poprawie efektywności energetycznej budynków z systemem BMS. Dla harvesterów energii cieplnej badania prowadziłem w dwóch kierunkach doboru środowiska pracy urządzeń bezprzewodowych zasilanych bezbateryjnie. Jednym z nich było środowisko przemysłowe w zakładach produkcyjnych, gdzie harvesting energii realizowany był z wykorzystaniem instalacjach emitujących znaczne ilości ciepła odpadowego (sprężarki w instalacjach sprężonego powietrza, kotłownie, węzły ciepła, węzły chłodu, itp.). Drugim wybranym środowiskiem badań harvesterów energii cieplnej w budynkach były instalacje dostępne wewnątrz budynków o charakterze bytowym (domy jednorodzinne, biurowce, budynki użyteczności publicznej, itp.). W miejscach tych zrealizowałem badania skupiające się nad zdolnością pozyskiwania energii cieplnej w oparciu o niekonwencjonalne źródła energii cieplnej w tym przyłączy zimnej wody w budynkach, belki rozdzielaczy ogrzewania, a także powierzchnie szyb okiennych.

Drugim eksplorowanym przeze mnie obszarem była energia mechaniczna dostępna w budynkach. Dla harvesterów energii mechanicznej wewnątrz budynków badania prowadziłem z wykorzystaniem klamki drzwiowej oraz samozamykacza drzwi - elementów mechanicznych powszechnie występujących w budynkach i skutecznie uzupełniających wspomniane wcześniej źródła energii cieplnej występujących w budynkach. Mechanizmy klamki drzwiowej oraz samozamykacza drzwi wyposażone zostały w układy pozwalające przekształcać energię mechaniczną na energię elektryczną, magazynować ją oraz udostępniać na potrzeby pracy bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa.

W trakcie badań skupiających się nad opracowaniem układów skutecznie podwyższających wartość pozyskiwanego napięcia elektrycznego z generatorów prowadzone były prace nad doбором niskonapięciowych przetwornic DC/DC umożliwiających skuteczne podnoszenie uzyskiwanych poziomów napięć do wartości 3,3V czyli wartości napięcia pracy referencyjnych bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa.

W trakcie realizacji zadań związanych z projektowaniem, uruchamianiem oraz testowaniem bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa zasilanych w oparciu o opracowane układy harvesterów energii odpadowej wewnątrz budynków przeprowadzone

zostały także badania skupiające się nad doбором magazynów energii umożliwiającą pracę bezprzewodowych platform czujnikowych w określonych kryteriach częstotliwości pomiarów oraz wysyłania danych do serwera LoRa oraz nadrzędnego systemu BMS CHRONOMATIK™.

Przeprowadzono także szereg badań związanych z pomiarem poboru prądu przez moduł pomiarowy oraz radiowy w trakcie pełnego cyklu realizacji zadania pomiarowo nadawczego.

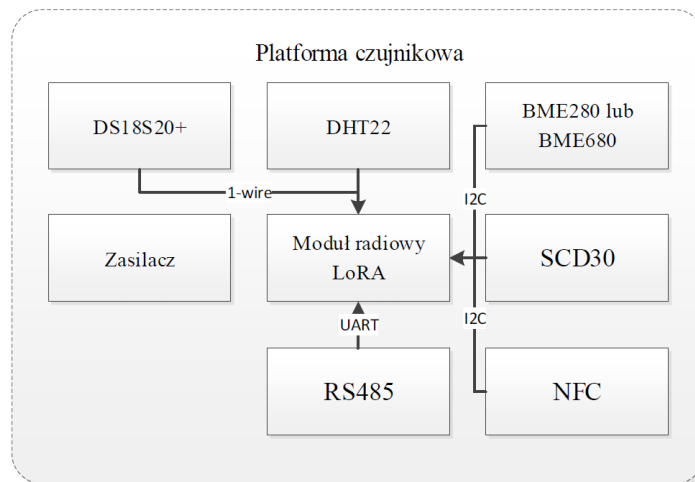
W kolejnych rozdziałach opisane zostały przeprowadzone badania oraz wykonana analiza wyników. W wyniku prowadzonych prac badawczych uruchomiono kilka prototypowych harvestingowych układów bezbaterijnie zasilających bezprzewodowe platformy czujnikowe LoRa zarówno w warunkach laboratoryjnych jak również przeprowadzono testy tych rozwiązań w warunkach przemysłowych zarówno dla harvesterów energii cieplnej, jak i dla harvesterów energii mechanicznej.

Podczas realizacji doktoratu wykonałem projekt oraz budowę stanowiska pomiarowego opartego o swobodnie programowalny sterownik PLC z zainstalowanym środowiskiem Linux. Stanowisko pomiarowe umożliwiło badanie możliwości energetycznych różnego rodzaju harvesterów i ich przydatności w bezbaterijnym zasilaniu bezprzewodowych platform czujnikowych. Dzięki swobodnej możliwości konfigurowania warstwy sprzętowej stanowiska pomiarowego, na bazie wykonanego projektu mogłem realizować pomiar różnych rodzajów i konfiguracji harvesterów energii w oparciu o tę samą platformę pomiarową. Wybór sterownika PLC umożliwił mi zrealizowanie na jednej platformie układu realizującego pomiar wartości analogowych (napięcie, natężenie prądu elektrycznego, pomiar temperatury, itp.) oraz sterowanie różnego rodzaju obciążeniami elektrycznymi dla układu pomiarowego.

8 Zapotrzebowanie energetyczne bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa

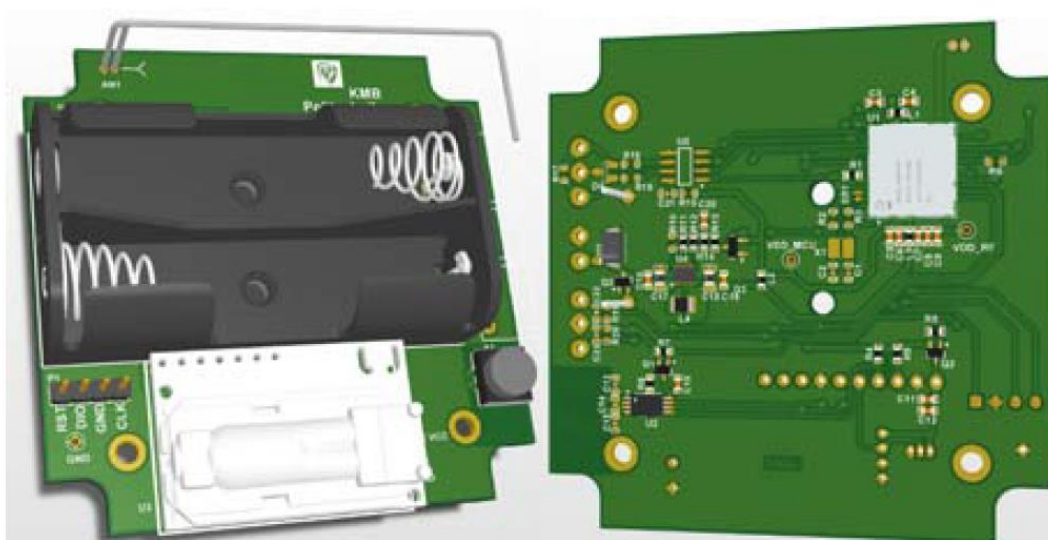
8.1 Wstęp

Do badań związanych z opracowaniem modułów harvestingowych służących do bezbaterijnego zasilania platform czujnikowych systemu BMS w ramach rozprawy doktorskiej wybrano jako referencyjne bezprzewodowe platformy czujnikowe LoRa opracowane i uruchomione w ramach projektu „*Opracowanie innowacyjnej platformy czujnikowej z łącznością bezprzewodową LPWAN zunifikowanej z systemem zarządzania inteligentnym budynkiem BMS CHRONOMATIK™*”. Projekt ten zrealizowany został w ramach programu operacyjnego INTELIGENTNY ROZWÓW 2014-2020 we współpracy z Politechniką Wrocławską. W ramach projektu zaprojektowano, wykonano oraz z powodzeniem zainstalowano w licznych wdrożeniach systemów BMS CHRONOMATIK™ serię platform czujnikowych, których zadaniem jest bezpośredni pomiar określonych parametrów środowiskowych w budynkach (temperatura i wilgotność powietrza, ciśnienie, stężenie CO₂ w powietrzu), a następnie bezprzewodowe przesłanie danych do serwera sieci LoRaWAN. Schemat blokowy omawianej platformy czujnikowej przedstawiono na Rys. 34. [77]. Głównym elementem platformy pomiarowej jest moduł radiowy CMWX1ZZABZ-078 firmy Murata [78]. W module tym zastosowano układ komunikacji SX1276 firmy Semtech oraz niskomocowy mikrokontroler STM32L082 firmy ST Microelectronics. Główną zaletą zastosowanego modułu jest możliwość wykorzystania zastosowanego tu mikrokontrolera do realizowania własnych programów – nie ma więc potrzeby stosowania kolejnego mikrokontrolera komunikującego się z czujnikami. Dodatkowo moduł posiada certyfikaty dopuszczające go do stosowania na rynku europejskim. Moduł wyposażono również w tor radiowy z anteną opracowaną i wykonaną także w ramach wspomnianego projektu. Zastosowano w tym przypadku antenę drutową, antena ta ma strukturę typu IFA (*ang. Inverted F Antenna*) w postaci odwróconej litery F przy czym ramię unipola biegnie wzdłuż krawędzi płytki PCB.



Rys. 34. Schemat blokowy platformy pomiarowej pracującej w sieci LoRaWAN.

Referencyjna platforma czujnikowa LoRa zasilana jest z dwóch połączonych szeregowo baterii Li-ion LiSOCl_2 o napięciu znamionowym 3,6 V każda i wielkości AA (docelowo typu LS-14500, prod. Saft) poprzez przetwornicę DC-DC na bazie układu TPS62745 [79], na wyjściu której otrzymywane jest napięcie stałe o wartości 3,3V. W platformie zastosowano również układ NFC-RFID ST25DV04K [80], który wraz z anteną cewkową pozwala przekazywać do platformy podstawowe parametry konfiguracyjne (np. klucze szyfrujące). Płytkę PCB została zaprojektowana tak aby mieściła się w obudowie Z123 firmy Kradex [81]. Widok projektu 3D platformy czujnikowej z zainstalowanym przykładowym czujnikiem stężenia CO_2 w powietrzu przedstawiono na Rys. 35.



Rys. 35. Widok projektu 3D autonomicznej platformy czujnikowej z czujnikiem stężenia CO_2 SCD30.

W opisywanej platformie przewidziano możliwość stosowania zamiennie różnych czujników parametrów środowiskowych. W przedstawionym wariantcie konfiguracji platformy zastosowano czujnik stężenia CO₂ w powietrzu typu SCD30 [82] (prod. Sensirion), umożliwiającą jednocześnie pomiar temperatury i wilgotności powietrza, oraz dodatkowy czujnik temperatury DS18B20 [83]. Dla opracowanych platform czujnikowych wykonano oprogramowanie pozwalające na pomiar wybranych parametrów środowiskowych i przesyłanie ich w sposób bezprzewodowy w sieci LoRaWAN. Platforma ma również możliwość lokalnej współpracy przewodowej poprzez port komunikacji szeregowej RS485. Oprogramowanie platformy wykorzystuje implementację stosu I-CUBE-LRWAN udostępnioną na zasadzie open-source przez ST Microelectronics [84].

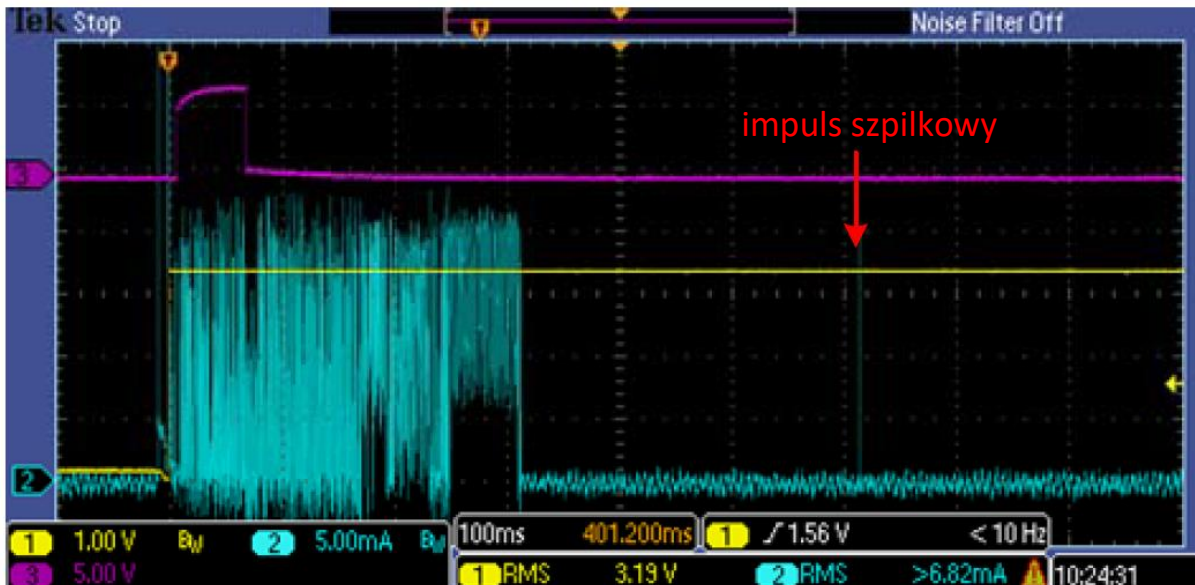


Rys. 36. Widok platformy czujnikowej w konfiguracji z czujnikiem temperatury DS18B20 zabudowanej w obudowie KRADEX Z123.

8.2 Pomiary zapotrzebowania energetycznego referencyjnych platform czujnikowych LoRa

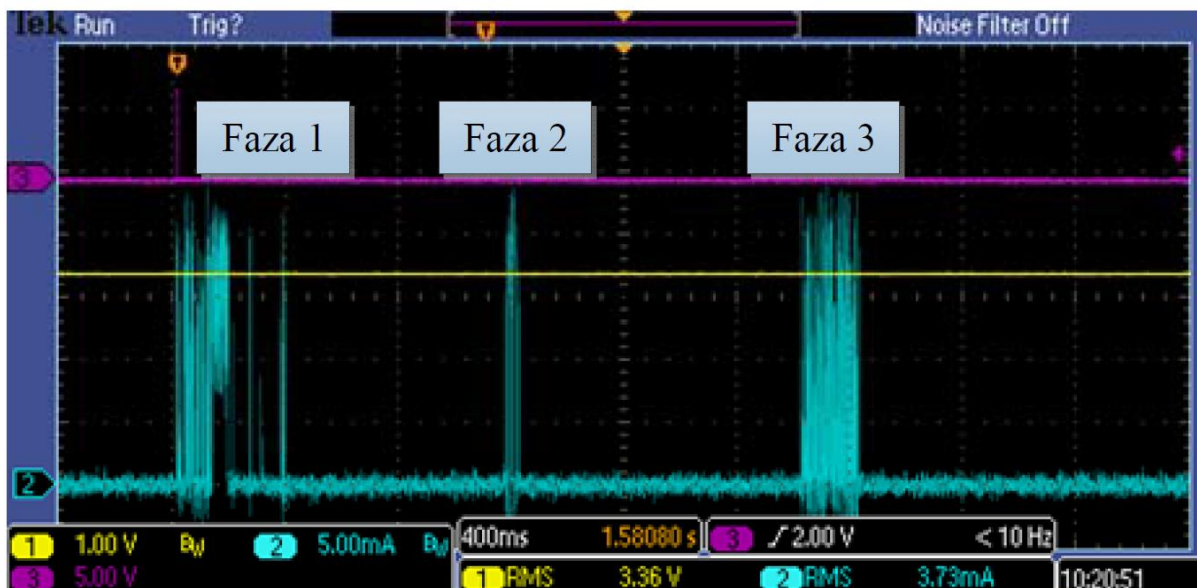
W trakcie prac związanych z uruchomieniem bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa dokonano oceny ich zapotrzebowania energetycznego. Jak wspomniano wcześniej platformy te wybrano jako referencyjne testowe zdalne końcówki czujnikowe współpracujące z BMS CHRONOMATIK™. Wykonano pomiary prądu zasilającego, pobieranego przez platformę czujnikową pracującą w warunkach zbliżonych do warunków rzeczywistych dla różnych wariantów zasilania. Wstępne pomiary przeprowadzono w temperaturze pokojowej (21°C) w pomieszczeniach zlokalizowanych w budynku użyteczności publicznej ze ścianami o budowie mieszanej (cegła i okładziny ceramiczne/metalowe) oraz ze zbrojonymi żelbetowymi przegrodami między kondygnacjami (bud. C14 Politechniki Wrocławskiej). Układy testowe, wyposażone we wbudowany czujnik temperatury DS18B20, zasilano ze stabilizowanego impulsowego zasilacza laboratoryjnego (U8001A, Keysight Technologies). Pomiary prowadzono przy pomocy oscyloskopu cyfrowego Tektronix MSO2014 z sondami 1:10 (Tektronix P2221), bezkontaktowej sondy prądowej Tektronix A6302 ze wzmacniaczem AM503 oraz precyzyjnego multimetru True RMS Fluke 289. Pomiary te wykonano zasilając losowo wybrane platformy czujnikowe stabilizowanym napięciem stałym z zasilacza laboratoryjnego. Zastosowano napięcie odpowiadające napięciu znamionowemu dwóch połączonych baterii (7,2V), napięciu obniżonemu do napięcia baterii w końcowym okresie ich eksploatacji (6,0V) oraz napięciu znacznie obniżonego do wartości 4,0V. Wyniki przykładowych przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na oscylogramach na Rys. 39. Ślad żółty na oscylogramach to napięcie VDD zasilające moduł radiowy oraz czujniki (znamionowo 3,3 V), ślad niebieski to prąd zasilania pobierany z baterii IBAT, ślad fioletowy to napięcie VBAT na wyjściu VIN_SW układu TPS62745 (układ ten posiada wewnętrzny przełącznik pozwalający mierzyć napięcie zasilania) lub na wejściu ADC_IN0 modułu CMWX1ZZABZ-078. Na Rys. 37. pokazano przebieg napięć i prądów podczas zimnego startu losowo wybranej platformy dla VBAT=7,2 V. Cykl startu i konfiguracji układu mikroprocesorowo-radiowego trwa ok. 320 ms i towarzyszy mu szczytowy pobór prądu ok. 21-22 mA. Po jego zakończeniu układ przechodzi w tryb uśpienia, podczas którego w sygnale prądu zasilającego pojawiają się tylko rzadkie (nie częściej niż co 300 ms) impulsy szpilkowe (zaznaczone na Rys. 37. strzałką), związane z działaniem przetwornicy DC-DC w trybie PFM. Pojawienie się napięcia na wejściu VIN_SW

przy starcie układu oraz jego stosunkowo wolny narost (ok. 50 ms) wiąże się z istnieniem stanu nieustalonego na pinie mikrokontrolera sterującego EN_VIN_SW (załączenie wewnętrznego przełącznika), w ok. 65 ms po starcie układu sygnał ten zostaje wyłączony. Cykl startu platformy wiąże się ze zużyciem ok. 19,2 mJ energii przy średnim prądzie zasilania 11,8 mA (wartość rms).



Rys. 37. Zmiany napięć VDD, VIN_SW i prądu IBAT podczas zimnego startu platformy (VBAT=7,2 V).

Podstawowy cykl pomiarowo nadawczy przedstawiony na oscylogramie Rys. 38. składa się z 3 faz, w których pobór prądu IBAT dochodzi chwilowo również do ok. 22 mA (przy VBAT=7,2 V). Faza 1 wiąże się ze zużyciem 11,1 mJ energii, faza 2 wymaga ok. 2,4 mJ a faza 3 to ok. 8,4 mJ, a zatem cały cykl pomiarowo nadawczy zużywa ok. 22 mJ energii przy średnim prądzie zasilania ok. 4,7 mA (wartość rms).



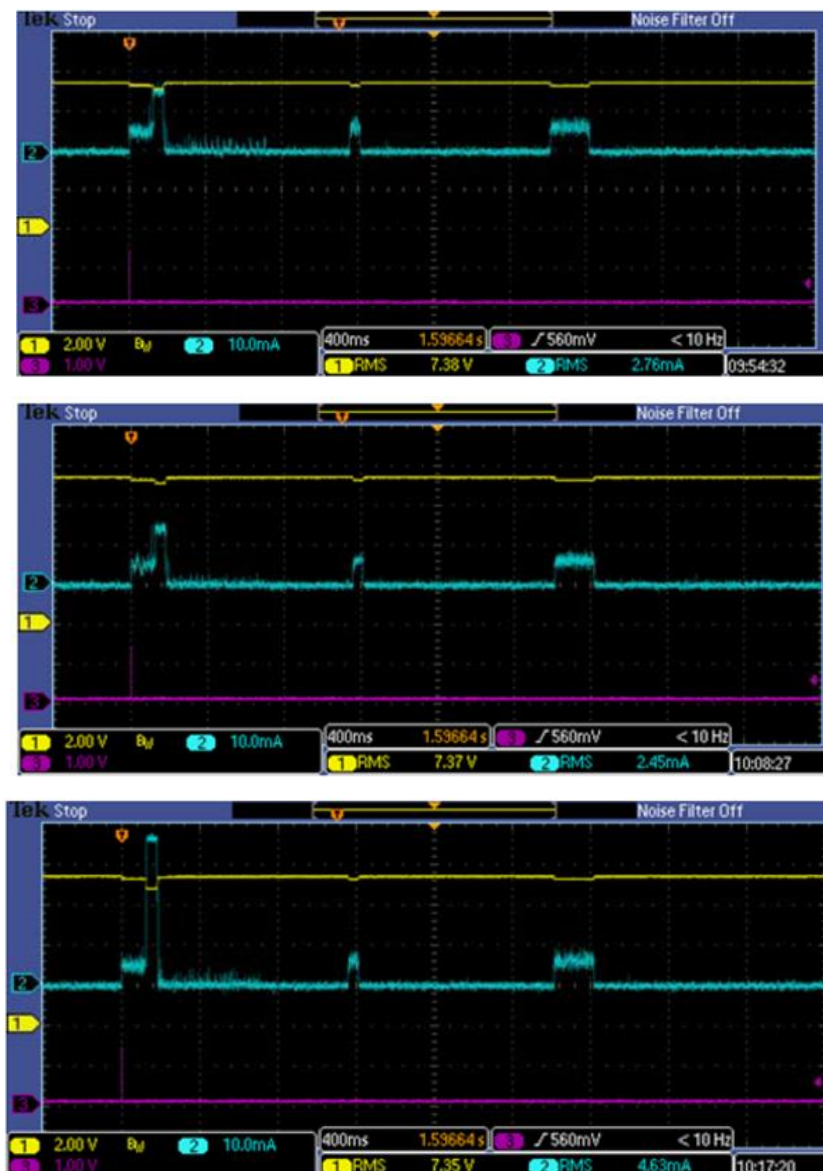
Rys. 38. Zmiany napięć VBAT, VDD oraz prądu IBAT podczas cyklu pomiarowo nadawczego platformy (VBAT=7,2V)

W czasie braku aktywności platform (tzn. w czasie ich uśpienia) prąd IBAT ma wartość 1,3-2,8 μA (wartość uśredniona w okresie 300s pracy platform w uśpieniu to ok. 2,1 μA). Podobne pomiary wykonano również dla pozostałych napięć zasilania przyjętych do wykonania testu. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli Tabela 2. Po analizie uzyskanych wyników można stwierdzić, że „zimny” start platform (z wystąpieniem sygnału „join” do bramy LoRa) wymaga zużycia maksymalnie ok. 28 mJ energii (przy napięciu zasilania 4,0 V), w czasie uśpienia platformy pobierają z baterii prąd o wartości średniej ok. 2,1 μA , a pojedynczy cykl pomiarowo nadawczy (z pomiarem napięcia baterii, ale bez obsługi żadnego czujnika) wymaga zużycia maksymalnie ok. 27 mJ energii przy wartości napięcia zasilania na poziomie 4,0 V.

Tabela 2. Pobór energii przez testową platformę dla różnych napięć zasilania

Napięcia zasilania [v]	Zimny start platformy		Cykl pracy platformy		Prąd jałowy [μA]
	Energia [mJ]	Prąd baterii [mA]	Energia [mJ]	Prąd baterii [mA]	
7,2	19,2	11,8	21,9	4,7	2,1
6,0	22,8	12,7	22,5	5,0	2,0
4,0	28,3	16,9	27	5,9	2,1

Przeprowadzono również podobne pomiary dla platform zasilanych przy pomocy dwóch nowych baterii litowych o znamionowym napięciu 3,6 V. Pomiary prowadzono w stanie, gdy platforma uzyskały akceptację bramy LoRa (to znaczy po tzw. „join” czyli pierwszym logowaniu i uzyskaniu przez zdalny układ akceptacji od bramy LoRa). Na pokazanych oscylogramach ślad żółty to napięcie baterii VBAT (znamionowo 7,2 V), ślad niebieski to prąd zasilania pobierany z baterii IBAT, ślad fioletowy to napięcie VBAT na wejściu ADC_IN0 moduł CMWX1ZZABZ078. Na rysunku Rys. 39. pokazano przebiegi napięć VBAT i ADC_IN0 oraz prądu IBAT podczas cyklicznej pracy trzech różnych, przykładowych platform czujnikowych.



Rys. 39. Zmiany napięć VBAT i ADC_IN0 oraz prądu IBAT podczas cyklicznej pracy trzech platform zasilanych z baterii.

Na przedstawionych śladach na Rys. 39 doskonale widoczne są 4 fazy pracy platformy: wybudzenie mikrokontrolera i pomiary, jego uśpienie oraz 3 fazy transmisji danych LoRa (nadawanie i 2 okna odbiorcze), w których mikrokontroler już nie bierze udziału. Widoczne są również różnice pomiędzy poszczególnymi platformami w wielkości prądu pobieranego podczas fazy nadawania – od ok. 14 mA do ok. 38 mA; wiąże się to jednak bezpośrednio z mocą transmisji radiowej, wynegocjowanej przez bramę LoRa z daną platformą. Średnie prądy zasilania (podane jako wartość rms) w czasie całego okresu aktywnej pracy platform zmieniają się od ok. 3,4 mA do ok. 6,0 mA w zależności od mocy emitowanego sygnału radiowego natomiast energia niezbędna do wykonania pełnego cyklu pomiarowo-nadawczego to od ok. 22,5 mJ do ok. 32,5 mJ. Platformy różnią się również pod względem prądu pobieranego w stanie uśpienia – minimalny pobór w tym wypadku to od ok. 1,6 μ A do ok. 2,5 μ A natomiast pobór maksymalny to od ok. 2,8 μ A do ok. 4,0 μ A. W chwili poboru zwiększonego prądu z baterii (związanego zarówno z wybudzeniem procesora jak i – przede wszystkim - fazami bezprzewodowej transmisji danych w standardzie LoRa) widoczne są zapady jej napięcia (o ok. 0,2-0,4 V; do ok. 0,8 V przy transmisji z poborem prądu 38 mA) jednak nie są one groźne dla układu zasilania platformy. Biorąc pod uwagę wyznaczone doświadczalnie w warunkach rzeczywistych maksymalne wartości prądu pracy jałowej platform (dochodzące do ok. 4,0 μ A przy średnim napięciu zasilania ok. 7,0 V) oraz energii niezbędnej do wykonania pełnego pojedynczego cyklu pomiarowo nadawczego (przyjętej jako 33 mJ), a także realną (tzn. uwzględniając impulsowy pobór zwiększonego prądu podczas fazy nadawania) pojemność 2 baterii Li-SOCl₂ przewidzianych do zasilania platform (katalogowa pojemność jednej baterii LS-14500 to 9,36 Wh \approx 33,7 kJ; na podstawie katalogowych charakterystyk rozładowania tej baterii można założyć iż ok. 75 % tej pojemności będzie dostępne przy dorywczym rozładowaniu baterii impulsowym prądem 33 mA co daje energię dostępną z dwóch baterii ok. 50,5 kJ) można oszacować, że platforma czujnikowa wykonująca pomiary tylko temperatury (np. wyposażona w czujnik temperatury DS18B20) co 5 min (czyli 288 pomiarów/dobę) może pracować przez okres ponad 11,5 roku. Zastosowanie czujnika CO₂ typu SCD30, zużywającego ok. 100 mJ energii na pojedynczy pomiar stężenia CO₂, temperatury i wilgotności pozwala – ponownie przy założeniu pomiarów prowadzonych z interwałem 5 min (czyli 288 pomiarów/dobę) – na bateryjną pracę platformy już tylko przez ok. 53 miesiące. Wydłużenie interwału pomiaru do 12 minut (czyli do 6 pomiarów/h) pozwala jednak na wydłużenie czasu pracy do ponad 8 lat. Wszystkie przeprowadzone oszacowania

czasu bateryjnej pracy platform zakładają działanie w temperaturze zbliżonej do pokojowej – obniżenie temperatury może skrócić ten czas nawet o ok. 50 % ze względu na temperaturowy spadek pojemności baterii Li-SOCl₂ (szczególnie silnie widoczny dla wyższych wartości prądu rozładowania).

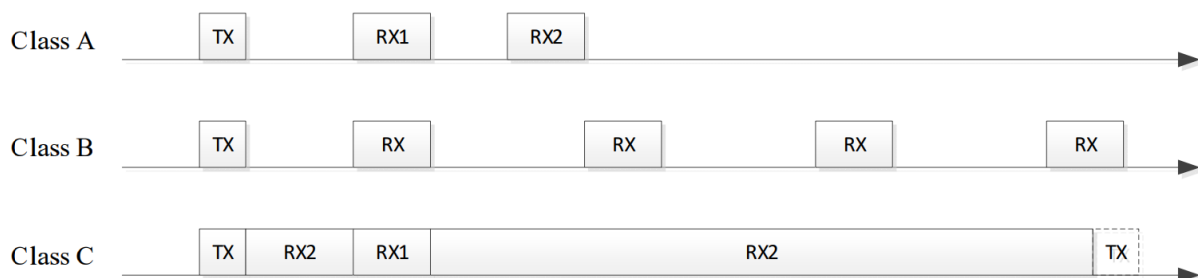
8.3 Opis architektury komunikacji bezprzewodowej platform czujnikowych z wykorzystaniem komunikacji LoRa.

Ze względu na częste odwołania w dysertacji do pojęć LoRa i LoRaWAN wydaje się uzasadnione ich przybliżenie. LoRa jest systemem komunikacji bezprzewodowej dalekiego zasięgu o małej mocy (LPWAN) [5]. LoRa wykorzystuje wolne od licencji pasma częstotliwości radiowych przy czym w Europie jest to pasmo 868 MHz. System wspierany jest przez organizację LoRa Alliance, zrzeszającą ponad 500 członków. W warstwie radiowej LoRa wykorzystuje techniki modulacji z widmem rozproszonym CSS (*ang. Chirp Spread Spectrum*), co zapewnia jej bardzo dużą odporność na zakłócenia oraz dobrą propagację sygnałów radiowych nawet w trudnym środowisku budowlanym. Dzięki temu zasięg poprawnej transmisji danych mierzony jest w kilometrach, nie tylko w otwartej przestrzeni, ale także w warunkach miejskich czy przemysłowych. W warstwie sieciowej również można wykorzystać jeden z protokołów definiujących protokół komunikacyjny i architekturę systemu dla sieci jakim jest LoRaWAN, także utrzymywany przez LoRa Alliance. Protokół LoRaWAN odpowiada również za zarządzanie częstotliwościami komunikacji i szybkością transmisji danych [85][86]. Sieć LoRaWAN ma topologię gwiazdy rozszerzonej, w której bramy (Gateway) przekazują komunikaty między urządzeniami końcowymi (End Device), a centralnym serwerem sieciowym (Network Server). W tej konfiguracji urządzenia końcowe komunikują się za pomocą komunikacji bezprzewodowej z jednym przeskokiem z jedną lub z większą liczbą bram, które z kolei są połączone z centralnym serwerem sieciowym za pośrednictwem klasycznych połączeń TCP/IP [87], co zilustrowano schematycznie na Rys. 40.



Rys. 40. Schemat architektury sieci LoRaWAN [78].

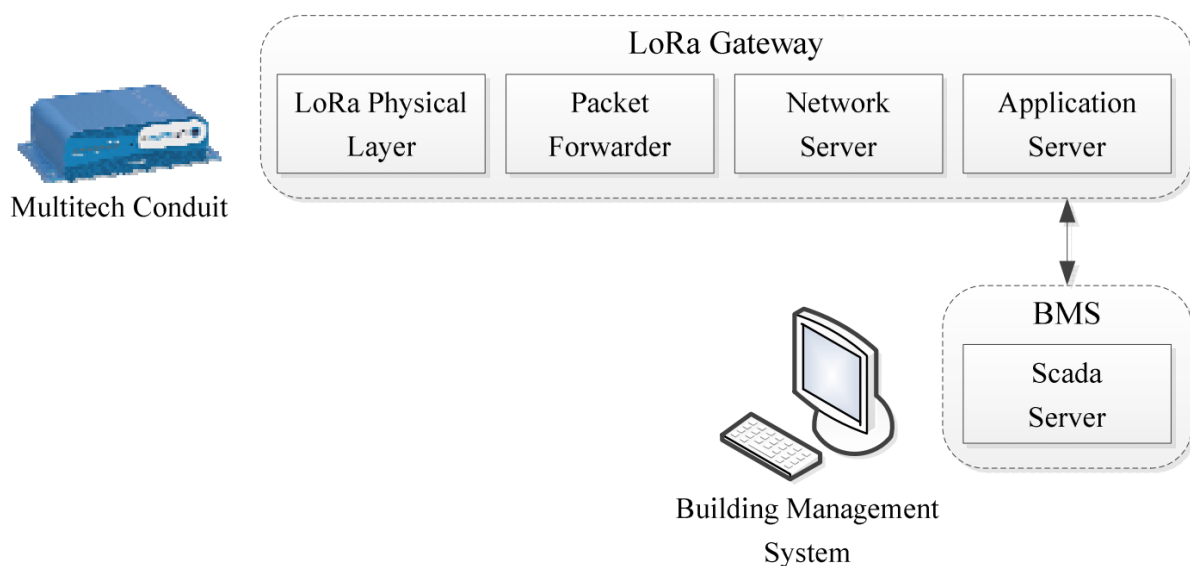
Urządzenia końcowe pracują w jednej z trzech klas energetycznych, których działanie zilustrowano schematycznie na Rys. 41. Klasa A zapewnia największą oszczędność energii. Urządzenia końcowe w tej klasie domyślnie znajdują się przez większość czasu w trybie uśpienia, maksymalnie oszczędzając energię elektryczną. Urządzenie końcowe zgodnie z algorytmem sporadycznie wybudza się, przeprowadza pomiar, uruchamia moduł radiowy i wysyła dane pomiarowe, a następnie w dwóch oknach czasowych przechodzi w tryb nasłuchu. W tym trybie wystanie danych zwrotnie do urządzenia końcowego jest możliwe jedynie wtedy, kiedy urządzenie to jest wybudzone i zainicjowało transmisję. Klasa B zapewnia komunikację radiową w pewnych ustalonych interwałach czasowych. W tym trybie określono dokładne odstępy czasowe, w których urządzenie może wysyłać i/lub odbierać dane. Klasa B jest rozwinięciem klasy A z dodaną funkcjonalnością dwukierunkowej komunikacji w interwałach czasowych. Cykliczne przechodzenie w tej klasie w tryb nasłuchu jednak znacznie zwiększa zapotrzebowanie na energię elektryczną. Klasa C umożliwia ciągły nasłuch, a tym samym odbieranie danych wysłanych w prawie dowolnym momencie czasu, tylko sporadycznie przechodząc w tryb nadawania, gdy dane pomiarowe są dostępne do wysłania. Klasa C nie zapewnia oszczędności energii i w praktyce nadaje się tylko dla urządzeń końcowych ze stałym zasilaniem (sieciowym). Wykorzystane w doktoracie i opisywane w dysertacji urządzenia końcowe LoRa czyli uniwersalne platformy pomiarowe pracują w klasie A.



Rys. 41. Okna czasowe nadawania i odbioru dla węzłów pracujących w różnych klasach [78].

Dane transmitowane w sieciach LoRaWAN są zabezpieczone algorytmem szyfrującym AES z 128 bitowym kluczem, przy czym szyfrowanie występuje tu na dwóch poziomach: zarówno w warstwie sieciowej jak i w warstwie aplikacji [88]. W związku z tym każdy węzeł końcowy musi posiadać dwa 128-bitowe klucze. Klucze te można udostępnić na dwa sposoby.

Pierwszy sposób to dostarczanie kluczy na etapie produkcji urządzenia, drugi to dynamiczne dostarczenie ich w momencie dołączania urządzenia końcowego do sieci LoRa. Dodatkowo każdy węzeł końcowy musi posiadać swój unikalny numer. Bramy komunikują się tylko z urządzeniami, których numery znają. W oparciu o opisywane wyżej mechanizmy zbudowano lokalną sieć czujnikową LoRaWAN wykorzystywaną podczas badań związanych z realizacją doktoratu. Głównym elementem tej sieci jest Multitech Conduit, który działa nie tylko jako klasyczna brama LoRa, ale także jako centralny serwer sieciowy, a także jako programowalny serwer aplikacji (Application Server). Serwer aplikacji wykorzystując protokół sieciowy Modbus TCP/IP udostępnia dane pomiarowe do serwera BMS CHRONOMATIK™, bądź innych sieciowych urządzeń systemów BMS. W trakcie prowadzonych badań używano w tym celu sterownika PLC WAGO 750-8202, który podczas badań pełnił funkcję serwera systemu BMS CHRONOMATIK™. Schemat opisanego rozwiązania przedstawiono na Rys. 42.



Rys. 42. Schemat architektury wykorzystywanej w badaniach sieci LoRa.

Konfiguracja bramy Multitech odbywa się poprzez interfejs sieciowy. Oprócz konfiguracji części radiowej, konfiguruje się także klucze, dołączone dodatkowe bramy, oraz obsługiwane urządzenia końcowe. W oprogramowaniu bramy Multitech dostępna jest także aplikacja Node-RED, czyli bardzo wygodne narzędzie programistyczne umożliwiające szybkie tworzenie aplikacji pośredniczących między siecią LoRa, a komunikacją z wykorzystaniem sieciowych protokołów komunikacyjnych np. Modbus TCP/IP.

9 Harvesting energii – badanie możliwości bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa z wykorzystaniem przewodności cieplnej okna.

9.1 Wstęp, problematyka zagadnienia, koncepcja opracowania zasilania bezbaterijnego kontaktronów bezprzewodowych

Zrealizowane badania przedstawione w tym rozdziale manuskryptu dotyczą harvestingu energii cieplnej i przekształceniu jej na energię elektryczną w kontekście bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych czujników otwarcia okien realizujących komunikację z nadrzędnym systemem BMS CHRONOMATIK z wykorzystaniem protokołu komunikacyjnego LoRa. Uzasadnienie użycia w budynku bezprzewodowego standardu komunikacyjnego LoRa przedstawiono w jednym z wcześniejszych rozdziałów pracy. W oparciu o wcześniejsze doświadczenia Autora związane z integracją oraz zarządzaniem obszarami biurowymi w budynkach wielkopowierzchniowych przy użyciu systemu BMS CHRONOMATIK™ przeprowadzono badania nad możliwością bezbaterijnego zasilania wspomnianych zdalnych kontaktronowych czujników otwarcia okien. Obecnie w realizacjach dotyczących monitorowania stanu okien w obszarach biurowych najczęściej wykorzystywane są przewodowe kontaktrony magnetyczne. Rozwiązanie takie posiada jednak szereg wad. Niezaprzeczalnie najważniejszą z nich jest konieczność wykonywania często bardzo rozbudowanej sieci przewodowej pomiędzy kontaktronami, a rozdzielnicami automatyki budynkowej (czyli sprzętowymi końcówkami systemów BMS). Okablowanie to stanowi znaczną część kosztów związanych z realizacją systemu automatyki budynkowej w obszarach biurowych. W zależności od charakterystyki budynku, według danych firmy KMB Grupa dotyczących realizacji systemów BMS CHRONOMATIK™ sięgać one mogą nawet 40% kosztów całej inwestycji. Dodatkowo, w pewnych rodzajach istniejących już budynków (np. w budynkach zabytkowych lub o ruchu ciągłym – jak szpitale) wykonanie takiego okablowania jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

Należy podkreślić, że informacja dotycząca otwarcia/zamknięcia okien w pomieszczeniach biurowych, (a także dachowych klap przewietrzających w obszarach produkcyjny i magazynowych oraz innych aplikacjach – np. monitorowanie stanu otwarcia bram przemysłowych) stanowi bardzo ważny warunek w algorytmie automatycznego

sterowania pracą urządzeń HVAC. W systemie BMS CHRONOMATIK™ dane te pozwalają na zmianę algorytmów sterowania urządzeń HVAC podczas otwarcia okien, w efekcie redukując zużycie mediów (energii elektrycznej, wydatku powietrza i chłodu) na cele utrzymania zadanych warunków środowiskowych wewnątrz budynków.

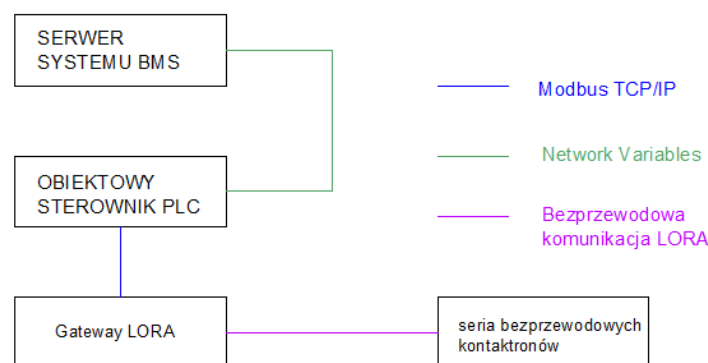
Ze względu na liczne trudności związane z instalacją konwencjonalnych - przewodowych kontaktronów okiennych, integralną częścią systemu BMS CHRONOMATIK™ są zatem bezprzewodowe kontaktrony dostępne już na rynku urządzeń automatyki i pracujące z wykorzystaniem komunikacji radiowej LoRa. Rozwiązanie to eliminuje szereg problemów związanych z pracami elektroinstalacyjnymi, a także umożliwia wykonywanie integracji obszarów biurowych w budynkach już istniejących bez konieczności prowadzenia przewodów.

Zastosowanie bezprzewodowych czujników kontaktronowych jednak nadal wymaga ich zasilania co w klasycznych układach czujnikowych tego typu jest prowadzone w oparciu o zasilanie bateryjne. Powoduje to jednak konieczność cyklicznego serwisowania tych urządzeń związanego z wymianą baterii w modułach. Bardzo pożądanym zatem rozwiązaniem jest opracowanie platformy czujnikowej badającej otwarcie okna zasilanej bezbateryjnie. Ze względu na ograniczone źródła odpadowej energii dostępne w pomieszczeniach biurowych przedstawione badania skupiły się zatem na harvestingu energii cieplnej na szybach okiennych.

Wykorzystując bezprzewodowy (pracujący w standardzie komunikacji LoRa) kontaktron firmy VEGA model Smart MC0101 [89] Autor w ramach pracy zawodowej w trakcie realizacji doktoratu wdrożeniowego opracował wiele projektów w zakresie systemu BMS CHRONOMATIK™, między innymi projekt automatyki biurowca będący koherentną częścią rozbudowanego systemu BMS CHRONOMATIK™ w zakładzie produkcyjnym AGD we Wrocławiu. Sterownik PLC (zintegrowany w nadrzędnym systemie BMS CHRONOMATIK™) realizujący sterowanie instalacjami wewnątrz pomieszczeń biurowych, odpowiedzialnymi za komfort osób w nich przebywających tj. klimatyzację, ogrzewanie, wentylację oraz oświetlenie został zaprogramowany tak aby realizował algorytm sterujący pozwalający na uzyskanie jak największych oszczędności w zakresie zużycia mediów, równocześnie zapewniając wymagane warunki środowiskowe oraz komfort cieplny osób pracujących w budynku. Swobodnie programowalny sterownik PLC firmy WAGO [90] za pomocą protokołu Modbus TCP/IP komunikuje się w tym rozwiązaniu z serwerem LoRa zainstalowanym oraz obsługiwany przez wspomniany już Gateway LORA Conduit™ (produkcji MULTITECH [91]).

Serwer LoRa udostępnia tablicę zmiennych zawierającą rejestry odpowiadające stanowi otwarcia poszczególnych okien, a także stanu baterii, mocy sygnału radiowego oraz temperatury w otoczeniu czujników okiennych.

Gateway Multitech Conduit™ obsługuje sieć urządzeń bezprzewodowych LoRa poprzez zintegrowany serwer LoRa i serwer aplikacji. Następnie dane pozyskane z kontaktronów z wykorzystaniem protokołu LoRa przypisywane są do statycznej tablicy rejestrów protokołu komunikacyjnego Modbus TCP/IP. Komunikacja bezprzewodowa LoRa z kontaktronami zrealizowana została w klasie A, co oznacza, że dane z kontaktronów wysyłane są zdarzeniowo (komunikacja wywołana jest tylko zmianą stanu okna) oraz dodatkowo cyklicznie w interwale dwunastu godzin. Komunikacja cykliczna jest obsługiwana na poziomie sterownika PLC i wykrywa występowanie zdarzeń niepożądanych (np. utrata komunikacji z kontaktronem, zniszczenie kontaktronu, rozładowanie baterii, itp.). Uproszczony schemat komunikacji omówionych urządzeń został przedstawiony na Rys. 43.



Rys. 43. Uproszczony schemat integracji bezprzewodowych kontaktronów okiennych w systemie BMS CHRONOMATIK™.

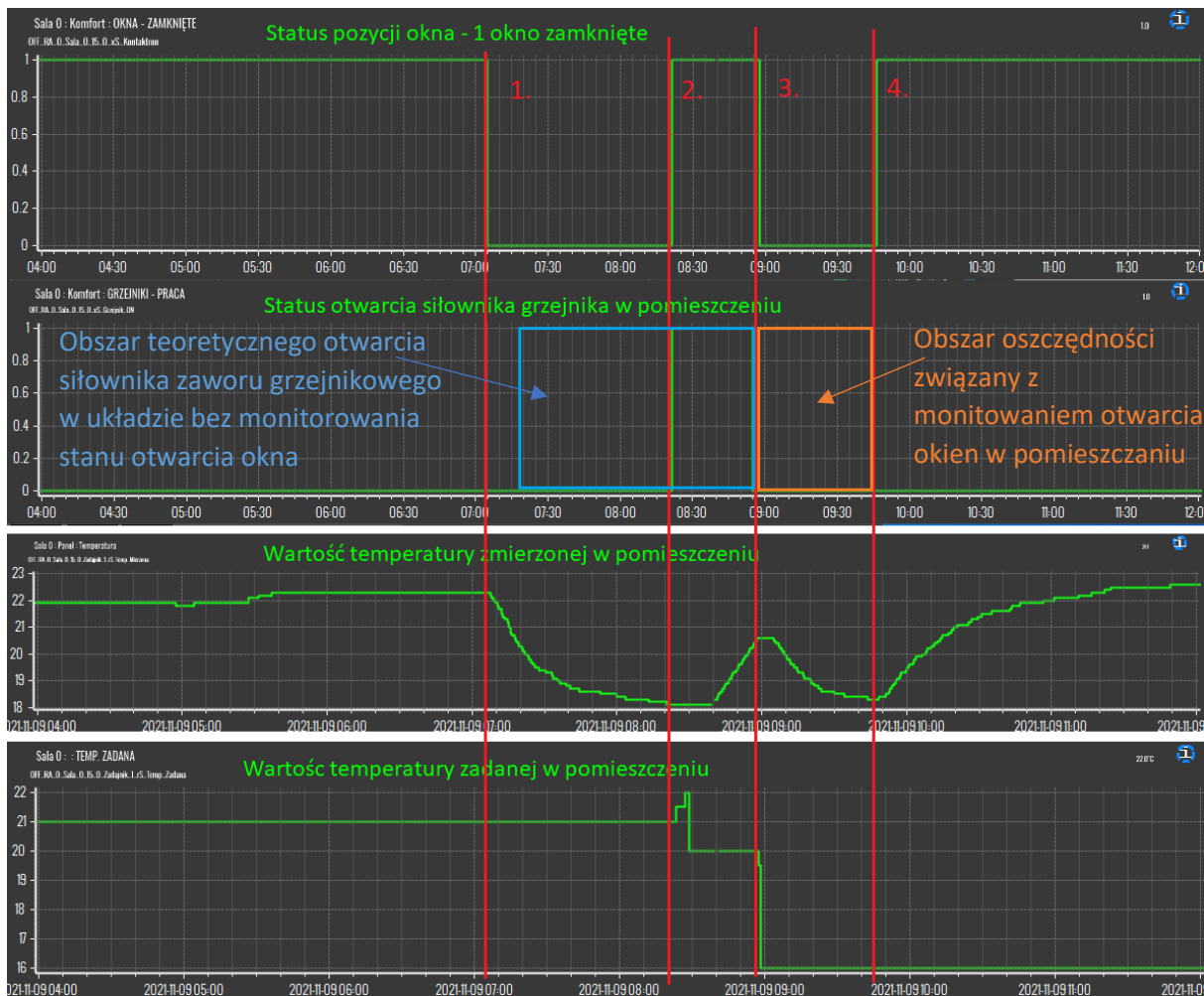
Wspomniane przykładowe, bezprzewodowe okienne czujniki kontaktronowe wykorzystane w omawianej aplikacji biurowej są zasilane bateryjnie (bateria CR123A 3V, 1400mAh) i według dokumentacji producenta zapewniają dostarczenie 15 000 komunikatów do serwera LoRa. Przy przedstawionej konfiguracji i sposobie pracy tego typu zdalnych kontaktronów serwisowa wymiana baterii w obiekcie przeprowadzana jest w praktyce średnio co ok. 2 lata. Przy ilości czujników zainstalowanych w omawianym obiekcie przekraczającej sześćdziesiąt sztuk rodzi to bardzo poważne problemy logistyczne, generuje koszty stałe, a także wiąże się z niekorzystnymi ubocznymi efektami środowiskowymi w postaci generacji

niebezpiecznych chemicznie odpadów bateryjnych. W efekcie opracowanie czujników tego typu zasilanych bezbateryjnie pozwoliłoby wyeliminować potrzebę wymiany baterii i prac serwisowych związanych z tą czynnością.

System BMS CHRONOMATIK™ realizujący zadania poprawy efektywności energetycznej budynku biurowca, w tym wyłączania bądź ograniczania pracy urządzeń systemu HVAC na podstawie danych dotyczących stanu okien zapewnia wymierne oszczędności w konsumpcji energii wykorzystywanej na potrzeby zapewnienia zadanych parametrów środowiskowych wewnątrz pomieszczeń biurowych. Dla realizacji systemu BMS CHRONOMATIK™ wykonanej w biurowcu jednego z wrocławskich zakładów produkcyjnych oszczędności te sięgają ok. 25% w stosunku do konsumpcji energii elektrycznej oraz ciepłej pochodzącej ze spalania gazu ziemnego w kotłowni sprzed zainstalowania systemu BMS CHRONOMATIK™ z wyżej opisaną funkcjonalnością. W świetle przytoczonej we wcześniejszym rozdziale normy dotyczącej oceny jakości automatyzacji i sterowania - EN ISO 52120-1:2022-09E dla budynków niemieszkalnych o charakterze biurowym, wartość poprawy efektywności energetycznej o 25% w systemach wentylacji, ogrzewania i klimatyzacji jest wynikiem „wysokim” biorąc pod uwagę stan pierwotny budynku. Pierwotnie wspomniany budynek posiadał system automatyki zrealizowany na bazie rozproszonego układu sterowników pomieszczeniowych, realizujących sterowanie komfortem cieplnym na poziomie poszczególnych pomieszczeń czyli system automatyzacji i sterowania charakterystyczny dla klasy B przytoczonej normy. Po wdrożeniu systemu BMS CHRONOMATIK™ analizującego stan otwarcia okien system automatyzacji i sterowania został podniesiony do klasy A.

- 9.2 Opis algorytmu sterowania komfortem cieplnym w pomieszczeniu biurowym z wykorzystaniem bezprzewodowych kontaktronów okiennych zasilanych bateryjnie.

Wydaje się, iż z punktu widzenia prezentowanych zagadnień warto również zapoznać Czytelnika dysertacji z algorytmem pracy systemu automatyki budynkowej BMS CHRONOMATIK™ dotyczącym przykładowego zdarzenia jakim jest otwarcie okna (lub okien) przez Użytkownika pomieszczenia biurowego w dzień roboczy.



Rys. 44. Zestaw wykresów przedstawiający zależność pracy systemu grzewczego w biurcu w zależności od temperatury powietrza w pomieszczeniu, zadanej wartości temperatury - ustawionej przez użytkownika oraz stanu otwarcia okna – zbadanego przez bezprzewodowy kontaktron okienny.

Opis pracy algorytmu automatycznego sterowania pracą urządzeń grzewczych i wentylacyjnych zintegrowanych w systemie BMS CHRONOMATIK™ najlepiej zilustrować na podstawie rzeczywistych danych przedstawionych na Rys. 44. wyeksportowanych z danych historycznych systemu BMS CHRONOMATIK™. W oparciu o szereg zdarzeń występujących w pomieszczeniu biurowym w czasie jednego z listopadowych dni 2021 roku zaprezentowano działanie algorytmu sterującego pracą urządzeń grzewczych w zależności od wartości zmierzonej temperatury powietrza wewnątrz pomieszczenia, temperatury zadanej przez Użytkownika oraz stanu otwarcia okna. Zmierzona przez stację pogodową temperatura zewnętrzna w trakcie opisanych zdarzeń oscylowała w zakresie 7,6– 8 °C. Otwarcie okien w pomieszczeniu wpływa przede wszystkim na stopień otwarcia automatycznych przepustnic

VAV (*ang. Variable Air Volume*) regulujących udział powietrza nawiewanego przez centralę wentylacyjną do analizowanego pomieszczenia.

Na wykresie na Rys. 44. zaznaczono 4 okresy charakterystyczne dla analizowanej pracy systemu BMS CHRONOMATIK™:

1. Otwarcie okna przy wysokiej temperaturze wewnątrz pomieszczenia (temperatura zadana 21 °C, temperatura zmierzona wewnątrz pomieszczenia 22°C). Użytkownik w ten sposób obniżył temperaturę pomieszczenia bez konieczności włączenia systemu klimatyzacji w pomieszczeniu.

2. Zamknięcie okna przy wysokiej wartości temperatury zadanej: 21 °C oraz wychłodzonym pomieszczeniu na skutek otwartego wcześniej okna – temperatura w pomieszczeniu spadła do 18,1 °C. W efekcie automatycznie otworzył się zawór na zasilaniu kaloryfera w pomieszczeniu, a temperatura powietrza w pomieszczeniu wzrosła z poziomu 18,1°C do 19,7 °C (dynamiczny przyrost temperatury o ok 1,6 °C w czasie ok. 35 min spowodowany jest pracą kaloryfera konwekcyjnego).

3. W tym punkcie Użytkownik znacząco zmniejszył temperaturę zadaną w pomieszczeniu – zmiana wartości do 16 °C oraz ponownie otworzył okno. Na skutek tego działania zawór na zasilaniu kaloryfera został zamknięty, a wartość temperatury w pomieszczeniu spadła (głównie ze względu na otwarte okno).

4. Przy niskiej temperaturze zadanej przez Użytkownika: 16°C okno zostało ponownie zamknięte. Temperatura w pomieszczeniu na skutek pracy układu wentylacji mechanicznej, a także bezwładności cieplnej konstrukcji budynku, mebli, itp. a także zyskowi energetycznemu generowanemu przez przebywających wewnątrz ludzi, komputery, itp. zaczęła wzrastać bez konieczności używania urządzeń grzewczych.

Konfrontując opisany powyżej algorytm pracy systemu z analogicznym układem automatyki bez monitorowania stan otwarcia okien, na rysunku Rys. 44. przedstawiono szacunkowy czas otwarcia siłownika na zasilaniu grzejnika (niebieski prostokąt). Czas niepotrzebnej pracy układu ogrzewania pomieszczenia biurowego byłby zdecydowanie dłuższy, a w sytuacji niezmnieszenia wartości zadanej temperatury w pomieszczeniu układ automatyki bez integracji kontaktronowych czujników okiennych realizowałby grzanie pomieszczenia także w obszarach wykresu pomiędzy pionowymi osiami między okresami nr 3. i 4. (pomarańczowy prostokąt na wykresie). W efekcie system HVAC skonsumowałby

znacznie większą ilość energii niż przedstawiony system HVAC zarządzany przez system BMS CHRONOMATIK™. Niepotrzebne, zwiększone zużycie energii cieplnej na potrzeby ogrzewania pomieszczenia biurowego byłoby również dodatkowo związane z brakiem redukcji wydatku wentylacji mechanicznej przez układ przepustnic VAV w biurowcu oraz z nieprzerwaną pracą konwekcyjnego grzejnika instalacji CO.

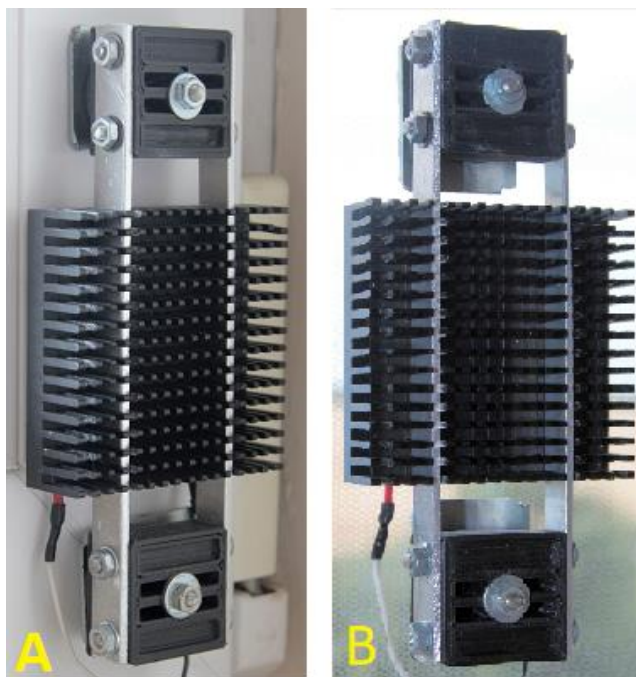
9.3 Wnioski

Przedstawiona analiza pracy instalacji HVAC w oparciu o sygnały pozyskiwane z wykorzystaniem bezprzewodowych kontaktronów okiennych podkreśla wagę i znaczenie tych danych w pracy algorytmów automatyki budynkowej systemu BMS CHRONOMATIK™. Możliwość integracji urządzeń radiowych cechujących się stabilną, odporną na zakłócenia pracą wewnątrz budynków jest rozwiązaniem pozwalającym na poprawę efektywności energetycznej przestrzeni biurowych (i nie tylko) w budynkach wyposażonych w system BMS CHRONOMATIK™. Wspomniana wcześniej wada tego rozwiązania wynikająca z konieczności cyklicznego serwisowania urządzeń zasilanych bateryjnie podczas wymiany ich baterii (szczególnie dająca się we znaki w dużych obiektach) może zostać zatem całkowicie wyeliminowana dzięki opracowaniu harvestera energii cieplnej w pomieszczeniu, w efekcie dostarczając na rynek automatyki budynkowej i BMS innowacyjnego, bezobsługowego rozwiązania opartego o bezprzewodowe kontaktrony okienne zasilane bezbateryjne. W następnej części rozprawy opisane zostały zatem badania skupiające się nad opracowaniem harvestera energii cieplnej instalowanego na szybie okiennej, a także analiza wyników pracy opisanych harvesterów w okresie zimowym.

9.4 Koncepcja harvestera energii cieplnej – bezbateryjne zasilanie bezprzewodowych kontaktronów okiennych.

Podczas badań ukierunkowanych na możliwość realizacji harvestingu energii cieplnej z wykorzystaniem powierzchni szyb okiennych przygotowano układ pomiarowy oparty o swobodnie programowalny sterownik PLC WAGO 750-8212 rozszerzony o moduły funkcyjne: wejść analogowych 0-10 V, wejść temperaturowych (RTD) oraz wyjść cyfrowych 24V DC. Układ umożliwia pomiar wartości temperatur związanych z pozyskiwaniem energii cieplnej przenikającej przez okno: wewnętrznej temperatury powietrza w pomieszczeniu, wewnętrznej temperatury szyby okiennej, wewnętrznej temperatury ramy okiennej, zewnętrznej temperatury powietrza, zewnętrznej temperatury ramy okiennej oraz zewnętrznej temperatury szyby.

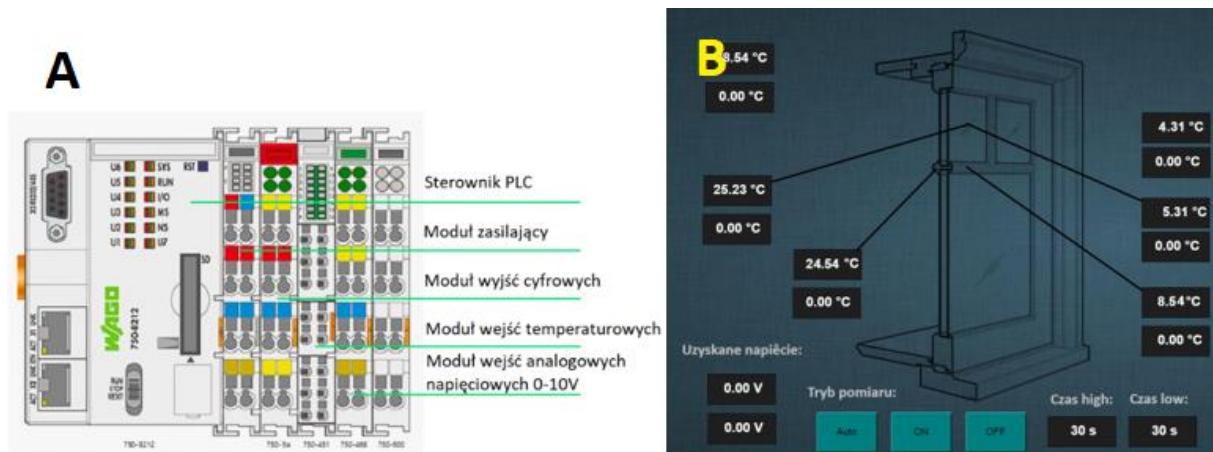
Podstawowym elementem układu pomiarowego jest termostos półprzewodnikowy pracujący w roli termogeneratora. W badaniach wykorzystano ogólnie dostępny model TEC 12710 [92]. Termostos został wyposażony w dedykowane uchwyty umożliwiające bezklejowy i bezkontaktowy (z wykorzystaniem magnesów neodymowych) montaż na szybie okiennej. Sposób montażu przedstawiono na Rys. 45. Do szyby okiennej mocowane są (przy użyciu technicznej taśmy klejącej np. typu VHB) dwie płytki stalowe. Termostos wraz z dociśniętym do niego radiatorem jest następnie silnie dociskany do szyby lub ramy okiennej siłą wytwarzaną przez dwa magnesy neodymowe (o średnicy 20mm), zamocowane na końcach aluminiowo-plastikowych wsporników wciśniętych między żebra radiatora. Wymiary całego uchwytu są dobrane ten sposób, aby pomiędzy płytkami stalowymi, a magnesami w stanie dociśnięcia utworzyła się ok. 1,5 mm szczelina powietrzna. Zapewnia to wymianę ciepła pomiędzy szybą i radiatorem głównie poprzez termostos i minimalizuje transfer ciepła pomiędzy radiatorem a szybą poprzez jego mocowanie. Dzięki temu radiator jest termicznie sprzężony z szybą praktycznie tylko poprzez termostos.



Rys. 45 A) Zdjęcie termogeneratora zamocowanego do ramy okiennej od strony zewnętrznej
B) Zdjęcie termogeneratora zamocowanego do szyby okna od strony wewnętrznej.

Wyprowadzenia elektryczne termogeneratora zabudowanego pomiędzy dwiema powierzchniami o różnych wartościach temperatury (radiator o temperaturze bliskiej temperaturze otoczenia oraz powierzchnia ramy, bądź szyby okna) zostały podłączone do wejścia analogowego w sterowniku PLC (WAGO 750 – 459 wejście analogowe 0-10 V, rozdzielczość 12 bit). W zależności od technologii wykonania badanego okna dla okien wykonanych w technologii PVC układ rozszerzono o precyzyjny wzmacniacz napięciowy o wzmacnieniu $k_u=100$.

Sterownik PLC pracujący w oparciu o środowisko Linux poza bazowym programem PLC realizującym pomiar wartości temperatur oraz wartości uzyskiwanych napięć generowanych przez termogeneratory został rozbudowany w narzędzia zapisujące dane pomiarowe na karcie SD w postaci plików w formacie csv oraz wizualizację stanowiska pomiarowego (dostępną z poziomu przeglądarki WWW w technologii HTML 5) umożliwiającą podgląd wszystkich mierzonych parametrów w czasie rzeczywistym co zilustrowano na Rys. 46.



Rys. 46 A) uproszczony schemat konfiguracji sterownika PLC, B) ekran wizualizacji systemu badającego wydajność napięciową cieplnego harvestera energii.

Z wykorzystaniem opisanego układu pomiarowego zimą 2021 roku przeprowadzono badania z użyciem termogeneratora mocowanego na kilka sposobów (wewnątrz pomieszczenia – stroną bez radiatora do ramy okiennej, stroną bez radiatora do szyby okiennej oraz na zewnątrz budynku stroną bez radiatora do szyby okiennej i stroną bez radiatora do ramy okiennej). Badania prowadzono w budynku typu retrofit wyposażonym w okna drewniane dwuszybowe z lat 80. XX wieku oraz w budynku jednorodzinny wyposażonym w okna współczesne, dwuszybowe z ramą PVC. Wyniki przeprowadzonych badań posłużyły weryfikacji możliwości wykorzystania odpadowej energii cieplnej traconej poprzez budynkowe systemy okienne do bezbateryjnego zasilania bezprzewodowych kontaktronów okiennych.

9.5 Analiza wyników

9.5.1 Efektywność termiczna okna.

Parametrem technicznym pozwalającym na szacunkowe określenie możliwości wykorzystania transferu ciepła przez okno w celu bezbateryjnego zasilania bezprzewodowych urządzeń pomiarowych w systemach BMS jest weryfikacja współczynnika przenikania ciepła U_w dla szyb i ram okiennych. W oparciu o przykładowe pozycje literaturowe [93][94] przyjęto, że dla standardowego okna jednodzielnego wykonanego z kształtowników systemu Aluplast Ideal 2000 EURO przenikalność termiczna szyby zespolonej wynosi $U_g = 1,1$ [W/m²K]. Jest to

przykładowa wartość współczynnika przenikania ciepła przez okno jednak ze względu na dużą powszechność tego typu konstrukcji okien na rynku, dane te przyjęto w dalszych obliczeniach.

Elementem odzyskującym odpadową energię cieplną i przekształcającą ją w energię elektryczną jest termostos TEC 12710, który w wyniku zjawiska Seebecka, przy różnicy temperatur po obu stronach jego obudowy generuje napięcie. W celu zwiększenia różnicy temperatur (a zatem podniesienia sprawności harwestera) termostos został wyposażony w radiator, a na styku termostosu i radiatora zastosowano pastę termoprzewodzącą o dużej przewodności cieplnej. Na podstawie wyżej przedstawionych założeń, wykorzystując termostos TEC-12710 o wymiarach 40mm x 40mm (całkowita powierzchnia jednej strony obudowy termostosu wynosi zatem 0,0016 m²) teoretyczna moc cieplna dostępna do zasilania układu z wykorzystaniem termostosu dla różnicy temperatur równej 20K pomiędzy przegrodą wynosi 35,2 mW. Teoretycznie jest to zatem moc wystarczająca do zasilania opracowanej platformy czujnikowej z łącznością LoRa nawet co 1s.. Oczywiście jest to jednak tylko teoretycznie dostępna energia cieplna. Docelowa moc elektryczna pozyskana z wykorzystaniem termostosu TEC-12710 uwzględniając sprawność energetyczną termostosu oraz uwzględniając konieczność podniesienia uzyskanego napięcia wyjściowego termostosu przynajmniej do wartości 3,3V (wartość wymagana do zasilania przedstawionej platformy czujnikowej) będzie znacznie mniejsza. Zakładając sprawność termostosu na realnym poziomie ok. 1 - 2 % i uwzględniając sprawności ultra niskonapięciowej przetwornicy DC-DC wraz z modułem gromadzenia energii (ok. 40%), rzeczywista moc takiego termoharwestera będzie oscylowała w okolicach 100 - 200 μW. Przyjmując zapotrzebowanie energetyczne platformy czujnikowej na wykonanie pełnego cyklu pomiarowego w granicach 33 mJ, w przedstawionych wyidealizowanych warunkach taki harvester energii cieplnej mógłby zapewnić cykliczną transmisję danych co ok. 5 min. Byłby to zatem okres w zupełności wystarczający z punktu widzenia potrzeb układu zarządzania budynkiem BMS. Natomiast realizując instalację systemów BMS oraz automatyki budynkowej w istniejących, starych budynkach (ze zdecydowanie starszą, bardziej energooszczędną stolarką okienną) szacunkowa wartość przenikalności cieplnej będzie większa, co w konsekwencji przełoży się na większą moc dostępną dla harwestera energii cieplnej i potencjalnie krótszy okres między kolejnymi transmisjami danych. Należy jednak brać pod uwagę, że czujniki kontaktronowe pracują głównie w sposób dorywczy i cykliczność ich pracy w omówionym poprzednio algorytmie sterowania budynkowego systemu BMS jest ograniczona do 12 godzin natomiast

w międzyczasie zwykle odbywa się jeszcze kilka dodatkowych, nieregularnych zadań czujnika w okresie ok. 8 godzin (gdyż pomieszczenia biurowe są zwykle eksploatowane w cyklu jednozmianowym).

9.5.2 Przebieg prowadzonych badań.

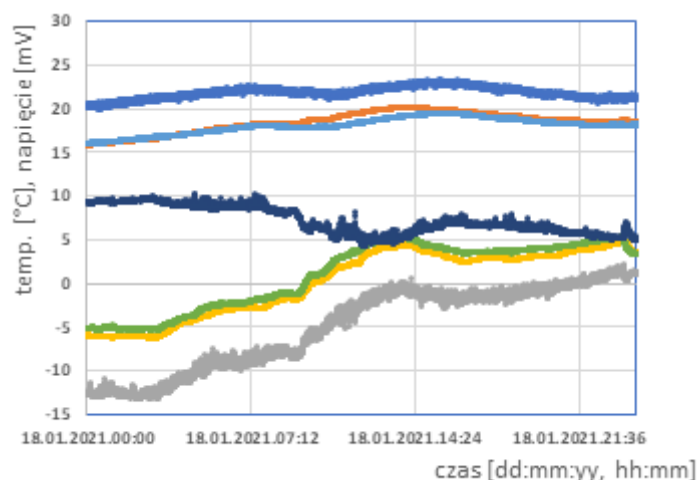
Opisany układ pomiarowy został wykonany w dwóch bliźniaczych egzemplarzach, co pozwoliło prowadzić równoległe pomiary w zbliżonych rzeczywistych warunkach zewnętrznych (pomiary wykonano w styczniu 2021 w miejscowości pod Wrocławiem oraz w centrum Wrocławia tzn. w miejscach oddalonych od siebie o ok. 15 km).

Jednym z obiektów wykorzystywanych podczas badań był dom jednorodzinny wyposażony w stolarkę okienną PVC z dwuszybowym pakietem. Harvester energii cieplnej zainstalowany został na oknie na pierwszym piętrze od strony zachodniej. Harvester został zamocowany do szyby w dolnej części okna przy pomocy pasty termoprzewodzącej dwoma magnesami neodymowymi oddalonymi od przyklejonego do powierzchni okna płaskownika o ok. 2mm, dzięki czemu radiator harvestera nie miał kontaktu termicznego z powierzchnią szyby. Pasta termoprzewodząca pomiędzy szybą a termostosem dodatkowo została wzbogacona domieszką nanorurek węglowych (zabarwienie pasty na czarno), co miało na celu zwiększenie absorpcji promieniowania podczerwonego od strony pomieszczenia w budynku (lub zwiększenie emisyjności strony niskotemperaturowej gdy harvester był zainstalowany wewnątrz pomieszczenia).

Drugi, bliźniaczy układ został zainstalowany w mieszkaniu zlokalizowanym w budynku wielorodzinnym na wewnętrznej stronie okna dwuszybowego starszej generacji (z lat 80' XX w.) o drewnianej konstrukcji ramy. W obu lokalizacjach pomiary realizowano przez ponad miesiąc.

9.5.3 Wyniki badań

Na wykresach na Rys. 47. i Rys. 48. przedstawiono dobowy przebieg mierzonych parametrów dla stanowiska pomiarowego zainstalowanego w domu jednorodzinnym na zewnętrznej stronie typowego dwuszybowego okna z ramą PVC (przenikalność termiczna według dokumentacji $U_g = 1,1$ [W/m²K]). Wykres na Rys. 47. przedstawia zmiany temperatur oraz napięcia w układzie nieobciążonego termostosu zarejestrowane podczas zimowej, mroźnej doby. Minimalna temperatura powietrza zewnętrznego osiągnęła -13 °C natomiast temperatura wewnątrz budynku wynosiła ok. 21 °C, co w efekcie generowało 34 K różnicy temperatur. Przy tak wysokiej różnicy temperatur pomiędzy dwoma stronami przegrody w postaci okna zarejestrowano minimalną temperaturę zewnętrznej powierzchni okna o wartości ok. -6 °C, co przełożyło się na maksymalne zmierzone napięcie wyjściowe nieobciążonego termostosu na poziomie 10,4 mV (w pierwszym okresie nocnym), a minimalne napięcie (w okresie dnia i kolejnego „ciepłego” wieczoru) nie było niższe niż 4,5 mV.

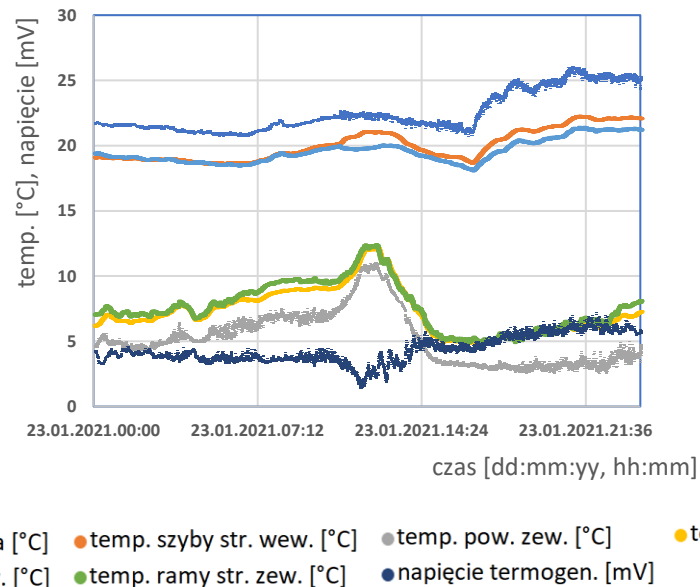


- temp. pomieszczenia [°C]
- temp. szyby str. wew. [°C]
- temp. pow. zew. [°C]
- temp. szyby str. zew. [°C]
- temp. ramy str. wew. [°C]
- temp. ramy str. zew. [°C]
- napięcie termogen. [mV]

Rys. 47. Wartość generowanego napięcia termostosu w zależności od temperatur w mroźną noc - przebieg dobowy 18.01.2021 (lokalizacja pod Wrocławiem). Okno PVC dwuszybowe.

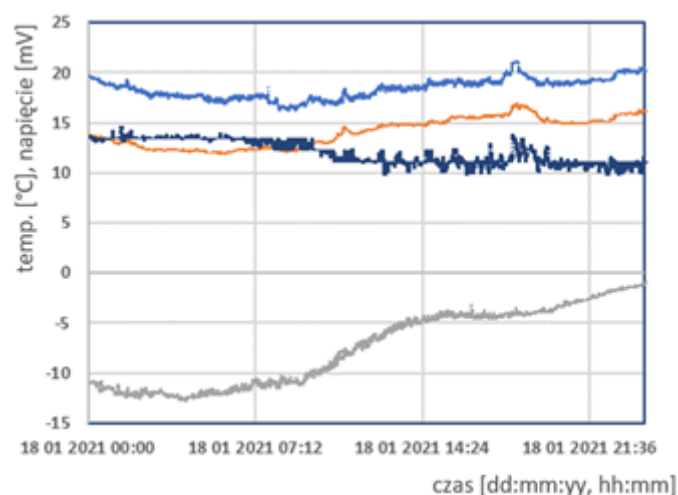
Następny wykres na Rys. 48. przedstawia pomiary zarejestrowane podczas przykładowej „cieplej” zimowej doby w okresie realizacji eksperymentu gdy maksymalna temperatura powietrza zewnętrznego osiągnęła +11°C co przy temperaturze wewnątrz budynku na poziomie 22,4°C przełożyło się na temperaturę zewnętrznej powierzchni szyby okiennej

na poziomie 12,2 °C. Dało to efektywną różnicę temperatur 10,2 K oraz napięcie mierzone na wyjściu nieobciążonego termostosu na poziomie 2,1 mV (najniższa wartość zarejestrowanego napięcia w trakcie doby)



Rys. 48. Wartość generowanego napięcia termostosu w zależności od temperatur w ciepły dzień - przebieg dobowy 23.01.2021 (lokalizacja pod Wrocławiem). Okno PVC dwuszybowe.

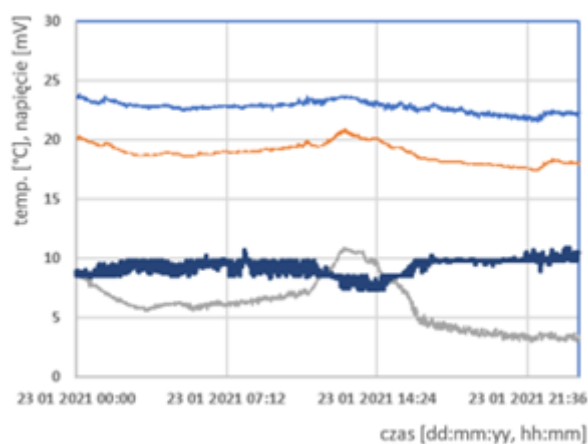
Analogiczne badania wartości generowanego napięcia przeprowadzono dla drugiego obiektu (budynek wielorodzinny z lat 80' XX w.) z harvesterem energii cieplnej zainstalowanym na szybie okiennej (okno z ramą drewnianą) od strony wewnętrznej. Teoretyczna przenikalność okna wykonanego w opisanej technologii według danych z literatury wynosi $U_g = 2,6 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ [95]. Dla najzimniejszego dnia (18.01.021) zarejestrowano najniższą zewnętrzną temperaturę powietrza równą $-12,5 \text{ °C}$ przy temperaturze powietrza wewnątrz budynku $18,3 \text{ °C}$. Różnica temperatur po dwóch stronach przegrody okiennej wynosiła 30,8 K, co odpowiadało wygenerowanemu przez termostos napięciu na poziomie 14,5 mV przy temperaturze wewnętrznej strony szyby $12,9 \text{ °C}$ (dla różnicy temperatur szyba okienna - powietrze w pomieszczeniu 5,4 K). Nie była to jednak wartość najwyższego wygenerowanego napięcia, ponieważ w trakcie doby największe zmierzone napięcie wyniosło 14,8 mV dla różnicy temperatur pomiędzy szybą, a temperaturą powietrza w pomieszczeniu na poziomie 5,7 K osiągniętą dla różnicy temperatur powietrza na zewnątrz i wewnątrz budynku na poziomie 30 K (pomiar przy temperaturze w pomieszczeniu równej $19,3 \text{ °C}$). Wykres z przebiegiem wartości mierzonych temperatur oraz wartości napięcia wyjściowego termogeneratora przedstawiono na wykresie na Rys. 49.



● temp. pomieszczenia [°C] ● temp. szyby str. wew. [°C] ● temp. pow. zew. [°C] ● napięcie termogen. [mV]

Rys. 49. Wartość generowanego napięcia termostosu w zależności od temperatur w mroźną noc - przebieg dobowy 18.01.2021 (Wrocław). Okno drewniane dwuszybowe.

Analogicznie do badań prowadzonych dla okna wykonanego z PVC, dla okna wykonanego w technologii ramy drewnianej na wykresie na Rys. 50. zilustrowano również przebiegi generowanego napięcia w najcieplejszym dniu w badanym okresie (23.01.21). Podczas doby największe zmierzone napięcie osiągnęło wartość 10,86 mV przy różnicy temperatur szyby okiennej w stosunku do temperatury otoczenia na poziomie 4,3 K. Najniższa wartość napięcia mierzonego wyniosła 7,33 mV dla różnicy temperatur 3,1 K.



● temp. pomieszczenia [°C] ● temp. szyby str. wew. [°C] ● temp. pow. zew. [°C] ● napięcie termogen. [mV]

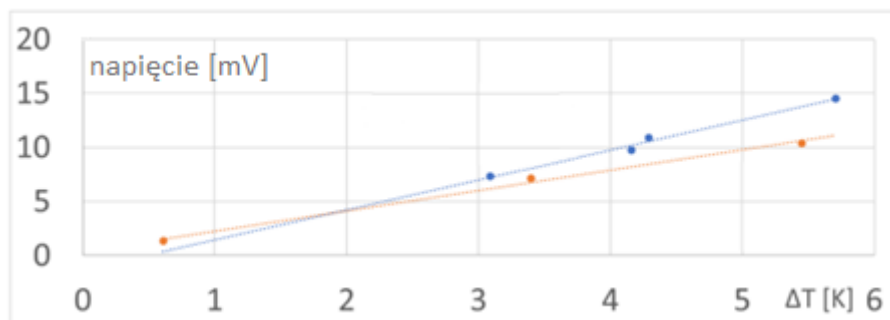
Rys. 50. Wartość generowanego napięcia termostosu w zależności od temperatur w ciepły dzień - przebieg dobowy 23.01.2021 (Wrocław). Okno drewniane dwuszybowe.

W celu ułatwienia analizy uzyskanych danych w tabeli Tabela 3 zebrano największe oraz najmniejsze wartości mierzonego napięcia dla każdego z badanych rodzajów okien w najchłodniejszym (18.01) oraz najcieplejszym (23.01) dniu prowadzonych badań. Wraz z wartościami napięć w tabeli zestawiono również temperatury powierzchni, do których zainstalowano harvestery energii cieplnej oraz temperatury otoczenia, w których harvestery pracowały. W tabeli uwzględniono także wartość różnicy tych temperatur.

Tabela 3. Zestawienie wartości generowanych napięć w zależności od różnicy temperatur powierzchni pracy harvestera względem temperatury powietrza otoczenia

Data	Napięcie termogeneratora [mV]	T1 - Temp. powierzchni kontaktu termogeneratora [°C]	T2 - Temp. otoczenia pracy termogeneratora [°C]	Wartość różnicy temperatur T1-T2 [K]
okno współczesne wykonane w technologii PVC (harvester po stronie zewnętrznej okna)				
18.01 (najchłodniejsza chwila dnia)	10,4	-4,05	-9,5	5,45
18.01 (najcieplejsza chwila dnia)	4,39	3,1	-2,14	5,24
23.01 (najchłodniejsza chwila dnia)	7,15	6,15	2,75	3,4
23.01 (najcieplejsza chwila dnia)	1,37	11,32	10,71	0,61
okno z lat 80' XX w. wykonane w technologii drewnianej (harvester po stronie wewnętrznej okna)				
18.01 (najchłodniejsza chwila dnia)	14,53	13,1	18,81	5,71
18.01 (najcieplejsza chwila dnia)	9,77	15,17	19,33	4,16
23.01 (najchłodniejsza chwila dnia)	10,86	18,06	22,35	4,29
23.01 (najcieplejsza chwila dnia)	7,33	20,14	23,23	3,09

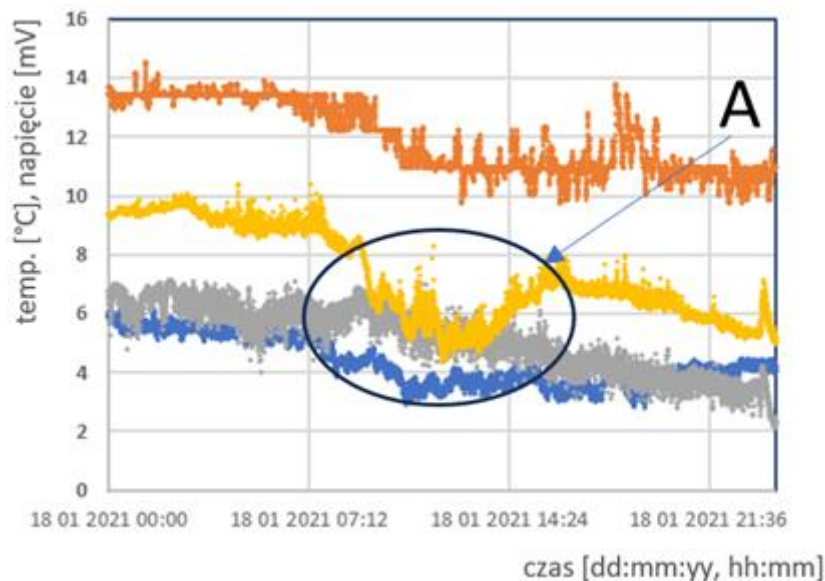
Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono zależność napięcia generowanego przez termostos w funkcji różnicy temperatur, co zilustrowano na wykresie na Rys. 51. Dla pomiarów dotyczących okna wykonanego w technologii PVC usunięto pomiar wartości minimalnej napięcia z dnia 18.01 ponieważ wartość ta znacząco odbiegała od linii trendu. Najprawdopodobniej spowodowane było to przejściowym oświetleniem radiatora termostosu przez promienie słoneczne, w efekcie czego zarejestrowano dynamiczny wzrost różnicy temperatury powierzchni okna. Okno starszego typu pozwala na uzyskanie wyższych napięć wyjściowych termostosu przy jednostkowej różnicy temperatur i jest to spowodowane jego odmiennymi parametrami termicznymi (np. inna impedancja termiczna na styku szyba-ceramika podłoża termostosu). Dokładniejsza analiza tego zagadnienia wykracza jednak poza ramy prezentowanej pracy doktorskiej.



- okno drewniane nap. termogen. [mV]
- okno PVC nap. termogen. [mV]

Rys. 51. Porównanie pomiarów generowanego napięcia przez termostos w funkcji różnicy temperatury (temperatura powierzchni przylegającej do obudowy termostatu i temperatury otoczenia).

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów na wykresie na Rys. 52. zestawiono dla badanych harvesterów energii cieplnej przebiegi wartości napięcia dla obu stanowisk pomiarowych z naniesioną wynikową wartością różnicy temperatur pracy (wartość różnicy temperatury powierzchni okna i temperatury powietrza otaczającego radiator harvestera).



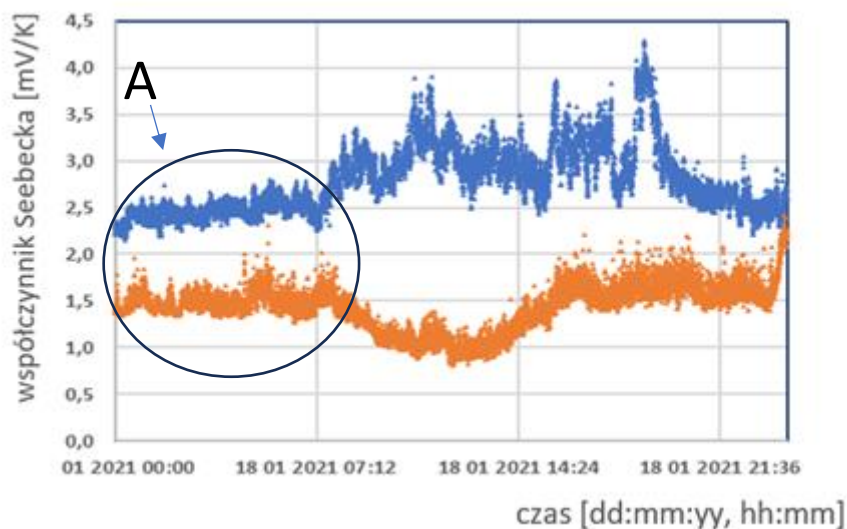
- okno drewniane różn. temp. [K] ● okno drewniane wartość gen. napięcia [mV]
- okno PVC różnica temp [K] ● okno PVC wartość gen. napięcia [mV]

Rys. 52. Porównanie uzyskanego napięcia termostosu w zależności od różnic temperatur (temperatura powietrza otoczenia - temperatura powierzchni szyby okna).

Na podstawie przebiegu wartości generowanego napięcia przez harvester energii cieplnej zainstalowany na oknie o konstrukcji drewnianej zauważono liniową zależność pomiędzy wartością różnicy temperatur (temperatura powierzchni – temperatura otoczenia), a wartością otrzymywanego napięcia. Natomiast na przebiegu wartości generowanego napięcia harvestera energii cieplnej zainstalowanego na oknie wykonanym w technologii PVC, w godzinach słonecznych trwania doby [punkt A na Rys. 52] (godz. 8 - 14) widoczny jest znaczący spadek sprawności (spadek wartości generowanego napięcia) harvestera pomimo stałej różnicy temperatur. Przyczyną tego zjawiska jest prawdopodobnie wspomniana już absorpcja promieniowania słonecznego, na skutek czego nastąpił wzrost temperatury radiatora bez zauważalnego wzrostu temperatury przezroczystej szyby. Po okresie słonecznej części dnia nawet przy spadku różnicy temperatury wartość generowanego napięcia dynamicznie wzrasta, zbieżnie z liniową charakterystyką przedstawioną na wykresie na Rys. 51. Zjawisko to (niekorzystne w okresach zimowych), mogłoby zwiększyć sprawność termogeneratora pracującego w przedstawiony sposób w okresach letnich (gdy wartość zewnętrznej temperatury powietrza jest większa od wartości wewnętrznej temperatury powietrza w pomieszczeniu).

Istotnym wnioskiem wynikającym z analizy przebiegów zestawionych na wykresie na Rys. 52. jest znacznie większa efektywność (o około 40 %) harvestera zainstalowanego wewnątrz budynku (to znaczy na wewnętrznej stronie okna). Harvester zainstalowany na wewnętrznej stronie okna wykonanego w technologii drewnianej ze względu na charakter konstrukcji instalacji grzewczej w budynku z lat 80' XX w. znajdował się dodatkowo bezpośrednio nad żeliwnym kaloryferem. Obecność kaloryfera bezpośrednio pod oknem generowała konwekcyjny ruch powietrza, w efekcie znacząco podnosząc sprawność wymiany ciepła przez radiator zainstalowany na „cieplej” stronie termostosu. Zjawisko to było dodatkowo potęgowane przez wysoką temperaturę grzejnika wynikającą z parametru zasilania instalacji CO (badania prowadzono nawet przy temperaturze zewnętrznej $-12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, co skutkowało wysoką temperaturą czynnika zasilającego kaloryfer).

Na wykresie na Rys. 53. dla obu stanowisk pomiarowych przedstawiono wartość współczynnika napięciowo-temperaturowego czyli zależność wartości generowanego napięcia od różnicy temperatur obu powierzchni harvestera energii cieplnej w budynku (o analogicznej do współczynnika Seebecka jednostce). Widoczne na Rys. 53. zależności zmieniają się znacząco w cyklu dobowym. Dla harvestera zainstalowanego na oknie o konstrukcji drewnianej wahania tego współczynnika wynoszą od $2,15\text{ mV/K}$ do $4,28\text{ mV/K}$, natomiast dla harvestera pracującego na oknie wykonanym w technologii PVC współczynnik ten oscyluje pomiędzy wartościami $0,82\text{ mV/K}$, a $2,42\text{ mV/K}$. Zmienność wartości współczynników w cyklu dobowym wskazuje, że podczas prowadzonych badań oprócz zależności generowanego napięcia od różnicy temperatur w warunkach rzeczywistych występuje szereg innych czynników wpływających na zmienną efektywność energetyczną harvestarów energii cieplnej badanych w obu stanowiskach pomiarowych (między innymi wartości średniej temperatury termostosu oraz zmiany konwekcji w otoczeniu radiatora).



- okno drewniane wartość wsp. Seebeck'a [mV/K]
- okno PVC wartość wsp. Seebeck'a [mV/K]

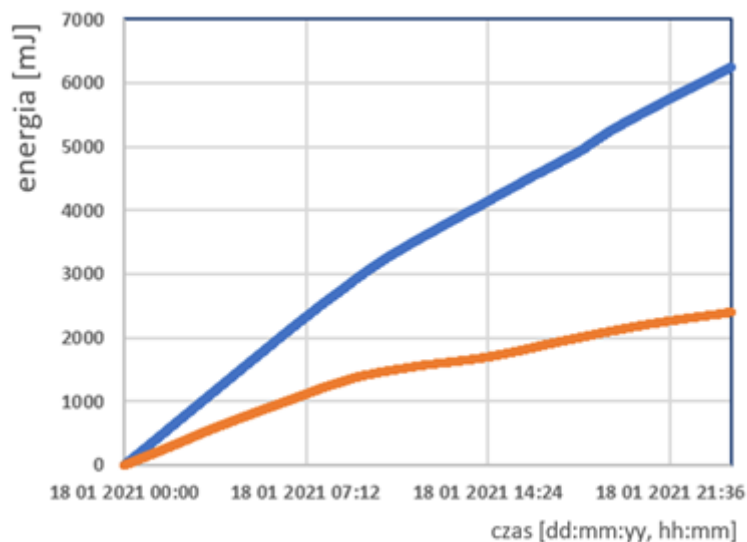
Rys. 53. Przebieg wartości współczynnika napięciowo-temperaturowego testowanych termogeneratorów.

Podczas pracy harvestera energii cieplnej zainstalowanego na zewnątrz budynku znaczący spadek wartości współczynnika napięciowo-temperaturowego ma również związek z absorpcją promieniowania termicznego przez radiator w trakcie trwania słonecznych godzin doby tzn. w godzinach 8 – 14 (w styczniu). Oświetlenie słoneczne powoduje ogrzanie radiatora, a zatem zmniejszenie różnicy temperatur pomiędzy powierzchniami pracy termogeneratora.

Dla harvestera zainstalowanego wewnątrz pomieszczenia zmiany wyznaczonego współczynnika napięciowo-temperaturowego w trakcie doby są bardziej chaotyczne. Ze względu na wewnątrzbudynkowe położenie harvestera energii cieplnej, zmiana jego efektywności jest bezpośrednio związana z aktywnością osób przebywających w budynku, generujących zwiększony ruch powietrza, przekładający się na chwilowe dynamiczne zmiany wymiany ciepłej otoczenia z radiatorem. Dynamiczne zmiany temperatury powietrza wewnątrz pomieszczenia spowodowane są np. przygotowaniem posiłków czy też inną aktywnością osób przebywających w pomieszczeniu. Zależność ta jest spowodowana dużą bezwładnością termiczną szyby (o dużej pojemność cieplnej) w stosunku do małej bezwładności termicznej radiatora (o małej pojemność cieplnej), co w efekcie przyczynia się do dynamicznych, krótkotrwałych wzrostów efektywności takiego harvestera energii cieplnej.

Wnioski te można poprzeć kształtem przebiegu w godzinach nocnych [punkt A na Rys. 53.], podczas których w pomieszczeniu nie przebywały żadne osoby, a podczas których wartość amplitud oscylacji współczynnika napięciowo-temperaturowego były zdecydowanie mniejsze. Opisane dynamiczne zmiany współczynnika, wskazujące na chwilowy wzrost efektywności energetycznej harwestera energii cieplnej są jednak zjawiskami pożądanymi.

Na podstawie badań przeprowadzonych w dniu 18 stycznia dokonano także szacunkowej analizy mocy badanych harvesterów energii cieplnej przy obciążeniu termostosu rezystancją 1Ω . Wartość rezystancji obciążenia 1Ω wynika bezpośrednio z wartości rezystancji wewnętrznej termostosu. Zgodnie z dokumentacją techniczną badanego ogniwa [TEC - 12710] wartość rezystancji wewnętrznej równej 1Ω dotyczy pracy ogniwa w średniej temperaturze 12°C . Ponadto uwzględniono, że przy obciążeniu termostosu rezystancją równą wartości rezystancji wewnętrznej termostosu następuje spadek napięcia generowanego przez termostos o połowę (termostos zachowuje się jak nieidealne źródło napięciowe o rezystancji wewnętrznej 1Ω). Na podstawie szacunków generowanej mocy dla dobowych przebiegów pracy obu harvesterów energii cieplnej wyznaczono krzywe przyrostu generowanej przez nie energii, które zilustrowano na wykresie na Rys. 54. W rezultacie oszacowano, że dla harwestera zainstalowanego po stronie zewnętrznej okna z ramą PVC łączna pozyskana energia dla przebiegu dobowego wyniosłaby ok. $2,3 \text{ J}$ natomiast dla harwestera zainstalowanego po stronie wewnętrznej na oknie o drewnianej konstrukcji ramy łączna pozyskana wartość energii dla przebiegu dobowego dochodziłaby do ok. $8,6 \text{ J}$. Biorąc ponownie pod uwagę ilość energii wymaganej przez wspomnianą na wstępie bezprzewodową platformę czujnikową LoRa do wykonania 1 cyklu pomiarowego i przesyłania danych pomiarowych (ok. 33 mJ) oraz uwzględniając sprawność niezbędnej w tym przypadku ultraniskonapięciowej przetwornicy DC-DC (na poziomie ok. 40%) dobową produkcję energii przez omawiane harvestery wystarczyłoby hipotetycznie na od 27 do 104 cykli pracy platformy czujnikowej LoRa.



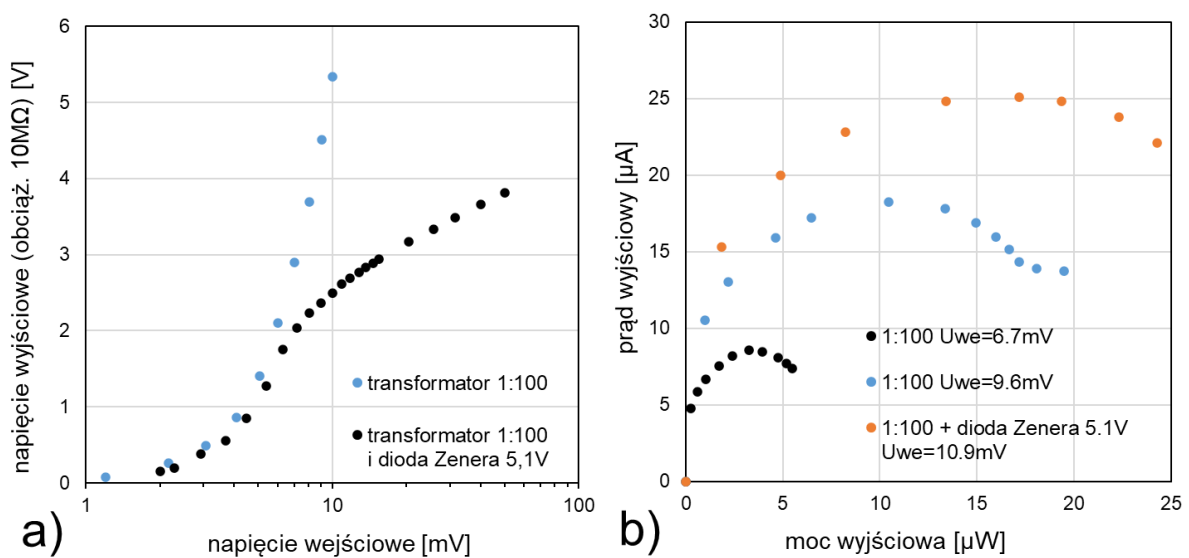
- okno drewniane zgromadzona energia [mJ]
- okno PVC zgromadzona energia [mJ]

Rys. 54. Porównanie szacunkowego przyrostu energii dla harvesterów na oknie drewnianym oraz PVC w dniu 18.01 (dla zbliżonych warunków środowiskowych); przyjęto rezystancję obciążenia równą rezystancji wewnętrznej termostosu równej 1Ω .

Z zaprezentowanych danych pomiarowych wynika, że harvestery czerpiące odpadową energię ciepłą z okien są w stanie wygenerować napięcia od 2 mV do ponad 10 mV w zależności od pogody i przewodności cieplnej okna. Tak niskie napięcia wyjściowe termogeneratorów jednak uniemożliwiają ich bezpośrednie wykorzystanie do zasilania platform czujnikowych LoRa. Również praktycznie żadna z dostępnych na rynku ultraniskonapięciowych przetwornic DC-DC nie jest w stanie współpracować ze źródłem o tak niskim napięciu (np. układ LTC 3108 katalogowo wymaga napięcia wejściowego co najmniej 20 mV, układ ADP5091 co najmniej 80 mV a układ AEM30940 50 mV przy czym te dwa ostatnie układy do „zimnego” startu wymagają co najmniej 380 mV).

W dalszych badaniach zweryfikowano zatem możliwość użycia harvesterów energii cieplnej traconej poprzez okna do zasilania platform czujnikowych z wykorzystaniem ultraniskonapięciowej przetwornicy DC-DC typu EM8900 [96]. Na wykresie na Rys. 55 zilustrowano wyniki wstępnych pomiarów przeprowadzonych dla tej przetwornicy współpracującej z miniaturowym transformatorem 1:100 (LPR6235-752SMR, produkcji Coilcraft) oraz z transformatorem 1:100 i diodą Zenera 5,1V podłączoną na wyjściu przetwornicy (diodę tą zastosowano w celu pasywnego zabezpieczenia przetwornicy przed nadmiernym wzrostem jej napięcia wyjściowego gdyż nie posiada ona takiego ograniczenia, a jej maksymalne napięcie wyjściowe – zgodnie z danymi katalogowymi - nie powinno

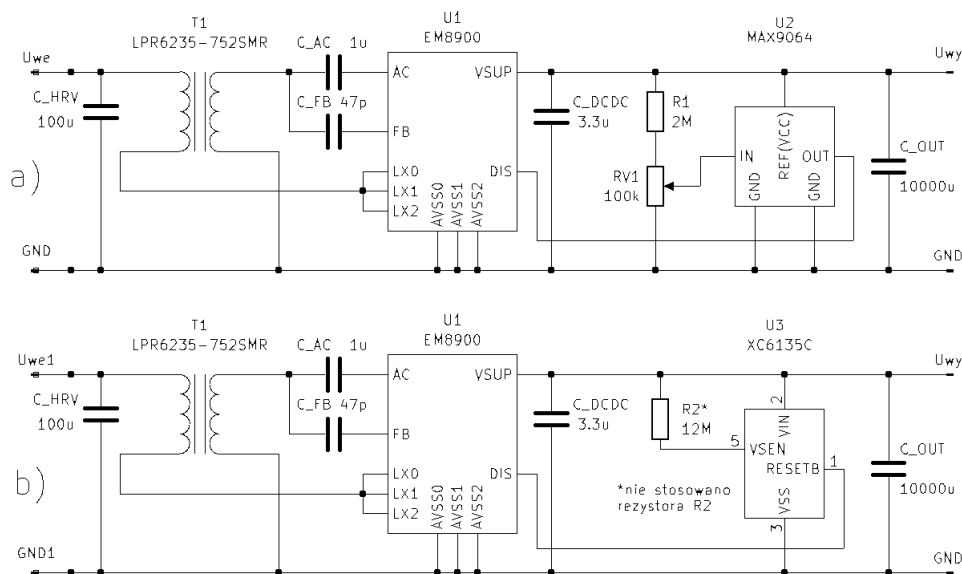
przekraczać 4,3V). Pomiary zilustrowane na Rys. 55a polegały na pomiarze jałowego napięcia wyjściowego przetwornicy obciążonej tylko rezystancją wewnętrzną woltomierza cyfrowego (ok. 10 MΩ). Jak widać, przetwornica ta rozpoczyna działanie już nawet od napięć wejściowych niższych niż 2 mV, jednak w tych warunkach jej napięcie wyjściowe jest zbyt niskie do bezpośredniego zasilania platform czujnikowych. Dopiero napięcia wejściowe >7,5 mV (w konfiguracji z transformatorem 1:100) i >11,5 mV (dla transformatora 1:100 i diody Zenera) pozwalają na uzyskanie napięcia wyjściowego 3,3 V tzn. wystarczającego do zasilania platformy czujnikowej LoRa. W konfiguracji z transformatorem 1:100 dla napięcia wejściowego 6,7 mV przetwornica dla prądu wyjściowego ok. 3,2 μA uzyskała maksymalną moc wyjściową ok. 8,5 μW a wzrost napięcia wejściowego przełożył się zarówno na wzrost mocy jaki i prądu wyjściowego (również w układzie z diodowym ogranicznikiem napięcia wyjściowego) co zilustrowano na Rys. 55Rys. 3b. A zatem przetwornica ta musi współpracować nie tylko z dodatkowym układem gromadzenia i zarządzania energią, ale również z aktywnym układem ograniczania napięcia wyjściowego (gdyż prosty pasywny układ z diodą Zenera nawet dla kilkumiliwoltowych napięć wejściowych zużywa zbyt dużo cennej energii).



Rys. 55. Wstępne charakterystyki modelu ultraniskonapięciowej przetwornicy DC-DC EM8900.

Ze względu na obiecujące wyniki wstępne podjęto dalsze badania nad zastosowaniem ultraniskonapięciowej przetwornicy EM8900 w układzie do harvestingu energii cieplnej traconej przez szyby okienne. Pomiary prowadzono w układach o schematach pokazanych na Rys. 56a) i b) (oznaczenia zastosowane na tych schematach są zgodne z oznaczeniami z kart katalogowych użytych układów scalonych). Tak jak poprzednio zastosowano transformator

1:100 typu LPR6235-752SMR a pojemność sprzęgającą $C_{AC} = 1 \mu\text{F}$, pojemność obwodu sprzężenia zwrotnego $C_{FB} = 47 \text{ pF}$, pojemność wejściową $C_{HRV} = 100 \mu\text{F}$ i wyjściową $C_{DCDC} = 3.3 \mu\text{F}$ dobrano na podstawie danych katalogowych układu EM8900. W niektórych pomiarach zastosowano również dodatkową pojemność wyjściową $C_{OUT} = 10000 \mu\text{F}$. Przetestowano dwa rodzaje aktywnych układów nadzorczych ograniczających napięcie wyjściowe przetwornicy, wykorzystując w tym celu wejście DIS układu EM8900 (gdy DIS=1 pompa ładunkowa układu EM8900 wyłącza się i układ zaprzestaje transferu energii z wejścia AC na wyjście VSUP, gdy DIS=0 układ EM8900 pracuje). W pierwszym rozwiązaniu (Rys. 56a) zastosowano ultraniskomocowy komparator MAX9064 (produkcji Maxim) z wbudowanym źródłem napięcia referencyjnego 0,2V współpracujący z regulowanym wysokoomowym dzielnikiem napięcia umożliwiającym płynną regulację maksymalnego napięcia wyjściowego przetwornicy. Natomiast w drugim rozwiązaniu (Rys. 56b) użyto ultraniskomocowego komparatora XC6156C31 (produkcji Torex) o ustalonym napięciu progowym 3,1V (niestety ze względów logistycznych układ ten był dostępny tylko z napięciem progowym o takiej wartości).

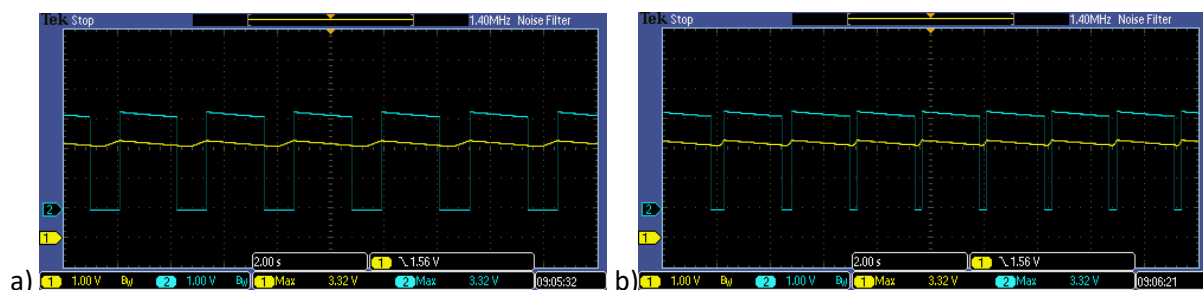


Rys. 56. Schematy ultraniskonapięciowych przetwornic dc-dc boost EM8900 z wyjściowym podukładem nadzorczym na bazie komparatora: a) MAX9064, b) XC6136C31.

Szacowany (na podstawie kart katalogowych) pobór prądu przez układ nadzorczy dla napięć wyjściowych w zakresie 3,1-4,3V w rozwiązaniu z komparatorem MAX9064 wynosi ok. 2,5 μA (prąd zasilania układu MAX9064 to ok. 0,5 μA a prąd upływu dzielnika $R1+RV1$ to ok. 2,0 μA). Natomiast dla wersji z komparatorem XC6135C31 jego prąd zasilania to zaledwie ok. 50-150 nA (czyli ponad 16 razy mniej niż dla układu z MAX9064) – rozwiązanie to pozwala

na zaoszczędzenie ponad 2 μA prądu co jest pożądane ze względu na konieczność zasilania układu nadzorczego bezpośrednio z wyjścia przetwornicy EM8900. Biorąc pod uwagę budowę wewnętrzną komparatora XC6135C31 w układzie nadzorczym z Rys. 56b można dodatkowo zastosować rezystor szeregowy R2 umożliwiający zmianę napięcia progowego komparacji. Dla typowej katalogowej wartości R_{SENSE} (czyli całkowitej rezystancji wejścia VSEN) równej dla układu XC6136C31 34M dla R2=12M napięcie progowe wzrosłoby z wartości katalogowej 3,1V do 4,2V. Podczas testów jednak nie stosowano tego rozwiązania ze względu na brak informacji o jego wpływie na szerokość histerezy przełączania komparatora i jego stabilność.

Na Rys. 57 pokazano efekt działania układu nadzorczego zbudowanego na bazie komparatora XC6135C31 dla dwóch wartości napięć wejściowych $U_{\text{we}} = 9,0 \text{ mV}$ (Rys. 57a) i 12.1 mV (Rys. 57b).

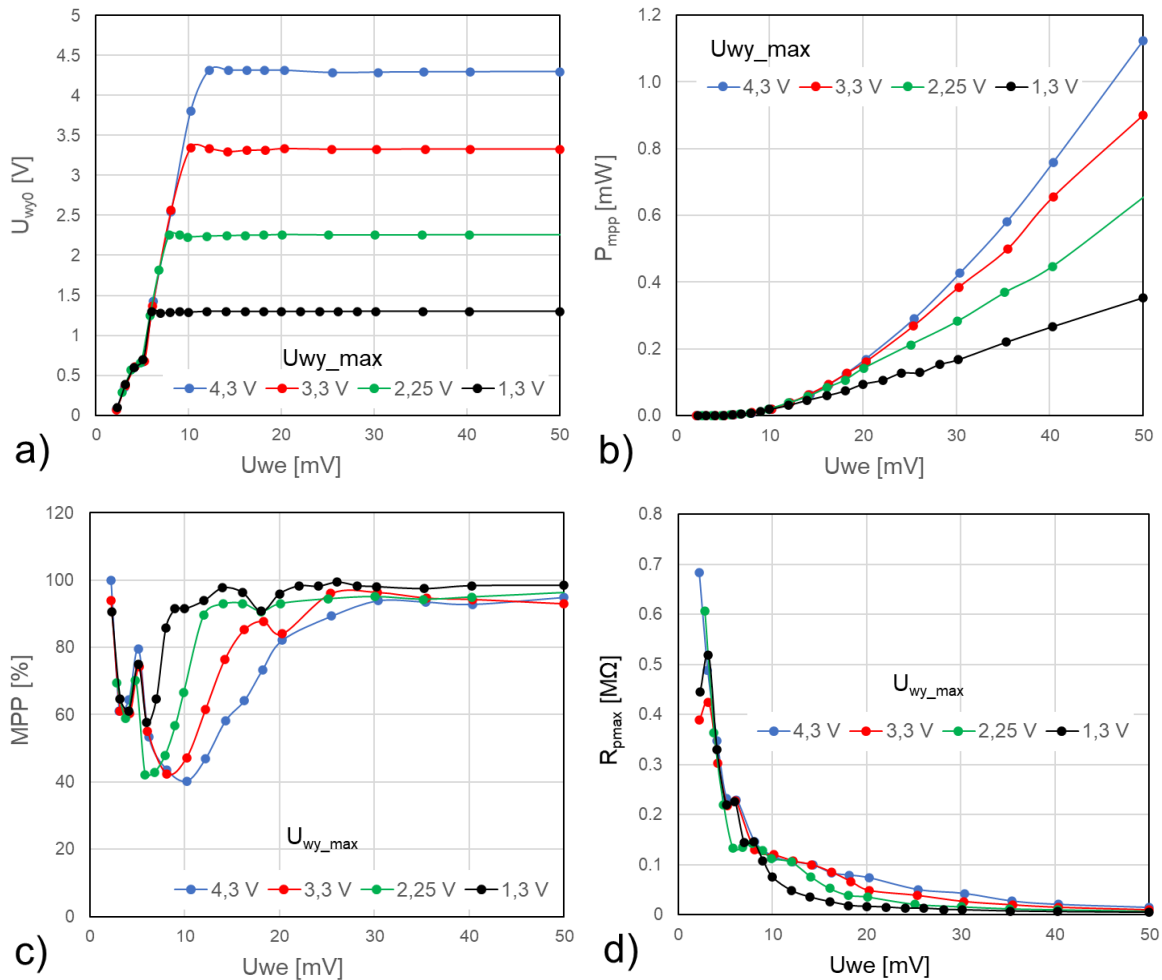


Rys. 57 Przebieg napięcia wyjściowego U_{wy} (ślad żółty) i sygnału DIS (ślad niebieski) ultraniskonapięciowej przetwornicy EM8900 z podukładem nadzorczym z komparatorem XC6136C31 dla napięcia wejściowego U_{we} : a) $9,0 \text{ mV}$, b) 12.1 mV .

Dopóki napięcie U_{wy} jest niższe od napięcia progowego powiększonego o histerezę komparatora XC6136C31 sygnał DIS ma wartość logiczną 0 (napięcie bliskie 0 V). Przekroczenie przez napięcie U_{wy} napięcia progowego powiększonego o histerezę powoduje ustawienie sygnału DIS w wysoki stan logiczny (ze względu na zasilanie układu XC6135C31 napięciem U_{wy} napięcie stanu wysokiego jest bliskie U_{wy}) i wyłączenie przetwornicy EM8900. Powoduje to powolny spadek napięcia U_{wy} (wywołany prądem upływu kondensatora wyjściowego C_DCDC dla nieobciążonej przetwornicy) aż do wartości napięcia progowego komparatora co powoduje ustawienie sygnału DIS w stan niski, włączenie przetwornicy EM8900 i powtórzenie cyklu. Międzyszczytowa wartość wahań napięcia U_{wy} w takim trybie pracy układu powinna być równa histerezie napięcia progowego komparatora, która dla układu XC6135C31 wynosi typowo 5% napięcia progowego, czyli ok. 155mV. Międzyszczytowa wartość wahań napięcia U_{wy} pokazana na Rys. 57 wynosi ok. 200mV i jest wyższa od wartości katalogowej

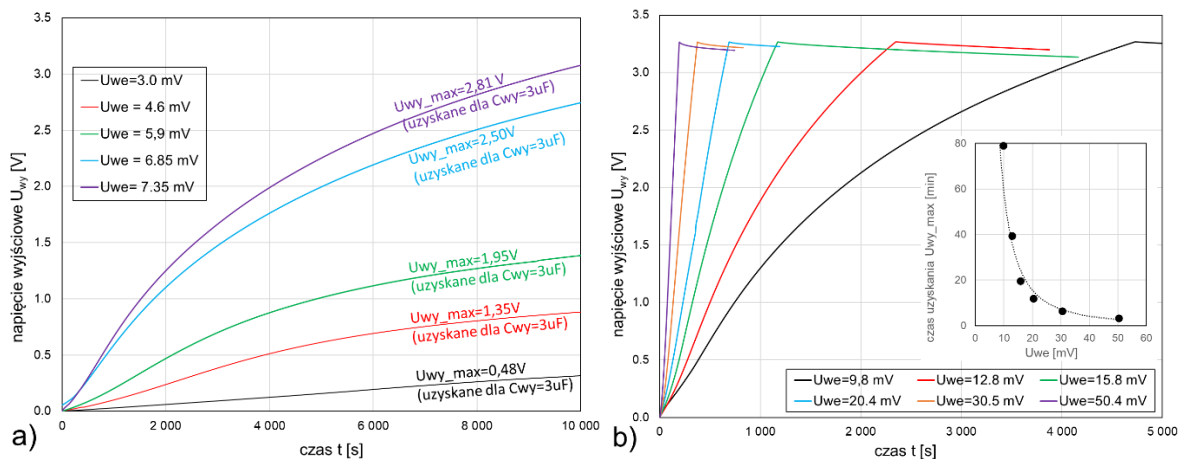
prawdopodobnie ze względu na rozrzut produkcyjny układów. Jak widać, zwiększenie napięcia wejściowego U_{we} powoduje zwiększenie szybkości narostu napięcia U_{wy} (poprzez zwiększenie prądu wyjściowego ładującego pojemność wyjściową), a tym samym skrócenie okresów aktywnej pracy układu EM8900. Działanie przetwornicy z podukładem nadzorczym z komparatorem MAX9064 jest podobne.

Na Rys. 58. pokazano charakterystyki wyjściowe przetwornicy EM8900 z komparatorem MAX9064 (obciążonej tylko małą pojemnością $C_{DCDC}=3\ \mu\text{F}$) dla kilku wybranych maksymalnych wartości napięcia wyjściowego U_{wy_max} (1,3; 2,25; 3,3 oraz 4,3V) w zakresie napięć wejściowych U_{we} 2-50 mV. Charakterystyki te uzyskano przy użyciu precyzyjnego źródła-obciążenia napięciowo-prądowego Keithley 6430. Jak widać na Rys. 58a. pełne napięcia wyjściowe w stanie jałowym U_{wy_0} uzyskiwane jest już dla progowych napięć wejściowych U_{we} poniżej 12 mV przy czym ta wartość progowa zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem ustalonego maksymalnego napięcia wyjściowego i dla $U_{wy_max}=1,3\ \text{V}$ wynosi ok. 5,5 mV. Maksymalna moc wyjściowa przetwornicy P_{mpp} , zilustrowana na Rys. 58b rośnie nieliniowo zarówno wraz ze wzrostem napięcia U_{we} jak i U_{wy_max} i może przekraczać 1 mW, przy czym dla napięć wejściowych poniżej 10 mV jest mniejsza niż 20 μW . Punkt mocy maksymalnej MPP, zilustrowany na Rys. 58c również zależy niemonotonicznie i nieliniowo od napięcia U_{we} i U_{wy_max} . Warto zwrócić uwagę, że w zakresie niskich napięć wejściowych wartość MPP najpierw szybko spada do ok. 40% dla $U_{we} < 10\ \text{mV}$ by następnie wolno wzrosnąć do 93-98% dla $U_{we} > 30\ \text{mV}$. Ze względu na brak w przetwornicy EM8900 układu MPPT (*ang. maximum power point tracking*) wartość MPP jest niestety silnie zmienna co wpływa również na optymalną wartość rezystancji obciążenia R_{pmax} , zapewniająca pracę przetwornicy w punkcie MPP, co z kolei zilustrowano na Rys. 58d. Jak widać, wraz ze wzrostem U_{we} wartość R_{pmax} spada hiperbolicznie i dla niskich napięć wejściowych $U_{we} < 10\ \text{mV}$ R_{pmax} jest generalnie większe niż 100 k Ω co oznacza, że maksymalny prąd wyjściowy przetwornicy w tym zakresie napięć wejściowych powinien być utrzymywany na poziomie dziesiątek μA w celu zapewnienia jak najwyższej jej sprawności. Dla przetwornicy z komparatorem XC6135C31 charakterystyki te są podobne z tą różnicą, że maksymalne napięcie wyjściowe (średnio 3,24 V) jest uzyskiwane już dla $U_{we}=8,4\ \text{mV}$, a uzyskiwana moc wyjściowa jest wyższa (ok. 24 μW dla $U_{we}=10\ \text{mV}$) dzięki mniejszym stratom w obwodzie nadzorczym.



Rys. 58. Charakterystyki wyjściowe przetwornicy EM8900 z układem nadzorczym z komparatorem MAX9064.

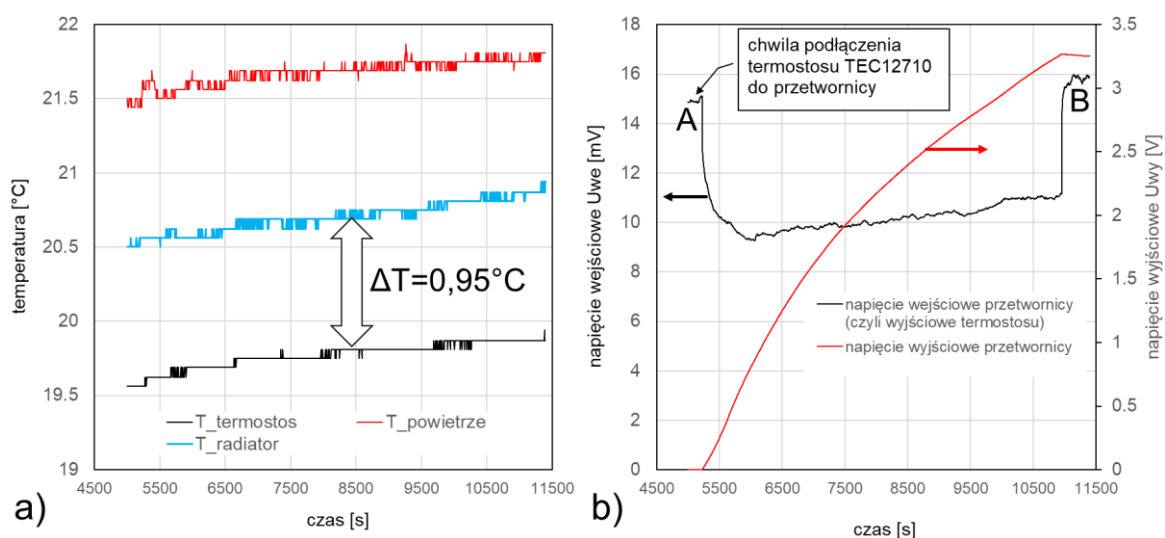
Na Rys. 59 zilustrowano szybkość zmian napięcia wyjściowego przetwornicy z układem nadzorczym na bazie komparatora XC6135C31 obciążonej dużą pojemnością $C_{out}=10000 \mu F$. Wykresy te dla czytelności rozdzielono dla napięć wejściowych niższych od 9,8 mV, które nie pozwalają na uzyskanie pełnego napięcia wyjściowego ($U_{wy_max}=3.24$ V), natomiast dla napięcia $U_{we}=9,8$ mV i dla wyższych napięć wejściowych pełne napięcie wyjściowe jest uzyskiwane w czasie od ok. 1,5 godziny (dla $U_{we}=9,8$ mV) do nawet ok. 3,5 min (dla $U_{we}=50$ mV). Należy również zwrócić uwagę, że czas ten wykładniczo skraca się wraz ze wzrostem napięcia wejściowego, co zilustrowano na wstawce na Rys. 59b.



Rys. 59 Szybkość zmian napięcia wyjściowego przetwornicy EM8900 z układem nadzorczym z komparatorem XC6135C31 obciążonej dużą pojemnością Cout=10000 μ F.

Przeprowadzono również testy współpracy przetwornicy EM8900 z komparatorem XC6135C31 zasilanej wprost z termostosu TEC12710 umieszczonego na symulowanej powierzchni szyby okiennej o temperaturze niższej niż otaczające ją powietrze (powierzchnię szyby symulowano przy pomocy układu pomiarowego z chłodzącym elementem Peltiera, opisanego dokładniej w rozdziale 11). Termostos wyposażono w radiator typu ICK PDA 21x21 (produkcji Fisher Elektronik) rezystancji termicznej 7,6 K/W (przy naturalnym chłodzeniu konwekcyjnym) i zamocowano do chłodzonej powierzchni przy pomocy uchwytu magnetycznego w sposób analogiczny do pokazanego na Rys. 45. Doświadczenie to odwzorowało zatem pracę termoharwestera na wewnętrznej powierzchni szyby okiennej przy temperaturze zewnętrznej niższej od temperatury wewnętrznej przy naturalnym, nie wymuszonym konwekcyjnym ogrzewaniu stronu „cieplej” (wnętrzowej) termoharwestera. Na Rys. 60a zilustrowano przykładowe przebiegi temperatur strony „zimnej” $T_{\text{termostos}}$ i „cieplej” T_{radiator} termostosu (czyli strony symulowanej „szyby” i strony radiatora) oraz powietrza w otoczeniu termostosu po ich ustabilizowaniu natomiast na Rys. 60b pokazano odpowiadające im zmiany napięcia wejściowego U_{we} (czyli napięcia wyjściowego termostosu – krzywa czarna) i wyjściowego U_{wy} przetwornicy (krzywa czerwona). Dla średniej temperatury powietrza wewnątrz pomieszczenia ok. 21,4°C i temperatury symulowanej „szyby” 19,6°C uzyskano różnicę temperatur między stroną „cieplą” i „zimną” termostosu o wartości 0,95°C. Pozwoliło to na uzyskanie napięcia wejściowego termostosu w stanie jałowym 14,5 mV, które po obciążeniu termostosu przetwornicą spadło do średniej wartości ok. 10 mV. Przy takim napięciu wejściowym przetwornica uzyskała na swoim wyjściu maksymalne napięcie (3,24 V) po ok. 96 minutach przy obciążeniu tego wyjścia pojemnością

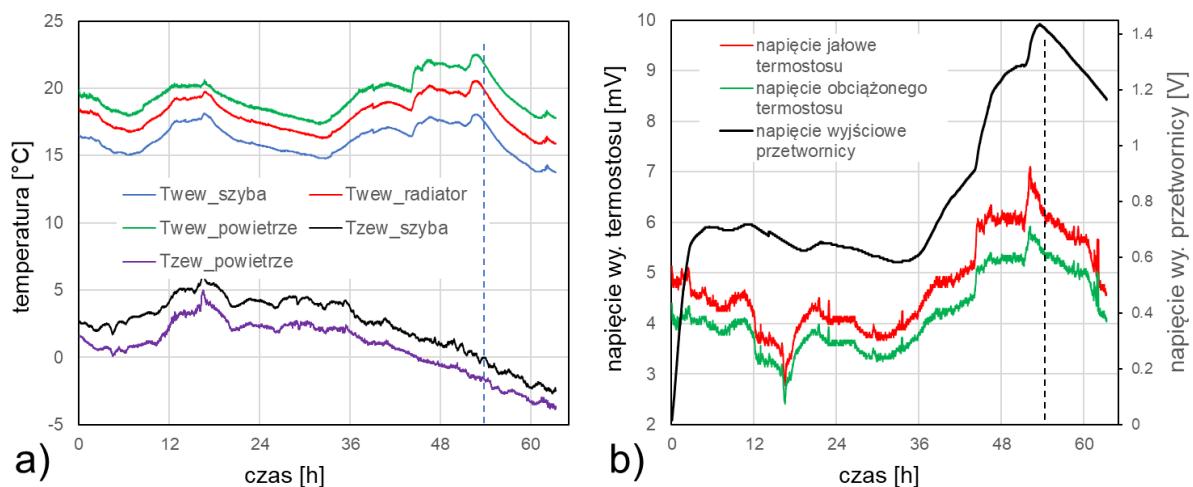
$C_{out}=10000 \mu F$. Zilustrowane tu doświadczenie pokazuje, że przy typowej temperaturze wewnętrznej w pomieszczeniu i przy zaledwie 1-stopniowej różnicy temperatur między stroną „zimną” i „cieplą” termostosu TEC12710 możliwe jest uzyskanie na wyjściu przetwornicy obciążonej dużą pojemnością ($10000 \mu F$) napięcia przekraczającego 3,2 V. Dodatkowo warto zwrócić uwagę, że wzrost średniej temperatury termostosu przekłada się na wzrost jego napięcia wyjściowego; w warunkach uzyskanych w doświadczeniu był to wzrost o ok. 5 mV/K co jest wartością niebagatelną biorąc pod uwagę wartości napięcia wyjściowego termostosu uzyskiwane w tych warunkach termicznych. Efekt ten co prawda częściowo wynika ze zmiany obciążenia termostosu przez przetwornicę wraz ze wzrostem jej napięcia wyjściowego, jednak gdy spojrzymy na napięcia wyjściowe termostosu w stanie jałowym (przed włączeniem przetwornicy i po jej wyłączeniu – punkty A i B na Rys. 60b) to uzyskany wzrost wynosi ok. 2,5 mV/K. Sugeruje to, że należy dążyć do eksploatacji termostosu w jak najwyższej średniej temperaturze jednak wymaga to weryfikacji doświadczalnej co wykracza poza ramy prezentowanej dysertacji doktorskiej.



Rys. 60. Współpraca przetwornicy EM8900 z termostosem TEC12710 na symulowanej powierzchni okna: a) zmiany temperatur strony zimnej termostosu, strony ciepłej termostosu (radiatora) i powietrza w otoczeniu termostosu, b) zmiany napięcia wyjściowego termostosu i przetwornicy.

Ostatecznie w styczniu 2024 przeprowadzono również pomiary zmian napięcia wyjściowego przetwornicy EM8900 z komparatorem XC6135C31 obciążonej pojemnością $C_{out}=10000 \mu F$ i zasilanej z termostosu TEC12710 zainstalowanego na rzeczywistym oknie. Było to wspomiane już wcześniej w tym rozdziale energooszczędne okno 2-szybowe zlokalizowane na 1. piętrze zachodniej strony domu jednorodzinne. Termostos z radiatorem

ICK PDA 21x21 o rezystancji termicznej 7,6 K/W został zainstalowany od strony pomieszczenia w dolnej części okna przy pomocy uchwytu magnetycznego tak jak na Rys. 45. Pomiar prowadzono przez prawie 3 doby, gdy temperatura na zewnątrz była zarówno dodatnia jak i ujemna, co zilustrowano na Rys. 61a. W tym okresie najwyższe napięcie wyjściowe przetwornicy równe 1,43 V uzyskano przy ujemnej temperaturze zewnętrznej powietrza (-1,7°C), która przy wewnętrznej temperaturze powietrza 21,5°C dała temperaturę szyby po stronie wewnętrznej 17,2°C oraz temperaturę radiatora 19,5°C. Uzyskano zatem 2,3°C różnicy temperatur między „ciepłą” a „zimną” stroną termostosu, co dało jałowe napięcie wyjściowe termostosu o wartości 6,10 mV oraz 5,4 mV po obciążeniu go przetwornicą. Są to niestety napięcia prawie dwukrotnie niższe niż uzyskiwane w układzie laboratoryjnym symulującym szybę okienną przy ponad 2-krotnie mniejszej różnicy temperatur (Rys. 60). Jest to prawdopodobnie związane zarówno z odmiennymi warunkami ogrzewania radiatora w warunkach rzeczywistych jak i odmiennymi (zapewne wyższymi) rezystancjami termicznymi na granicach elementów układu cieplnego.



Rys. 61. Współpraca przetwornicy EM8900 z termostosem TEC12710 zainstalowanym na rzeczywistym oknie: a) zmiany temperatur szyby, radiatora i powietrza wewnątrz pomieszczenia oraz szyby i powietrza na zewnątrz, b) zmiany napięcia wyjściowego termostosu w stanie jałowym i obciążonym przetwornicą oraz napięcie wyjściowe przetwornicy obciążonej pojemnością $C_{out}=10000 \mu\text{F}$.

Jak widać, przetwornica EM8900 nie jest w stanie podtrzymać w dłuższym okresie czasu napięcia na kondensatorze o dużej pojemności użytym jako magazyn energii włączony bezpośrednio na jej wyjście. Sugeruje to konieczność użycia dodatkowego, zewnętrznego układu magazynowania i zarządzania energią. Niestety z popandemicznych przyczyn logistycznych nie udało się uzyskać dostępu do scalonego układu zarządzania energią typu

EM8502 (produkcji EM Microelectronic) przewidzianego przez producenta do współpracy z przetwornicą EM8900. Próby przeprowadzone przy użyciu scalonej ultraniskonapięciowej przetwornicy typu AEM30490 (produkcji e-Peas Semiconductors) jak na razie niestety nie dały pozytywnych wyników.

9.6 Podsumowanie

W bieżącym rozdziale manuskryptu przedstawiono niekonwencjonalny sposób pozyskiwania i przekształcania odpadowej energii cieplnej traconej w budynku poprzez szyby okienne na energię elektryczną, wykorzystywaną następnie na potrzeby bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych czujników współpracujących z budynkowym systemem BMS (np. kontaktronowe czujniki otwarcia okna). Korzystając z doświadczalnych harvesterów energii cieplnej zainstalowanych na oknach w dwóch lokalizacjach oszacowano ich zdolność do bezpośredniego zasilania platform czujnikowych. Z analizy danych uzyskanych podczas badań prowadzonych w okresie zimowym dla harvesterów zrealizowanych w oparciu o termostos TEC1-12710 oszacowano ilości energii umożliwiającej teoretycznie zrealizowanie od 27 do 104 pełnych cykli pomiaru na dobę oraz wysłania danych drogą radiową do serwera przez zdalną platformę czujnikowa z łącznością LoRa.

Porównując wyniki badań układu zainstalowanego na zewnętrznej stronie okna z wynikami otrzymanymi z układu zainstalowanego na wewnętrznej stronie okna, korzystniejszym rozwiązaniem (większa wartość generowanego napięcia, w efekcie większa moc termogeneratora) charakteryzował się układ zainstalowany wewnątrz budynku. Przy zbliżonych warunkach środowiskowych, potwierdzonych porównaniem kluczowych dla pracy harwestera parametrów (temperatura powierzchni pracy układu, temperatura powietrza otoczenia) harvester wewnątrz budynku charakteryzował się większą wydajnością napięciową, co w rezultacie spowodowało ponad 3,5 razy większą oszacowaną energią możliwą do pozyskania w trakcie jednej doby. Przeprowadzone badania wskazują na realną możliwość takiego bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych systemu BMS i transmisji danych dotyczących otwarcia okien drogą radiową, a w konsekwencji realizację algorytmów systemu automatyki budynkowej i BMS w pomieszczeniach przyczyniających się - jak zostało to omówione wcześniej - do znaczącej redukcji w budynku zużycia mediów potrzebnych do zapewnienia wymaganego komfortu cieplnego osób w nim

przebywających. Co ważne, badane rozwiązanie charakteryzuje się większą efektywnością energetyczną w budynkach wyposażonych w stolarkę okienną o gorszych parametrach cieplnych (tzn. o wyższej wartości współczynnika przenikania ciepła U_g). Potwierdza to zasadność stosowania tego typu rozwiązań (i dalszych badań z nimi związanych) gdyż jest to rozwiązanie możliwe do zastosowania właśnie w już istniejących budynkach o niskiej klasie energooszczędności lub w budynkach zabytkowych, które obecnie są często wykluczone z możliwości realizacji w nich systemów BMS już na bardzo wstępnym etapie przymiarek do inwestycji termomodernizacyjnych. A w świetle przytoczonych wcześniej w pracy dyrektyw UE budynki te są zobligowane do podniesienia w nich efektywności energetycznej (także w wyniku instalowania systemów BMS) do roku 2050. Przedstawione badania potwierdzają słuszność drugiej tezy rozprawy doktorskiej.

W kolejnych rozdziałach manuskryptu zostanie pokazane jak harvester energii cieplnej opracowany w oparciu o przedstawione rozwiązanie i zainstalowany na kanale odprowadzającym ciepło odpadowe ze sprężarki w zakładzie produkcyjnym może zostać wykorzystany do bezbaterijnego zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej pracującej w sieci LoRaWAN systemu BMS CHRONOMATIK™.

10 Ocena efektywności energetycznej wewnątrzbudynkowych źródeł odpadowej energii cieplnej na potrzeby bezbateryjnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych

10.1 Wstęp

W bieżącym rozdziale rozprawy doktorskiej zbadano i przeanalizowano możliwość wykorzystania oraz oszacowano efektywność energetyczną harvesterów odpadowej energii cieplnej dostępnej w budynku w innych lokalizacjach niż okna. W tym wypadku badane źródła odpadowej energii cieplnej stanowiły: sieciowa instalacja wody zimnej zasilającej budynek jednorodzinny z przyłączem wodomierzowym oraz instalacja powrotu czynnika w układzie ogrzewania CO w budynku jednorodzinny. Badania prowadzono z wykorzystaniem harvesterów energii cieplnej zainstalowanych na odpowiednio zmodyfikowany wodomierzu oraz na belce powrotu rozdzielacza ogrzewania podłogowego. Badania prowadzono w celu określenia możliwości wykorzystywania wymienionych źródeł odpadowej energii cieplnej w budynkach na potrzeby skutecznego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych w systemie BMS CHRONOMATIK™.

10.2 Pozyskiwanie energii cieplnej z wykorzystaniem instalacji wody zimnej.

Biorąc pod uwagę istotę zjawiska Seebecka, różnica temperatur wymuszająca przepływ ciepła jest niezbędnym warunkiem pozyskiwania energii cieplnej przy wykorzystaniu termogeneratora TEG z termostosem. Zazwyczaj rozwiązania tego typu są oparte na źródle energii o temperaturze wyższej niż temperatura otoczenia. W tych rozwiązaniach otoczenie pełni rolę "chłodnicy" wymuszającej przepływ ciepła w kierunku z cieplejszego źródła do chłodniejszego otoczenia (otoczenie zyskuje w ten sposób energię). Natomiast w omawianym w tym rozdziale układzie energia elektryczna pozyskiwana jest na skutek przepływu ciepła w odwrotnym kierunku, czyli z cieplejszego otoczenia do chłodniejszego obiektu (w tym wypadku to otoczenie traci lokalnie energię). Takim łatwo dostępnym, choć nieoczywistym "źródłem" chłodu w budynkach może być przyłączy zimnej wody użytkowej. Harvester energii cieplnej pozyskujący energię elektryczną we wskazany sposób może zapewnić bezbateryjne zasilanie dla zdalnych czujników systemu BMS i automatyki

budynkowej, umożliwiając na przykład zdalną obsługę elektronicznych urządzeń do pomiaru zużycia wody w budynkach, opomiarowania temperatury obiegów w kotłowni, zasilania przetworników ciśnienia w instalacji czy monitorowania czujników detekcji zalania, które coraz częściej również są integrowane w systemach BMS.

W celu oszacowania ilości energii elektrycznej udostępnianej przez taki nietypowy, odwrócony układ źródeł ciepła przeprowadzono dwa niżej opisane eksperymenty. W pierwszym z nich do dolnej podstawy wodomierza jednostrumieniowego (typ SMART+ JS1,6-02; powszechnie instalowanego w krajowych budynkach) przymocowano (za pomocą kleju termoprzewodzącego) termostos TEG typ TEC-12710 (wymiary 40x40x3 mm). Układ wyposażono w radiator (typ ICK PDA 21x21, Fisher Elektronik) o wymiarach 53,5x53,5x16,5mm i rezystancji termicznej 7,6 K/W (przy naturalnym chłodzeniu konwekcyjnym). Wodomierz został dodatkowo zaizolowany termicznie za pomocą specjalnie wykonanej obudowy z XPS (styropian ekstrudowany), tak aby wymiana ciepła między wodomierzem a otoczeniem odbywała się praktycznie tylko przez termostos. Wodomierz zamontowany w układzie doświadczalnym był zasilany wodą przepływającą z prędkością 7,5 l/min, schłodzoną z wykorzystaniem zewnętrznego agregatu chłodniczego. Tak przygotowany układ wodomierza oraz jego instalację obiegu wody zimnej zilustrowano na Rys. 62. Temperaturę wody (T_w), obudowy wodomierza (T_m) i powietrza otoczenia (T_a) oraz napięcie wyjściowe w otwartym obwodzie termostosu (V_T) rejestrowano za pomocą stanowiska pomiarowego opisanego już wcześniej w rozdziale dotyczącym harvestingu energii cieplnej z szyby okiennej (przygotowanego na bazie przeprogramowanego sterownika PLC WAGO 750-8202 wyposażonego w dodatkowe moduły rozszerzeń). Na potrzeby prowadzonych badań wykonano także wizualizację parametrów mierzonych. Konfigurację sprzętową sterownika PLC, a także zrzut ekranu wizualizacji przedstawiono na Rys. 63. Dane pomiarowe były zapisywane na kartę pamięci SD w formie plików CSV.



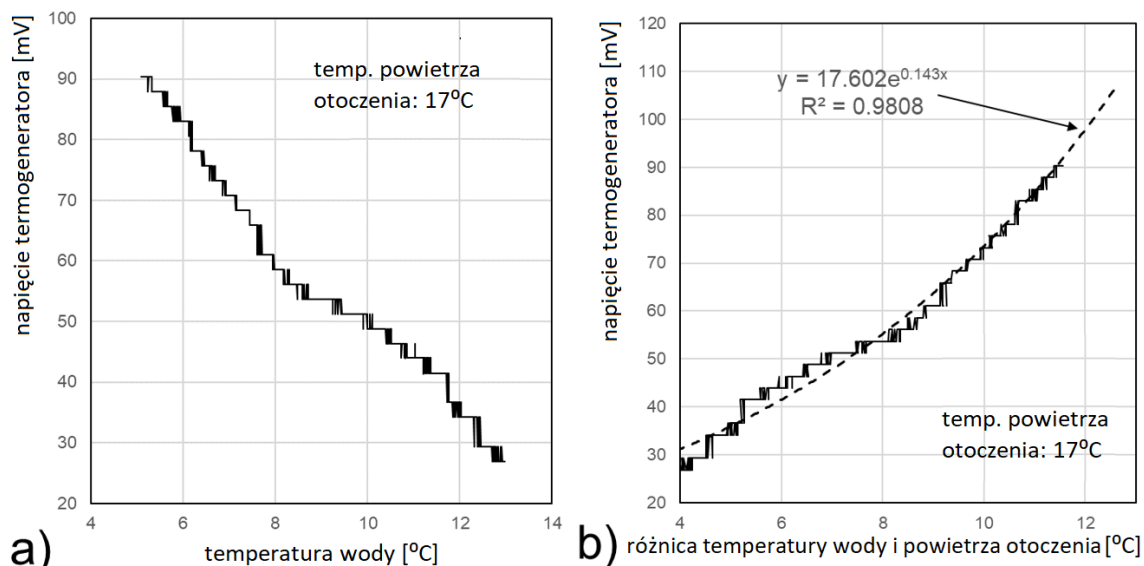
Rys. 62. Laboratoryjny układ harvestera energii cieplnej, zainstalowany na wodomierzu.



Rys. 63. Schemat sterownika PLC oraz zrzut ekranu wizualizacji stanowiska pomiarowego.

Pomiary wartości napięcia generowanego przez termostos oraz oszacowanie wartości generowanej mocy elektrycznej przeprowadzono dla temperatury wody przepływającej przez tak zmodyfikowany wodomierz w zakresie $4,7^{\circ}\text{C}$ - 13°C oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu oscylującej w granicach $16,6^{\circ}\text{C}$ - $17,0^{\circ}\text{C}$. Warunki te odpowiadają rzeczywistym temperaturom wody zimnej zasilającej budynki w Polsce w cyklu rocznym, natomiast temperatura powietrza była zbliżona do temperatury panującej wewnątrz pomieszczeń technicznych w budynkach, w których zainstalowane są przyłącza mediów (badania prowadzono w domu jednorodzinnym z przyłączem wody zimnej usytuowanym w garażu zlokalizowanym w bryle domu). Należy jednak zaznaczyć, że w zależności od położenia geograficznego oraz rodzaju budynku i przyłącza wodociągowego zmiany temperatury wody zimnej zasilającej budynki w cyklu rocznym mogą być większe i osiągać nawet zakres od 2°C do 27°C [97]. Podczas badań przy względnie stałej wartości temperatury powietrza w pomieszczeniu ($16,6^{\circ}\text{C}$ - 17°C) wykorzystując przepływowy agregat chłodu stopniowo zmieniano temperaturę wody przepływającej przez wodomierz – wspomniana zmiana temperatury zasilania wodomierza odbywała się w zakresie $4,7^{\circ}\text{C}$ - 13°C w trakcie

2 godzin. Wyniki prowadzonych badań przedstawiono na wykresie na Rys. 64. a) jako wartość generowanego napięcia termogeneratora w zależności od wartości temperatury wody przepływającej przez wodomierz, a także na wykresie na Rys. 64. b) jako wartość generowanego napięcia w zależności od wartości różnicy temperatury pomiędzy wodą przepływającą przez wodomierz, a temperaturą toczenia.



Rys. 64. Wyniki pomiarów wartości napięcia pozyskiwanego na zaciskach harvestera energii cieplnej w funkcji: a) temperatury wody b) różnicy temperatury wody oraz otoczenia.

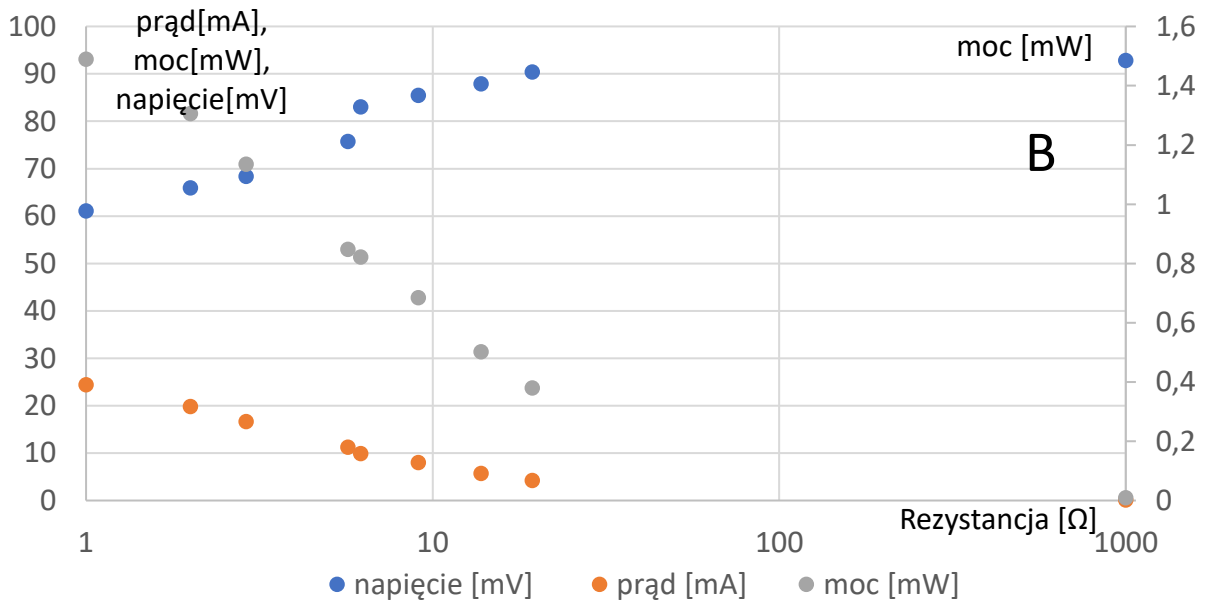
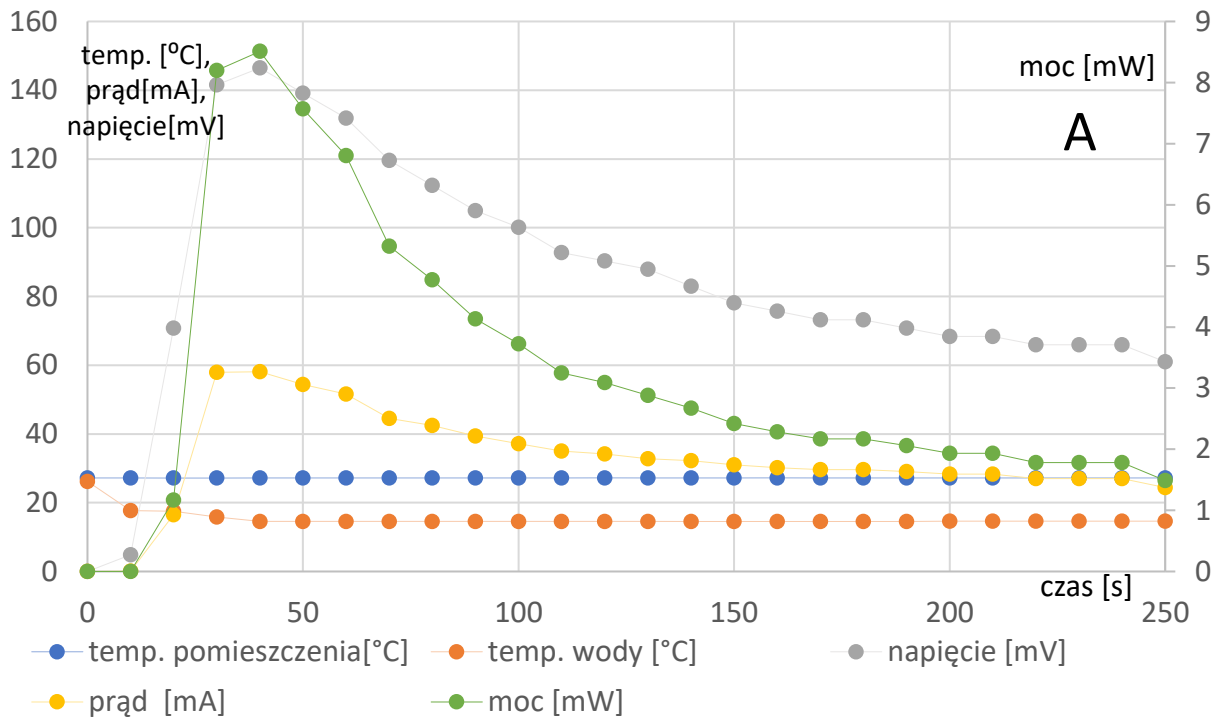
Zmierzona wartość generowanego napięcia osiągała wartość od 26 mV przy temperaturze wody w układzie 13 °C (wartość różnicy temperatury woda – otoczenie: 4 °C) do wartości 90 mV przy temperaturze wody 4,7 °C (wartość różnicy temperatury woda – otoczenie: 12 °C). Warto nadmienić, że dane te uzyskano dla rzeczywistego, niewymuszonego konwekcyjnego chłodzenia radiatora termoharvestera w rzeczywistych warunkach termicznych odpowiadających pomieszczeniom technicznym.

W kolejnym etapie badań, wykorzystując ten sam układ pomiarowy, przeprowadzono badania efektywności energetycznej takiego harvestera odpadowej energii cieplnej w okresie letnim (połowa czerwca 2022r.). Badano wartość napięcia i prądu na wyjściu termogeneratora, obciążonego rezystorem 1 Ω (odtworzącym optymalną rezystancję obciążenia - co omówiono już wcześniej w rozdziale manuskryptu dotyczącym harvestingu energii cieplnej na oknie) w zależności od różnicy temperatur pomiędzy stałą temperaturą powietrza w pomieszczeniu (27,2°C), a zmienną (wynikającą z przepływu wody) temperaturą obudowy wodomierza.

Pomiary przedstawione na wykresie na Rys. 65. a) prowadzono od momentu zasilenia układu zimną wodą do momentu ustabilizowania się temperatury obudowy wodomierza na poziomie temperatury wody zasilającej układ (14,9 °C – rzeczywista temperatura wody w instalacji w czerwcu). W zastosowanych warunkach pomiarowych temperatura wodomierza ustabilizowała się po około 250 s przy wartości różnicy temperatur wynoszącej 12,3 °C (w stosunku do temperatury otoczenia). Przy obciążeniu termogeneratora rezystancją równą 1 Ω uzyskano napięcie wyjściowe termogeneratora w stanie ustalonym na poziomie 61,04 mV oraz wartość prądu 28 mA, co daje moc wyjściową termostosu 1,71 mW. Natomiast największa wartość generowanej mocy została osiągnięta po ok. 40 s pracy harvestera przy napięciu 146,5 mV i zmierzonej wartości prądu 58,1 mA, co odpowiadało mocy wyjściowej 8,51 mW. Zatem całkowita energia dostarczona przez termogenerator przy obciążeniu obwodu optymalną rezystancją 1 Ω w czasie trwania pomiaru (250 sekund) była równa 846,46 mJ. Teoretycznie taka porcja energii pozwoliłaby na wykonanie 25 cykli pomiarów i transmisji danych realizowanych przez zdalną platformę pomiarową LoRa omówioną w poprzednich rozdziałach. Obliczenia te nie uwzględniają jednak strat energii powodowanych przez ultraniskonapięciową przetwornicę DC-DC ULV (ang. Ultra Low Voltage), niezbędną do zasilania takiej platformy z omawianego harvestera energii cieplnej ze względu na jego zbyt niskie napięcie wyjściowe. Przy zastosowaniu ultraniskonapięciowej przetwornicy DC-DC o ok. 40-procentowej sprawności całkowitej [98] rzeczywista chwilowa moc dostępna dla systemu zdalnych czujników IoT wynosiłaby zatem ok. 0,5 mW. Następnie, zakładając około 30 % łączną sprawność przetwornicy ULV DC-DC i systemu magazynowania energii, omawiany harvester odpadowej energii cieplnej teoretycznie pozwoliłby na przeprowadzenie ponad 7 cykli pomiarowych i transmisyjnych przez platformę zdalnego czujnika LoRa z wykorzystaniem energii zebranej w czasie zaledwie 250 s.

Katalogowa wartość rezystancji wewnętrznej użytego w badaniach termogeneratora TEC 12710 w temperaturze 25 °C wynosi 1,08 Ω. W opisanych powyżej, stabilnych warunkach pracy harvestera energii cieplnej (tj. po 250 s, gdy temperatura obudowy wodomierza ustabilizowała się na poziomie 14,9°C) przeprowadzono również badanie krzywej mocy generatora. Badanie opierało się na pomiarze napięcia i prądu wyjściowego dla termogeneratora obciążonego zmienną rezystancją w zakresie 1-1000 omów, co przedstawiono na wykresie na Rys. 65. b). W zapewnionych, stabilnych warunkach termicznych największą moc 1,49 mW zarejestrowano dla obciążenia 1 Ω, przy napięciu

wyjściowym termogenerators 61,04 mV, co przekłada się na ok. 60 % napięcia obwodu nieobciążonego termogenerators (102,54 mV). Można więc szacować, że MPP (ang. Maximal Power Point czyli punkt mocy maksymalnej) termogenerators w omawianej konstrukcji jest w rzeczywistości bliski 60 %.

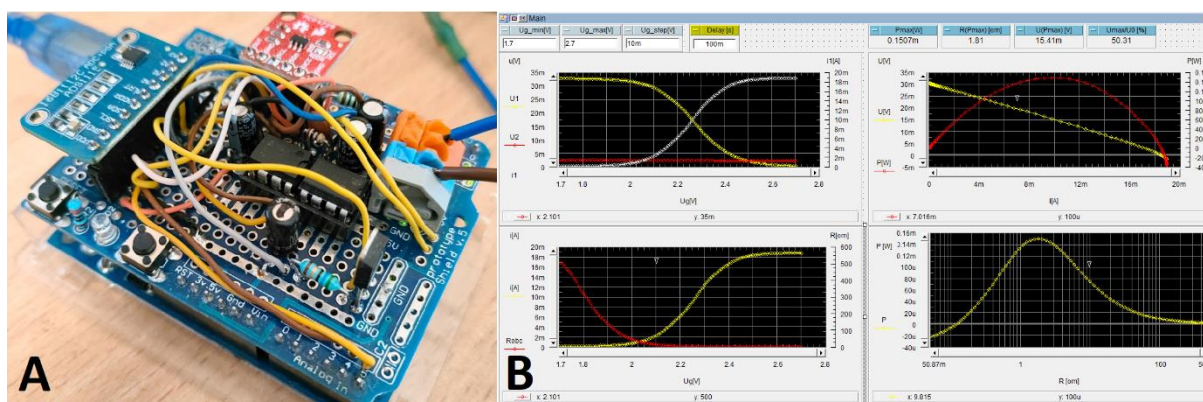


Rys. 65 a) Przebieg wartości mierzonego napięcia oraz prądu dla termogenerators obciążonego rezystancją 1 Ω b) wartość mierzonego napięcia i prądu oraz wyznaczonej mocy dla ogniwa obciążonego rezystancją w zakresie 1 Ω – 1 k Ω.

10.3 Badanie krzywej mocy termogeneratora TEC 12710

Podczas prowadzonych badań ukierunkowanych na określeniu krzywej mocy termogeneratora TEC 12710 poza badaniami związanymi z termogeneratorem zainstalowanym bezpośrednio na obudowie wodomierza przeprowadzono również badania z wykorzystaniem cyfrowego, automatycznego układu zbudowanego w oparciu o platformę Arduino Uno pokazanego na Rys. 66 A).

Zaprojektowane oraz wykonane urządzenie cyfrowe pozwala wykonywać pomiary charakterystyk I-U termogeneratora. Układ wykorzystujący tranzystor MOSFET z bramką sterowaną napięciem U_g zadawanym z przetwornika DAC MCP4725 (o rozdzielczości 12 bitów) w zakresie 0 -5,1 V realizuje cyfrowo regulowane rezystancyjne obciążenie układu pomiarowego. W efekcie regulowany zakres obciążenia od ok. 0,1 Ω do 1 k Ω odbywa się poprzez regulację wartości napięcia U_g od ok. 1,7 V do 2,5 V. W trakcie pracy układu przy pomocy przetwornika I-U (zrealizowanego na wzmacniaczu operacyjnym) mierzona jest wartość prądu termostosu, natomiast dzięki przetwornikowi ADC ADS 1115 (o rozdzielczości 16 bitów) mierzona jest wartość napięcia na wyprowadzeniach termostosu. Komunikacja z układem realizowana jest z wykorzystaniem portu komunikacji szeregowej UART, co pozwala na graficzne przedstawienie przebiegu charakterystyk, a także generowanie plików z danymi w formacie CSV z wykorzystaniem np. środowiska Agilent VEE. Przykładowe zrzuty ekranu oprogramowania sterującego pokazano na Rys. 66 B).



Rys. 66. A) Zdjęcie układu pomiarowego charakterystyk U-I). B) przykładowy zrzut ekranu badanych charakterystyk U-I w programie Agilent VEE.

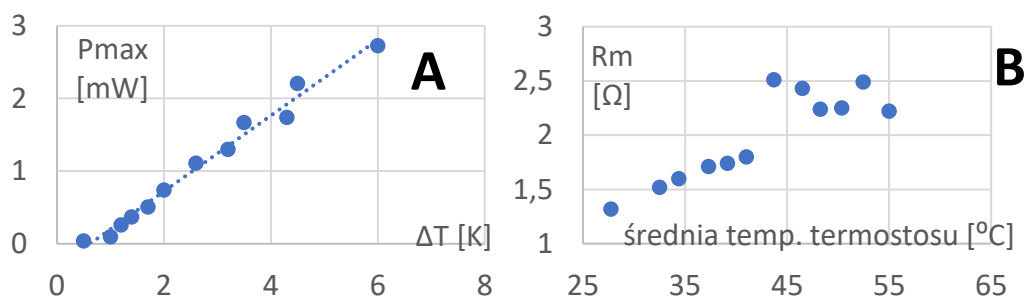
Korzystając z opisanego układu przeprowadzono pomiary krzywych mocy termogeneratora TEC 12710. Przy stałej wartości temperatury powietrza w pomieszczeniu wynoszącej 23,65 °C prowadzono badania termogeneratora wyposażonego we wspomniany wcześniej radiator aluminiowy (produkcji Fischer Elektonik) o wymiarach 51 x 51 x 16,5 mm i rezystancji cieplnej 7,6 K/W zainstalowany na „stronie zimnej” termostosu. Stronę „ciepłą” termostosu osadzono na elemencie grzewczym (płaski, mosiężny blok o dużej bezwładności cieplnej ogrzewany grzałką ceramiczną 40W zasilaną regulowanym zasilaczem laboratoryjnym).

W rezultacie przeprowadzonych badań określono charakterystyki prądowo-napięciowe U-I przy kilkunastu stabilnych wartościach temperatury. Dla każdej z wartości temperatur (różnicy temperatur pomiędzy „stroną ciepłą” – mosiężny blok, a „stroną zimną” – radiator) wyznaczono wartość maksymalnej mocy, a także wartość rezystancji obciążenia, przy której ta moc została osiągnięta. Dane te przedstawiono w tabeli Tabela 4.

Tabela 4. wyniki przeprowadzonych badań - wyznaczenie charakterystyk U-I termogeneratora

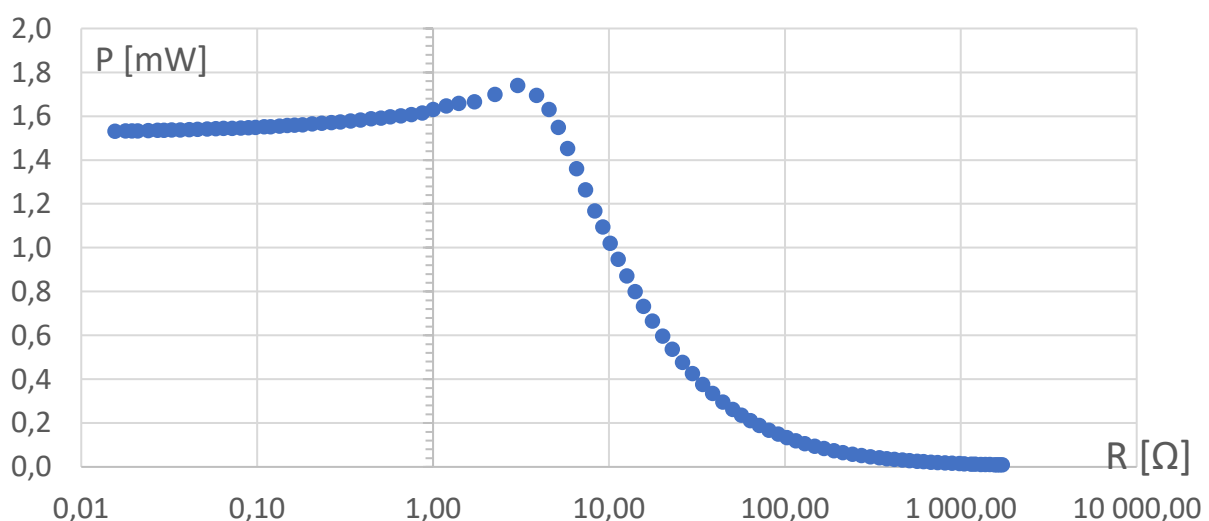
l.p.	temp. źródła ciepła [°C]	temp. radiatora [°C]	Różnica temp. (otoczenie – radiator) [°C]	Pmax [mW] maksymalna moc zmierzona	Rm [Ω] Wartość rezystancji dla mocy maksymalnej
1	58	52	6	2,73	2,22
2	54,7	50,2	4,5	2,21	2,49
3	52,5	48,2	4,3	1,74	2,25
4	50	46,5	3,5	1,67	2,24
5	48,1	44,9	3,2	1,3	2,43
6	45	42,4	2,6	1,11	2,51
7	42	40	2	0,74	1,8
8	40	38,3	1,7	0,51	1,74
9	38	36,6	1,4	0,37	1,71
10	35	33,8	1,2	0,26	1,6
11	33	32	1	0,1	1,52
12	28	27,5	0,5	0,04	1,32

Dane przedstawione w tabeli zobrazowano również w formie wykresów na Rys. 67.



Rys. 67. A) wykres mocy maksymalnej Pmax w zależności od różnicy temperatury otoczenie – radiator, B) wykres rezystancji mocy maksymalnej Rm w zależności od wartości średniej temperatury termostosu $(T_{\text{źródła}} + T_{\text{radiatora}})/2$.

Na wykresie przedstawionym na Rys. 67.A) widać liniową zależność wartości mocy maksymalnej w zależności od wartości różnicy temperatur (temperatura otoczenia – temperatura radiatora). Natomiast wykres B) przedstawia wartości rezystancji R_m (czyli rezystancji odpowiadającej mocy maksymalnej uzyskiwanej dla danej wartości temperatury pracy termogeneratora. Temperaturę termogeneratora na tych wykresach podano jako temperaturę średnią termostosu. Na przedstawionym wykresie widać wyraźny wzrost wartości R_m wraz ze wzrostem wartości temperatury termostosu. Na wykresie daje się zauważyć silnie szumowy charakter wzrostu rezystancji R_m dla temperatur powyżej ok. 48°C co było prawdopodobnie związane ze znacznie gorszą stabilizacją temperatury w tym zakresie. Wyznaczone wartości rezystancji R_m odpowiadają optymalnej wartości obciążenia układu termogeneratora przy którym generowana moc osiąga wartość maksymalną (czyli w punkcie MPP). Badając efektywność energetyczną harvesterów energii cieplnej, znajomość wartości rezystancji obciążenia, przy której termogenerator osiąga wartość szczytową generowanej mocy MPP jest istotna dla odpowiedniego dobrania tej wartości obciążenia, a w efekcie osiągnięcia najwyższej efektywności harwestera energii. Na Rys. 68. przedstawiono przykładowy przebieg charakterystyki mocy generowanej przez termostos TEC 12710 przy zmiennej wartości obciążenia obwodu w zakresie 0,01 Ω - 1 700 Ω . Wartość mocy maksymalnej zmierzonej dla przedstawionego przebiegu wynosi 1,74mW przy wartości rezystancji 2,25 Ω . Termostos pracował wówczas przy temperaturze źródła wynoszącej 52,5 °C.



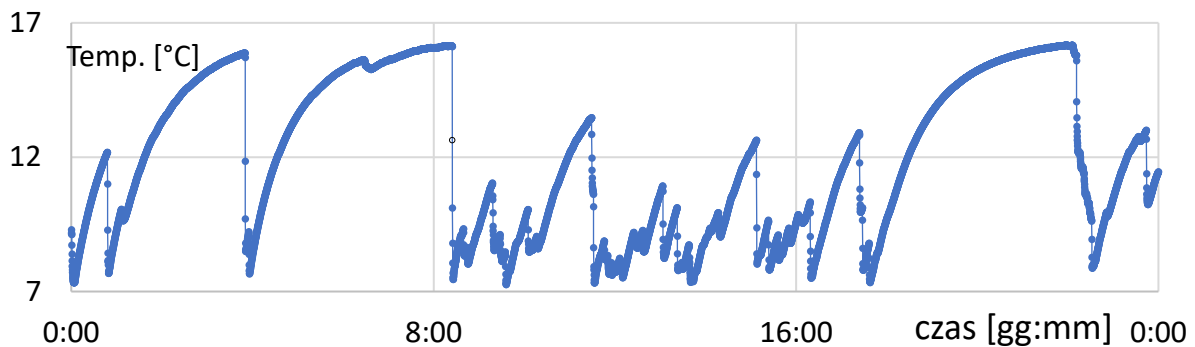
Rys. 68. Wykres wartości mocy generowanej przez termostos TEC12710 w warunkach temperowych przedstawionych w tabeli Tabela 4 w zakresie wartości rezystancji 0,01 Ω – 1700 Ω .

Zmiana wartości punktu mocy maksymalnej MPP dla termostosów w zależności od zmiany warunków temperaturowych, w których pracuje termogenerator jest zjawiskiem, które może znacząco zmniejszać efektywność energetyczną harvesterów energii cieplnej. Klasyczne przetwornice napięcia DC-DC pracują zapewniając stabilizację napięcia wyjściowego. Badany termogenerator charakteryzuje się wysoką wartością generowanej mocy przy niskiej wartości rezystancji obciążenia. W zakresie rezystancji obwodu $0,01 \Omega$ – $2,25 \Omega$ zmierzona wartość generowanej mocy wynosi od $1,55 \text{ mW}$ do $1,74 \text{ mW}$. Następnie po przekroczeniu wartości rezystancji punktu MPP następuje gwałtowny spadek wartości generowanej mocy (przy wartości rezystancji 10Ω wartość generowanej mocy zmierzono na poziomie 1 mW co stanowi już tylko 57% wartości mocy maksymalnej. Opisana cecha jest istotna przy projektowaniu architektury układu przetwarzającego energię elektryczną generowaną przez harvester energii cieplnej z wykorzystaniem przykładowego termostosu TEC 12710. Efektywność energetyczna harvesterów energii cieplnej może być optymalizowana doбором elementów magazynujących energię elektryczną charakteryzujących się niską wartością rezystancji – zbliżoną/równą wartości rezystancji punktów MPP termostosu lub wykorzystując przetwornice DC-DC z funkcją MPPT. Przetwornice te dynamicznie zapewniają najwyższą dostępną moc wyjściową układu. Badania związane z projektowaniem układów harvesterów energii cieplnej i mechanicznej wykorzystujących niskonapięciowe przetwornice DC-DC, a także elementy magazynujące energię zostały opisane w dalszej części manuskryptu.

10.4 Badanie rzeczywistego potencjału energetycznego (temperatury obudowy wodomierza) w trakcie doby w warunkach letnich.

Podczas prezentowanych tu badań rejestrowano w cyklu dobowym temperaturę metalowej obudowy niezmodyfikowanego wodomierza zainstalowanego na rurociągu zasilającym dom jednorodzinny. Na wykresie na Rys. 69. przedstawiono dobowe zmiany temperatury obudowy wodomierza. Zaobserwowano, że temperatura obudowy wodomierza gwałtownie obniża się przy każdym poborze wody z instalacji. Jednak w ciągu doby występuje około 6 - 8 cykli długotrwałego zatrzymania poboru wody (związane z nieobecnością użytkowników lub brakiem ich aktywności), które powodują osiągnięcie przez wodomierz temperatury zbliżonej do otoczenia. Tak więc przy każdym ponownym przepływie wody przez wodomierz, który wcześniej osiągnął temperaturę zbliżoną do temperatury otoczenia, jego

temperatura gwałtownie się obniża. W efekcie występowania takich pików temperaturowych wartość napięcia generowanego przez termogenerator podłączony do omawianego wodomierza w trakcie doby kilkukrotnie osiągnęłaby wartość powyżej 120 mV. Biorąc pod uwagę wyniki badań przedstawionych w poprzednim podrozdziale, każdy taki pik temperaturowy odpowiada możliwości pozyskania energii elektrycznej o wartości ponad 800 mJ w niespełna 250 sekund.



Rys. 69. Wykres przedstawiający dobowe zmiany wartości temperatury obudowy wodomierza w przykładowym gospodarstwie domowym w okresie letnim (czerwiec).

W oparciu o dane przedstawione na Rys. 69. oraz uwzględniając przedstawione na Rys. 64. zależności napięcia wyjściowego nieobciążonego termogeneratorsa od różnicy temperatur (temperatura otoczenia – temperatura obudowy), szacunkowa wartość energii elektrycznej dostępnej na wyjściu termostosu połączonego z rzeczywistym wodomierzem w cyklu dobowym wyniosłaby ok. 20,4 J. Ponownie, przy założeniu 30 % łącznej sprawności przetwornicy DC-DC i układu magazynowania energii, szacunkowa, wartość zgromadzonej energii elektrycznej wystarczyłaby zatem na wykonanie 185 cykli pomiarowych i transmisji danych ze zdalnej platformy LoRa dziennie, co daje ponad 7 cykli na godzinę. Jest to okres wystarczający z punktu widzenia wymagań algorytmów sterowania stosowanych przez system BMS CHRONOMATIK™ nie tylko w odniesieniu do pomiaru zużycia wody, ale także np. przy wykrywaniu mikro wycieków wody w instalacji.

Przedstawione obliczenia, oparte na rzeczywistych danych, sugerują duży potencjał energetyczny takiego rozwiązania i zachęcają do podjęcia próby zrealizowania rzeczywistego układu pozyskującego energię w opisany sposób i zasilającego bezbateryjnie platformę czujnikową. Pewną trudność techniczną może w tym wypadku stanowić konstrukcja obudowy

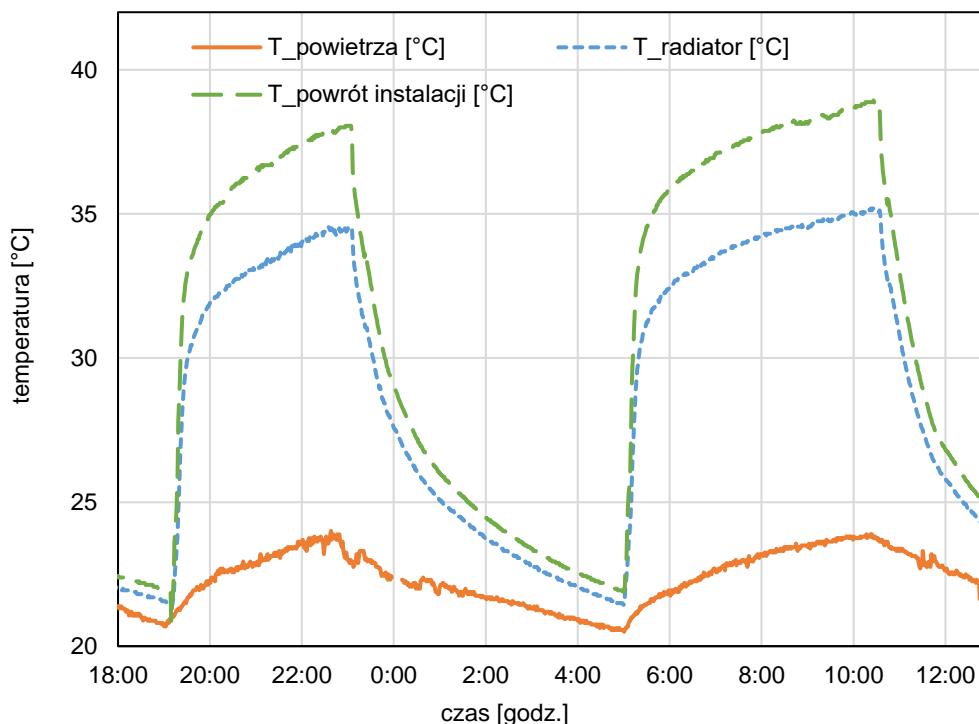
licznika wody, która jest najczęściej wykonana w postaci okrągłego cienkościennego odlewu mosiężnego z płaską tylko dolną częścią, na której niestety zwykle umieszczony jest niewielki wystający fragment łoża koła łopatkowego, który nie jest możliwy do usunięcia z przyczyn konstrukcyjno-wytrzymałościowych. Oczywiście możliwe jest zastosowanie termicznie przewodzącej nakładki ale takie rozwiązanie pogorszy rezystancję termiczną kontaktu termostosu z obudową licznika. Najlepszym rozwiązaniem byłoby zatem przeprojektowanie obudowy licznika tak aby jakiś jej fragment o wymiarach termostosu był płaski. Wymaga to jednak bezpośredniej współpracy z producentem licznika i wiąże się z ponowną koniecznością jego homologacji jako układu rozliczeniowego. Innym możliwym rozwiązaniem jest rezygnacja z montażu termostosu bezpośrednio na liczniku wody zimnej i przeniesienie go na dodatkowy termoprzewodzący element włączany w obwód zimnej wody. Takie rozwiązanie zapewnia nie tylko większą swobodę projektową, ale również dużą dowolność miejsca instalacji. Co więcej, w instalacji zimnej wody można zainstalować kilka takich termogeneratorów gdyż praktycznie nigdy nie są one w stanie spowodować podgrzania wody na ich wyjściu do temperatury otoczenia. Rzeczywista efektywność energetyczna takiego termoelektrycznego harwestera energii cieplnej będzie oczywiście ściśle związana z rzeczywistą intensywnością poboru wody. Biorąc jednak pod uwagę szacunkową ilość energii możliwej do uzyskania w okresie dobowym, elementy instalacji zasilania wody zimnej budynków stanowią doskonałe źródło energetyczne dla pracy harvesterów energii cieplnej w budynkach, pozyskujących energię na potrzeby zasilania bezprzewodowych, bezbateryjnych elementów systemów BMS CHRONOMATIK™.

10.5 Pozyskiwanie energii cieplnej z wykorzystaniem belki rozdzielacza powrotu w instalacji CO.

Kolejna próba pozyskiwania energii cieplnej wewnątrz budynków opiera się na odzysku ciepła z instalacji powrotnej domowego systemu grzewczego CO, a zatem w miejscu, gdzie energia cieplna zgromadzona w czynniku grzewczym w zasadzie jest już tracona tylko na lokalne ogrzanie powietrza otaczającego rozdzielacz. Temperatura czynnika grzewczego powracającego w takiej instalacji silnie zależy od rodzaju zainstalowanego urządzenia grzewczego i może wahać się od 65°C dla kotłów węglowych [99] do 30-35°C dla pomp ciepła [100]. Temperatura powrotu zależy również od rodzaju grzejników wykorzystywanych w instalacji (grzejnik konwektorowy lub ogrzewanie podłogowe) oraz od stanu cieplnego

budynku (zarówno jego izolacji jak i temperatury wewnętrznej). W praktyce temperatura ta jest niższa od danych podawanych w normach i może wynosić nawet 20-23°C w układach z pompą ciepła, w których parametr COP pompy ciepła jest optymalizowany właśnie poprzez obniżenie temperatury powrotu instalacji [101].

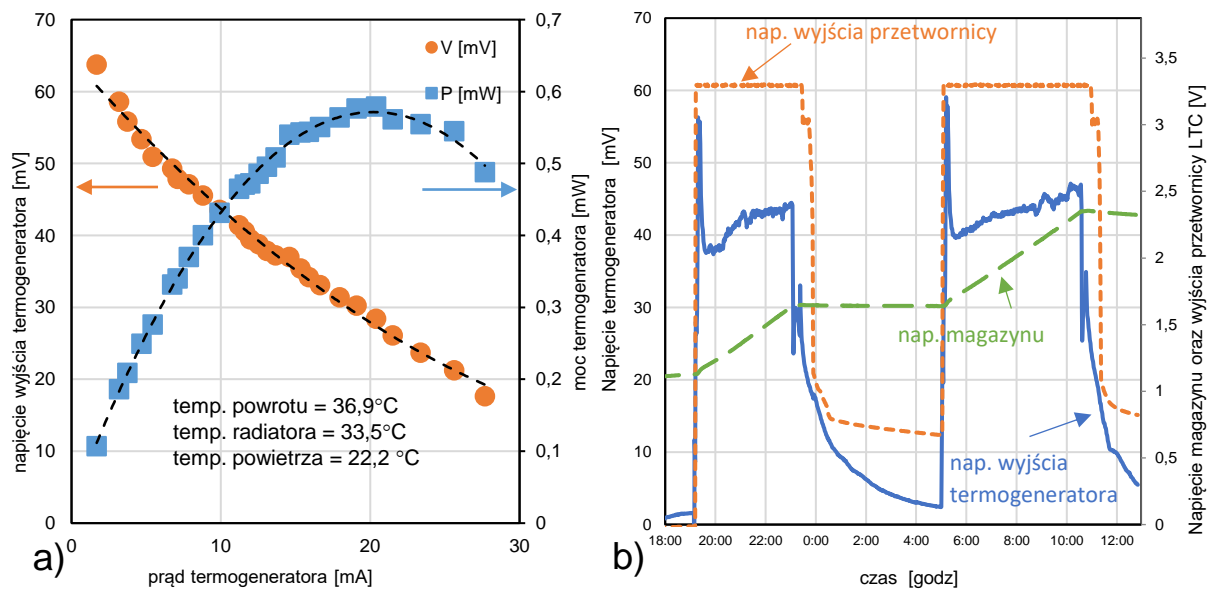
Opisane badania przeprowadzono zatem z wykorzystaniem domowej instalacji ogrzewania podłogowego wyposażonej w kondensacyjny kocioł gazowy pracujący w czasie badań ze stałą temperaturą na zasilaniu obwodu grzewczego równą 50°C (temperatura ta zapewniała najlepszą efektywność energetyczną kondensacyjnego kotła gazowego). Główny rozdzielacz powrotny instalacji CO zlokalizowany w pobliżu kotła został wyposażony w płaski, termoprzewodzący wspornik wykonany z duraluminium, do którego przymocowano termogenerator wraz z radiatorem z pośrednictwem pasty termoprzewodzącej oraz dodatkowej przekładki termoizolacyjnej pomiędzy podstawą a radiatorem. Termogenerator TEC 12710 z radiatorem ICK PDA 21x21 zastosowano w sposób opisany wcześniej podczas badań z użyciem wodomierza i układu na szybie okiennej. Tutaj również zastosowano bezkontaktowe, magnetyczne mocowania radiatora minimalizujące jego sprzężenie termiczne z elementem podstawy czyli źródła ciepła o wyższej temperaturze. Tak jak poprzednio radiator był dociskany do termostosu i nakładki na belce rozdzielacza siłą powstającą w wyniku przyciągania dwóch magnesów neodymowych (umieszczonych symetrycznie na końcach aluminiowo-plastikowego wspornika przymocowanego do radiatora) do dwóch stalowych płaskich elementów przymocowanych również symetrycznie do nakładki na belce rozdzielacza. Rozwiązanie to pozwala nie stosować kleju termoprzewodzącego i dzięki temu zapewnia łatwy montaż i demontaż układu przy jednoczesnej minimalizacji sprzężenia termicznego między „ciepłą” nakładką belki a „zimnym” radiatorem co bezpośrednio prowadzi do zwiększenia uzyskiwanej różnicy temperatur.



Rys. 70. Harvester energii cieplnej, zainstalowany na belce powrotnej rozdzielacza: przykładowy przebieg wartości temperatur w zimowy dzień.

Podczas prowadzonych badań poza pomiarem wartości generowanego przez termostos napięcia w układzie wykorzystano wspomnianą już wcześniej ultraniskonapięciową przetwornicę DC-DC LTC3108 (produkcji Linear Technology) z miniaturowym transformatorem step-up 1:100 (produkcji Coilcraft), natomiast jako magazyn energii zastosowano superkondensator 2,5F/5V podłączony do wyjścia VSTOR przetwornicy LTC3108. Wykorzystując system pomiarowy zrealizowany na platformie Arduino rejestrowano następujące wartości: temperatura belki powrotnej rozdzielacza (T_{powrot}), temperatura radiatora (T_{radiator}), temperatura powietrza otoczenia (T_{powierz}), napięcie na kondensatorze magazynującym energię (V_{supercap}) oraz napięcie głównego wyjścia przetwornicy LTC3108 (V_{out}). Na wykresie na Rys. 70. przedstawiono zmiany temperatury zarejestrowane dla takiego harvestera energii cieplnej w przykładowym zimowym dniu, kiedy system grzewczy został włączony 2 razy. Rzeczywista różnica temperatur strony „zimnej” i „cieplej” termogeneratora (czyli $T_{\text{powrot}} - T_{\text{radiator}}$) przekraczała 3°C przez większość okresu pracy kotła grzewczego wzrastając do $3,8^{\circ}\text{C}$ pod jego koniec. Na wykresie na Rys. 71.a) przedstawiono również krzywe prądowo-napięciowe i prądowo-mocowe omawianego termogeneratora zarejestrowane przy średniej różnicy temperatur ($3,4^{\circ}\text{C}$). Maksymalna moc

wyjściowa termogeneratora w takich warunkach termicznych osiągnęła 0,57 mW w punkcie MPP równym ok. 42% wartości napięcia obwodu rozwartego.



Rys. 71. Wydajność energetyczna harwestera energii cieplnej zainstalowanego na belce powrotnej rozdzielacza CO: a) Charakterystyka prądowo- napięciowa oraz prądowo-mocowa przy średniej wartości różnicy temperatur 3,4 °C b) Przebieg wartości generowanego napięcia w trakcie przykładowych 19 godzin pracy systemu grzewczego.

Na wykresie na Rys. 71 b) przedstawiono przebiegi generowanych przez harvester energii cieplnej napięć, zarejestrowane w omawianym przykładowym 19 godzinnym okresie zimowym. Termogenerators pracował poniżej swojego MPP, ponieważ zastosowany w projekcie transformator step-up 1:100 nie zapewniał dopasowanego obciążenia dla termogeneratora, a układ LTC3108 nie jest wyposażony w funkcję śledzenia MPP. Jeśli jednak przyjmujemy, że krzywa mocy pokazana na Rys. 71. a) nie uległa poważnym zmianom w obu okresach pracy kotła (co jest poprawnym założeniem biorąc pod uwagę niewielką zmianę średniej temperatury termogeneratora) to termogenerators pracujący przez większość czasu przy napięciu wyjściowym 37-46 mV dostarczał w tym czasie mocy 0,37-0,49 mW. W obu okresach pracy kotła napięcie na superkondensatorze systematycznie rosło ze średnią szybkością 127 mV/h. Biorąc pod uwagę pojemność superkondensator (2,5 F) daje to jego średni prąd ładowania 88,4 μ A, oraz średnią moc ładowania 0,176 mW. Przekłada się to na 36-48 % sprawność zastosowanej przetwornicy DC-DC, co bardzo dobrze zgadza się z wartościami przedstawionymi w dokumentacji układu LTC3108 [102]. Całkowita energia wygenerowana przez przedstawiony układ harwestera energii cieplnej i zmagazynowana

w superkondensatorze podczas obu okresów pracy kotła wyniosła 5,27 J. Biorąc ponownie pod uwagę zużycie energii przez zdalną platformę pomiarową LoRa omówioną w poprzednim rozdziale, przekładałoby się to na prawie 159 cykli pomiarowych i transmisyjnych wykonanych w ciągu 15 godzin (czyli w okresie gdy napięcie wyjściowe V_{out} przetwornicy dc-dc wynosiło 3,3 V). Odpowiada to ponad 10 cyklom pomiarowo nadawczym na godzinę. Spełnia to zatem w pełni wymagania stawiane układom czujnikowym współpracującym z systemem zarządzania budynkiem BMS CHRONOMATIK™.

Przedstawione badania dowodzą możliwości zastosowania całkowicie bezbaterijnego zasilania dla rzeczywistych bezprzewodowych urządzeń pomiarowych wykorzystywanych w rozwiązaniach automatyki budynkowej z nadrzędnym systemem BMS CHRONOMATIK™, co potwierdza słuszność tezy nr 2 postawionej na wstępie dysertacji. Na bazie omówionych wyników badań związanych z możliwością pozyskiwania odpadowej energii cieplnej z wykorzystaniem powierzchni szyby okiennej w okresie zimowym, instalacji zasilającej budynek w wodę zimną (wodomierz), a także układ z powrotną belką rozdzielacza CO w dalszych rozdziałach doktoratu opisano kolejne badania związane z uruchomieniem w pełni funkcjonalnych harvesterów energii cieplnej przetwarzających oraz magazynujących energię elektryczną, wykorzystaną następnie do zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i przemysłowych.

11 Opis badań harvestingowego zasilania platform czujnikowych LoRa z wykorzystaniem odpadowej energii cieplnej w warunkach laboratoryjnych.

11.1 Wstęp

Analiza opisanych w poprzednich rozdziałach manuskryptu badań i pozytywne wyniki zdolności pozyskiwania energii elektrycznej z wykorzystaniem źródeł odpadowej energii cieplnej wewnątrz budynków (instalacja wody zimnej w budynku – obudowa wodomierza, belka rozdzielacza CO w budynku – powrót instalacji, szyba okienna) pozwoliła na przeprowadzenie kolejnych badań skupiających się nad określeniem zdolności do bezbaterijnego zasilania platformy czujnikowej LoRa, a także nad opracowaniem, zaprojektowaniem, wykonaniem oraz uruchomieniem w warunkach laboratoryjnych, a następnie w warunkach przemysłowych układu zapewniającego ciągłe, skuteczne i bezawaryjne przetwarzanie energię elektryczną o niskiej wartości napięcia elektrycznego pozyskiwaną z harvestera odpadowej energii cieplnej na energię elektryczną o parametrach niezbędnych do zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa współpracującej z systemem BMS CHRONOMATIK.

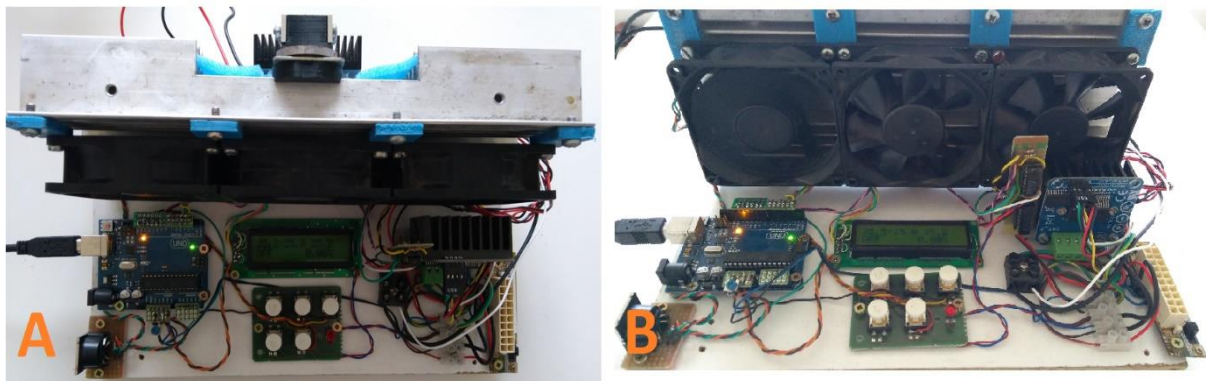
11.2 Budowa stanowiska pomiarowego

Na potrzeby prowadzenia badań z wykorzystaniem modeli obiektów rzeczywistych w warunkach laboratoryjnych zaprojektowano, skonstruowano oraz uruchomiono stanowisko umożliwiające termiczne symulowanie powierzchni obiektów rzeczywistych takich jak: szyba okienna w okresie letnim i zimowym, obudowa wodomierza, belka rozdzielacza ogrzewania CO zasilanego czynnikiem stałotemperaturowym, powierzchnia kanału odprowadzającego ciepło odpadowe sprężarki, itp. Zdjęcie stanowiska przedstawiono na Rys. 72.

Przedstawiony układ pomiarowy realizuje regulowane sygnałem PWM sterowanie wyjściem mocy mostka H (model IBT-2) pozwalającego na zasilanie elementów Peltiera (typu TEC-12710) zapewniających funkcje grzania bądź chłodzenia powierzchni roboczej stanowiska, w efekcie zapewniając wymagane wartości temperatury powierzchni elementów biorących udział w badaniach.

Sterowanie układem z regulacją PID zostało zrealizowane z wykorzystaniem platformy Arduino UNO z wyświetlaczem LCD 16X2 pełniącym funkcję interfejsu pozwalającego na monitorowanie warunków pracy układu, a także kontrolowania zadawanych parametrów pracy regulatora PID i wyjścia sygnału PWM.

Opisany wyżej układ został wyposażony w robocze pole pracy osadzone na radiatorze (model radiatora: A4129) wykonanym z profilu aluminiowego o wymiarach 200mm x 36mm x 120 mm i rezystancji termicznej 1,7 K/W oraz trzech wentylatorów znacząco usprawniając przepływ ciepła z radiatora do otoczenia. Po przeciwnej stronie radiatora zainstalowano grzewczo-chłodzący element Peltiera, który w zależności od polaryzacji napięcia zasilania przełączanej przez mostek H pozwala na symulowanie temperatur powierzchni od -6°C symulując np. powierzchnię szyby okiennej w zimie, do 48°C symulując np. powierzchnię kanału odprowadzającego ciepło odpadowe ze sprężarek. Wyjścia mostka H umożliwiają również zasilanie innych urządzeń grzewczych z możliwością regulacji mocy ich zasilania (poprzez wspomniany regulator PID zrealizowany na platformie Arduino) np. grzałki ceramicznej 24V DC o mocy 40W. Grzałka taka zainstalowana w rozdzielaczu ogrzewania CO z powodzeniem symuluje pracę rozdzielacza eksploatowanego w budynkowej sieci grzewczej CO w okresie zimowym.



Rys. 72. Stanowisko pomiarowe symulujące dostępne źródła ciepłej energii odpadowej w budynkach. A- widok z góry, B – widok od frontu.

Termogenerator

W zrealizowanych badaniach laboratoryjnych wykorzystywany został ten sam termostos (model TEC 12710), jak w opisanych wcześniej badaniach obiektowych. Element ten charakteryzuje się niską rezystancją wewnętrzną $2,07\ \Omega$ w temperaturze 25°C . We wszystkich

opisywanych tu badaniach wykorzystywany był wspólny element mocujący termogenerator na elementach, z których pozyskiwana była energia cieplna. Wykonano go w oparciu o płaskowniki umożliwiające montaż radiatora wraz z zamocowanym termogeneratorem za pomocą dwóch neodymowych magnesów. Rozwiązanie to, jak już wspomniano wcześniej, zapewnia montaż konstrukcji radiatora bez bezpośredniego kontaktu elementów mocujących ze źródłem ciepła. Jako element odprowadzający energię cieplną do otoczenia (zapewnianie temperatury strony zimnej termogeneratora możliwie najbardziej zbliżonej to wartości temperatury otoczenia) wykorzystano radiator o oporze cieplnym wynoszącym 1,7 W/K.

Ultraniskonapięciowa przetwornica DC-DC

W poprzednich rozdziałach rozprawy, dotyczących rzeczywistych źródeł odpadowej energii cieplnej dostępnej wewnątrz budynków wykorzystując termogenerator TEC 12710 otrzymywano napięcie termogeneratora od wartości rzędu kilku – kilkunastu mV dla rozwiązań opartych o pozyskiwanie odpadowej energii cieplnej na szybach okiennych w okresach zimowych do wartości przekraczających 100 mV przy pozyskiwaniu energii cieplnej z wodomierza w instalacji wody zimnej.

W oparciu o wyniki badań przedstawionych w poprzednich rozdziałach, dotyczących wartości napięć oraz szacunkowych wartości pozyskiwanej energii z harvesterów odpadowej energii cieplnej pracujących w warunkach rzeczywistych jako najbardziej obiecującą wybrano ultraniskonapięciową przetwornicę DC-DC model LTC3108 [98] zdolną podnosić napięcia wejściowe od wartości ok. 20 mV do wartości napięcia wyjściowego w zakresie od 2,35 V do 5 V. Przetwornica ta została zaprojektowana do aplikacji pozyskujących energię elektryczną ze źródeł harvestingowych takich jak termostos czy małe ogniwa fotowoltaiczne. Przetwornica wymaga doposażenia układu w miniaturowy transformator podnoszący. Dobór wartości przekładni transformatora podnoszącego uwarunkowany jest dostępną wartością napięcia wejściowego przetwornicy oraz oczekiwaną szybkością ładowania kondensatora magazynującego energię, zasilanego przetwornicą dla ustalonej wartości napięcia wyjściowego przetwornicy. Dla generatorów TEC zalecane jest stosowanie transformatora z przekładnią 1:100, umożliwiającego pracę przetwornicy już od napięcia wejściowego na poziomie 20 mV aż do napięcia maksymalnego na poziomie 500 mV.

Przetwornica ta jest również wyposażona w dwa wejścia logiczne VS1 i VS2 pozwalające ustalić wartość stabilizowanego napięcia wyjściowego na poziomie 2,35 V, 3,3 V, 4,1 V lub 5,0 V.

11.3 Dobór magazynu energii

Na podstawie przedstawionych w jednym z poprzednich rozdziałów doktoratu wyników badań konsumpcji energii potrzebnej do realizacji pomiaru i transferu danych za pośrednictwem protokołu LoRa w klasie A przez bezprzewodowe platformy czujnikowe oszacowano wartość potrzebnej energii na poziomie ok. 33 mJ. Wartość ta stanowi zatem konieczny do spełnienia warunek energetyczny, który musi zostać zaspokojony przez układ harvestera energii cieplnej do bezbaterijnego zasilenia takiej platformy czujnikowej.

W celu doboru optymalnego magazynu energii przeprowadzono szereg badań z wykorzystaniem kondensatorów elektrolitycznych o pojemnościach (4700 μF , 10000 μF , 20000 μF oraz kombinacji połączonych równolegle kondensatorów) oraz superkondensatorów EDLC o pojemnościach 0,1 F, 0,22 F i 0,33F, a także superkondensatorów hybrydowych Li-ion. Zgodnie z zależnością (1)

$$E = \frac{U^2 C}{2} \quad (1)$$

wartość energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze zależy od pojemności kondensatora - C oraz kwadratu napięcia elektrycznego do którego naładowany jest kondensator - U^2 . W efekcie znaczny wzrost energii zgromadzonej w kondensatorze można uzyskać podnosząc napięcie wyjściowe układu przetwornicy ładującej ten kondensator, a nie zwiększając jego pojemność.

Optymalne rozwiązanie doboru magazynu energii powinno zapewniać wystarczającą ilość gromadzonej energii, umożliwiającą wykonanie pełnych cykli pomiarowo nadawczych z określoną dla danego zastosowania częstotliwością oraz w zależności od wymagań danej aplikacji zapewniać również energetyczny bufor energii utrzymujący układ czujnikowo-radiowy w stanie prawidłowego zasilenia w czasookresach bez aktywnego źródła energii pozyskiwanej przez harvester.

Ze względu na architekturę układu zasilania stosowanej bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa składającego się z dwóch połączonych szeregowo ogniw 3,6 V, dających łącznie napięcie zasilania 7,2V platforma czujnikowa wyposażona jest w przetwornicę TPS62745DSSR [79] obniżającą napięcie baterii do poziomu napięcia pracy układów scalonych platformy czujnikowej czyli 3,3V. Przetwornica charakteryzuje się wysoką sprawnością – rzędu 90% oraz bardzo niskim poborem prądu w warunkach spoczynkowych (bez aktywnego obciążenia strony wtórej) – rzędu 0,4 μA oraz może pracować od minimalnej wartości napięcia wejściowego na poziomie 3,3 V.

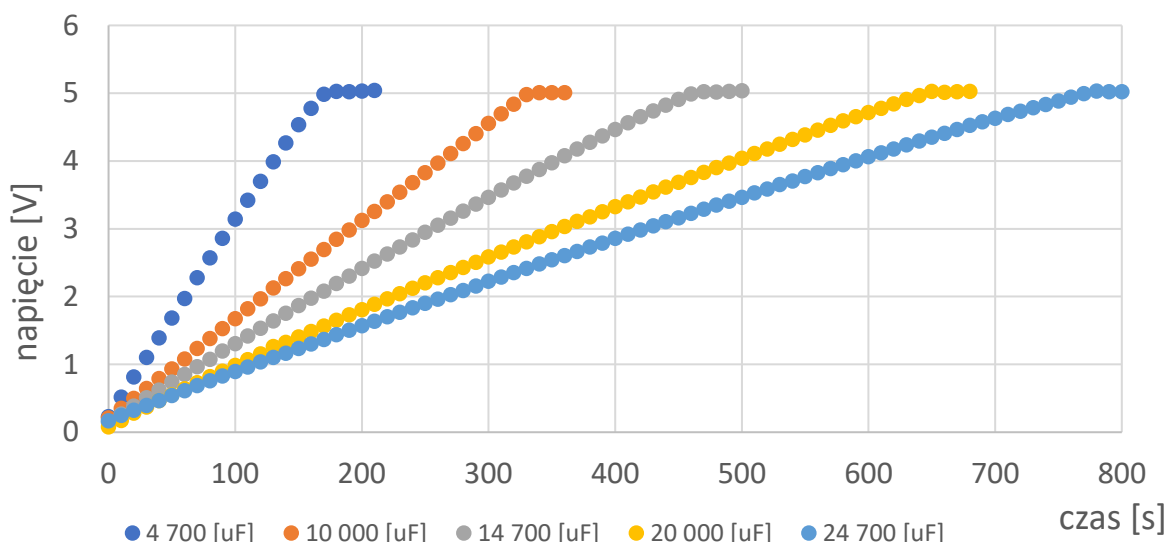
Jako efektywną energetycznie strategię zasilania platformy czujnikowej z wykorzystaniem układu harvestera odpadowej energii cieplnej opracowano układ zasilania z dodatkową przetwornicą DC-DC podnoszącą napięcie do wartości 5V, co pozwala znacząco zwiększyć ilość energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze magazynującym energię elektryczną (energia może być gromadzona w kondensatorze dla napięcia o wartości 5V, zamiast 3,3V (tzn. napięcia pracy platformy czujnikowej). Podczas pracy układu w opracowanej architekturze w kondensatorze może zostać zgromadzona nadwyżka energii w zakresie wartości napięcia pomiędzy minimalnym teoretycznym napięciem pracy 3,3V, a maksymalnym napięciem wyjściowym przetwornicy LTC3108 wynoszącym 5V. W efekcie, dla magazynu energii w postaci kondensatora EDLC o pojemności 0,33 F teoretyczna nadwyżka energii w układzie w takich warunkach może wynosić aż 2,35 J. Przy zapotrzebowaniu na energię elektryczną do realizacji pojedynczego cyklu pomiarowo nadawczego przez platformę LoRa na poziomie 33 mJ wystarczy to na wykonanie 71 cykli pomiarowo nadawczych. Dla często stosowanego w budynkach układu pomiarowego wysyłającego dane z częstotliwością 4 pomiary na godzinę, przy pełnym naładowaniu takiego superkondensatora (do napięcia 5V) i odciążeniu energii ze źródła termoharwestingowego teoretycznie pozwoli to na utrzymywanie ciągłości pomiarów i komunikacji przez okres ok. 18 godzin (szacunki te wykonano na podstawie analizy danych z pracy rzeczywistego systemu BMS CHRONOMATIK™, wdrożonego przez moją macierzystą firmę KMB Grupa na wielu obiektach przemysłowych i komunalnych). Minusem rozwiązania z zastosowaniem elementów magazynujących energię elektryczną o dużych pojemnościach jest czas potrzebny do pierwszego naładowania „pustego” kondensatora do minimalnej wartości napięcia pozwalającego na zrealizowanie pierwszego cyklu pomiarowo nadawczego (w przypadku

wspomnianej platformy oznacza to osiągnięcie napięcie bufora na poziomie min. 3,3 V) i utrzymywanie tej wartości napięcia w trakcie pracy bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa. Natomiast nieistotny jest czas wymagany do osiągnięcia górnej, granicznej wartości napięcia 5V, co w efekcie eliminuje zasadność pracy przetwornicy dla niższych wartości napięcia wyjścia przetwornicy LTC3108 niż 5V.

11.4 Badania dotyczące doboru rodzaju oraz pojemności kondensatora jako magazynu energii elektrycznej układów harvestingowych

Podczas badań stanowisko laboratoryjne opisane na początku tego rozdziału zostało zaprogramowane w sposób zapewniający utrzymywanie stałej wartości temperatury elementu grzewczego, osiągając różnicę temperatur elementu grzewczego względem otoczenia na poziomie 12 °C (temperatura otoczenia: 20 °C, temperatura elementu grzewczego: 32°C). W wyniku stale utrzymywanej różnicy temperatur termogenerator TEC generował na wyjściu napięcie ok. 100 mV przy podłączonym wejściu przetwornicy LTC3108. Przetwornica została skonfigurowana do pracy z napięciem wyjściowym o wartości 5V. Wszystkie istotne parametry pracy układu (temperatura otoczenia, temperatura elementu grzewczego, temperatura radiatora, napięcie generowane mierzone na wejściu układu przetwornicy, napięcie kondensatora gromadzącego energię) były rejestrowane przez opisywany w poprzednich rozdziałach pracy sterownik PLC WAGO 8212 i zapisywane na karcie SD w formacie plików CSV. Wykorzystując to stanowisko pomiarowe przeprowadzono badania szybkości ładowania kondensatorów elektrolitycznych o różnych pojemnościach energią wytwarzaną przez termostos w warunkach zbliżonych do warunków eksploatacyjnych i przetwarzaną przez przetwornicę LTC3108. Kondensatory podłączano do wyjścia V_{out} przetwornicy.

Na wykresie na Rys. 73. przedstawiono przykładowe zapisy cykli ładowania kondensatorów o pojemności 4700 μF i 10000 μF oraz układów równolegle połączonych kondensatorów o łącznej pojemności 14700 μF , 20000 μF i 24700 μF . Wartość napięcia 5V badane kondensatory osiągały w zależności od pojemności w czasie od 180 sekund (4700 μF) do 780 sekund (24700 μF).



Rys. 73 Szybkość ładowania kondensatorów elektrolitycznych ze źródła termoharvestingowego w zależności od ich pojemności.

Analizując wartość energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorach w zakresie wartości napięci pomiędzy 3,3V i 5V określono szacunkową ilość możliwych do zrealizowania cykli pomiarowo nadawczych bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa. Dla badanych pojemności kondensatorów ilość ta wynosi od 1 cyklu dla kondensatora o pojemności 4700 μF do 5 cykli dla układu kondensatorów o pojemności 24700 μF . Dane te zebrano w tabeli Tabela 5.

Tabela 5. Zestawienie czasów ładowania kondensatorów ze źródła termoharvestingowego do wartości 5 V oraz obliczeniowa wartość zgromadzonej energii elektrycznej przy napięciu 5V oraz w zakresie 3,3V – 5V.

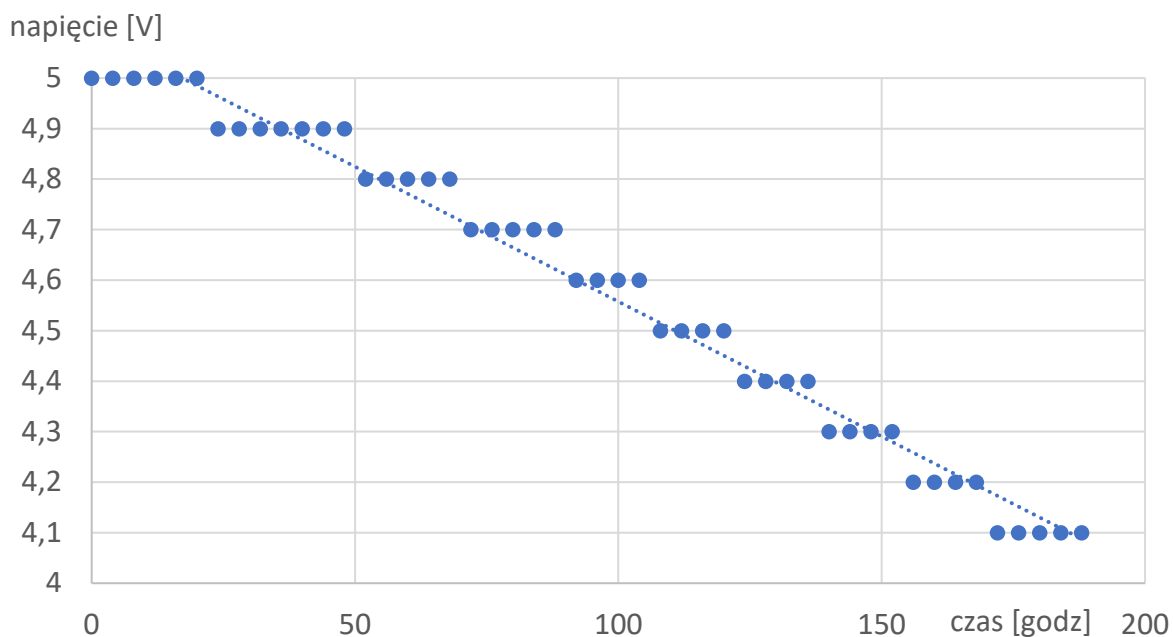
pojemność kondensatora [uF]	4700	10000	14700	20000	24700
czas ładowania kondensatora do napięcia 5V [s]	180	400	470	650	780
zgromadzona energia elektryczna w kondensatorze [mJ]	59	125	184	250	309
energia dostępna w zakresie napięć operacyjnych 3,3V – 5V [mJ]	33	70	104	141	174
teoretyczna ilość cykli pomiarowo nadawczych platformy	1	2	3	4	5

Bez uwzględnienia strat energii związanych z pracą przetwornicy (TPS62745DSSR) zainstalowanej w układzie zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa przy największym zmierzonym zapotrzebowaniu energetycznym platformy czujnikowej na 1 cykl pomiarowo nadawczy na poziomie 33 mJ teoretycznie każdy z badanych kondensatorów może pełnić rolę skutecznego magazynu energii elektrycznej w projektowanym harvesterze. Dla

stałych warunków pracy harwestera (stała, stabilna wartość różnicy temperatur powierzchni pracy harwestera względem temperatury otoczenia, niezakłócony przepływ powietrza w okolicy radiatora strony zimnej) najkrótszy czas pozyskiwania energii elektrycznej zdolnej zasilać platformę czujnikową na wykonanie jednego pełnego cyklu pomiarowo nadawczego w symulowanych warunkach wynosi zaledwie ok. 60 sekund. Czas ten jest zatem wystarczająco krótki dla zapewnienia częstotliwości pomiarów warunków środowiskowych niezbędnej dla systemu BMS CHRONOMATIK™.

Wadą rozwiązania opartego o realizację bufora energii elektrycznej wykorzystującego kondensatory elektrolityczne o dużej pojemności jest ich spory rozmiar. Pomimo stosunkowo wysokiej gęstości energii magazynowanej w kondensatorach elektrolitycznych (rzędu 120 J/kg) w badaniach laboratoryjnych wykorzystano kondensatory elektrolityczne producenta LEAGUER [103] o relatywnie dużych wymiarach, w efekcie znacząco zwiększając objętość obudowy układu harwestera energii cieplnej zasilającego platformy czujnikowe.

Pozytywną cechą wykorzystania kondensatorów elektrolitycznych jest długi czas ich samorozładowania. Na wykresie Rys. 74. przedstawiono przykładowy przebieg samorozładowania kondensatora elektrolitycznego LEAGUER RT1 35V o pojemności 10000 μF naładowanego do napięcia 5V. Badania czasu samorozładowania kondensatora przerwano po 8 dniach, dla których wartość napięcia kondensatora wynosiła 4,1V. Wyniki badań potwierdzają możliwość magazynowania energii elektrycznej w kondensatorach elektrolitycznych przez długi czas. Natomiast ich nieduża pojemność w stosunku do rozmiarów stanowi problem przy długotrwałym magazynowaniu energii na potrzeby zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych (zgrupowana energia w tych kondensatorach wystarcza na wykonanie zaledwie kilku pomiarów).



Rys. 74. Wykres samorozładowania kondensatora elektrolitycznego LEAGUER RT1 o pojemności 10000 μ F (pomiar realizowany co 6 godzin).

11.5 Kondensatory elektrolityczne jako magazyn energii dla platformy czujnikowej LoRa: podsumowanie

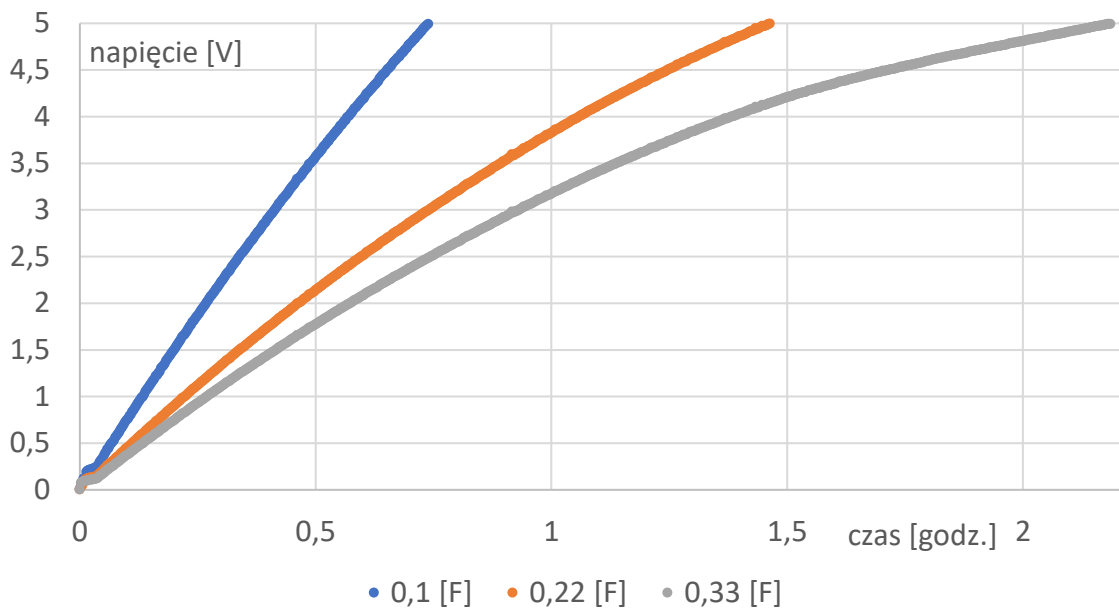
Z uwagi na przedstawione właściwości magazynu energii elektrycznej pracującego w oparciu o kondensatory elektrolityczne stwierdzono, że układy te umożliwiają gromadzenie energii elektrycznej w systemach harvestingu odpadowej energii cieplnej z wykorzystaniem ultraniskonapięciowych przetwornic DC-DC. Magazyny takie są jednak stosunkowo duże i mogą być wykorzystywane do zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych we współpracy ze źródłami odpadowej energii cieplnej dostępnymi w sposób ciągły, bądź w układach automatyki, w których nie jest wymagane monitorowanie parametrów mierzonych podczas wyłączenia urządzeń emitujących ciepło odpadowe. Alternatywą dla opisanego rozwiązania jest zastosowanie superkondensatorów czyli kondensatorów z podwójną warstwą ładunku (EDLC) lub superkondensatorów hybrydowych Li-ion.

Kondensatory EDLC

Kondensatory EDLC (*ang. Electric Double-Layer Capacitors*) są to kondensatory elektrolityczne z podwójną warstwą ładunku elektrycznego. Zbudowane są z dwóch elektrod o dużej powierzchni przedzielonych warstwą elektrolitu. Duża powierzchnia kontaktu elektrody z elektrolitem prowadzi do osiągnięcia pojemności jednostkowych wynoszących nawet do 950 F/g masy elektrody w zależności od zastosowanego materiału. Dzięki temu kondensatory EDLC charakteryzują się dużą gęstością zgromadzonej energii, a także długim czasem życia, krótkim czasem ładowania i rozładowania oraz szerokim zakresem temperatur pracy. Ich bardzo ważną zaletą jest również możliwość bezpiecznego (tzn. nie prowadzącego do ich uszkodzenia) pełnego rozładowania do napięcia zbliżonego do 0V. Kondensatory EDLC nazywane także superkondensatorami charakteryzują się dużą pojemnością w stosunku do ich wielkości (700 – 800 F przy obudowie w kształcie walca o średnicy podstawy 35mm i wysokości 80mm) jednak przy stosunkowo niskim napięciu pracy (zwykle 2,5-2,7 V lub 5,0-5,4V dla układów podwójnych)[104].

Podczas badań związanych z opracowaniem optymalnego magazynu energii elektrycznej dla harwestera odpadowej energii cieplnej skupiono się nad zbadaniem kondensatorów EDLC producenta BIGCAP o pojemnościach 0,1 F, 0,22 F i 0,33 F [105].

Na wykresie na Rys. 75. przedstawiono charakterystyki szybkości ładowania kondensatorów EDLC o pojemnościach 0,1 F, 0,22 F, 0,33 F przy użyciu omówionego wcześniej doświadczalnego stanowiska symulującego harvesting energii cieplnej w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Badania prowadzono przy stałej wartości temperatury elementu grzewczego zapewniając różnicę temperatur elementu grzewczego względem otoczenia na poziomie 12 °C (otoczenie 20 °C, element grzewczy 32°C). W wyniku utrzymywanej różnicy temperatury zmierzona wartość napięcia na wyprowadzeniach termogeneratora TEG obciążonego przetwornicą LTC3108 wynosiła ok. 100mV. Przetwornica została skonfigurowana jak poprzednio do pracy z napięciem wyjściowym 5V.



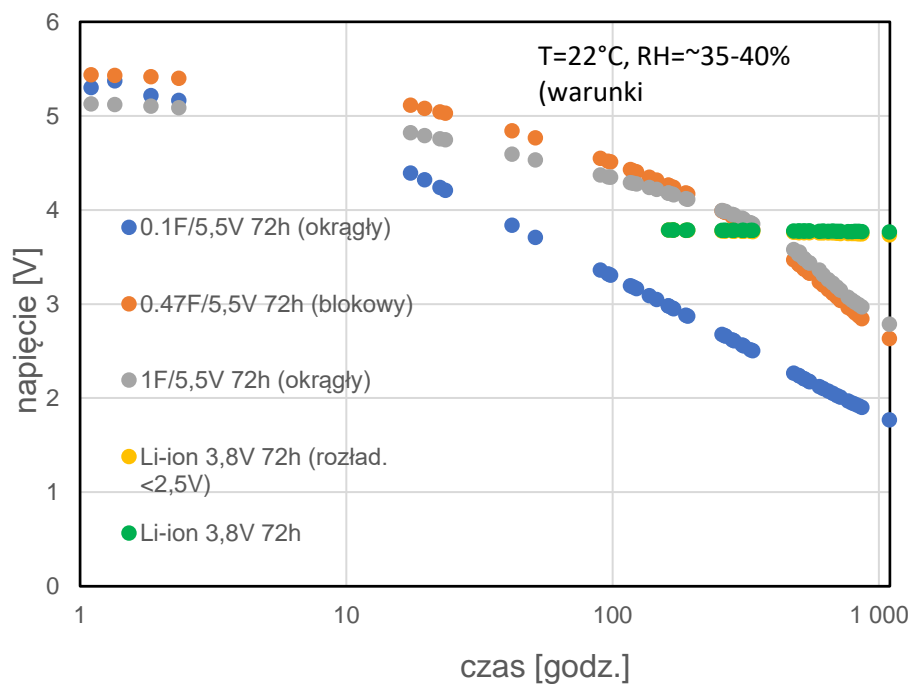
Rys. 75. Szybkość ładowania superkondensatorów EDLC z termoharwestera w zależności od ich pojemności (0,1 F, 0,22 F i 0,33 F).

Analogicznie do badań prowadzonych z wykorzystaniem kondensatorów elektrolitycznych dla kondensatorów EDCL obliczono wartość energii elektrycznej zgromadzonej w superkondensatorach przy pełnym naładowaniu do 5 V oraz przy wartości napięcia na poziomie 3,3V, w efekcie wyznaczając szacunkową ilość cykli pomiarowo nadawczych dla bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa. Dla badanych kondensatorów EDLC oszacowano ilość możliwych cykli pomiarowo nadawczych od 21 dla kondensatora o pojemności 0,1 F przez 46 cykli dla kondensatora 0,22F i 70 cykli dla kondensatora o pojemności 0,33F. Dane przedstawiono w tabeli Tabela 6.

Tabela 6. Zestawienie czasów ładowania kondensatorów EDLC do wartości 5 V oraz ilość zgromadzonej w nich energii.

pojemność kondensatora [F]	0,1	0,22	0,33
czas ładowania kondensatora do napięcia 5V [min]	44	89	131
zgromadzona energia elektryczna w kondensatorze [J]	1,25	2,75	4,125
zgromadzona energia ponad wartość operacyjną 3,3V [J]	0,7	1,55	2,33
teoretyczna ilość cykli pomiarowo nadawczych platformy	21	46	70

Dla kondensatorów EDCL oraz dodatkowo dla kondensatorów hybrydowych Li-ion z serii HyCap (typu VLCRS3R8206MG o znamionowej pojemności 20F i napięciu znamionowym 3,8V, produkcji VinaTech) przeprowadzono również badania czasu samorozładowania podobnie jak dla kondensatorów elektrolitycznych. Superkondensatory wstępnie zostały poddane ładowaniu formującemu napięciem stałym 5,5V (kondensatory EDCL) lub 3,8 V (kondensatory hybrydowe Li-ion). Na Rys. 76. przedstawiono krzywe samorozładowania superkondensatorów w czasie 1000 h. Oś czasu przedstawiona została w skali logarytmicznej ze względu na charakterystykę samorozładowania kondensatorów EDCL, dla których największy spadek wartości napięcia, a zatem wartości zgromadzonej energii następuje w pierwszych 100 godzinach prowadzonych badań. Wśród badanych kondensatorów EDCL kondensatorem charakteryzującym się najszybszym spadkiem wartości zgromadzonego napięcia jest kondensator okrągły o najmniejszej pojemności (0,1F); po 1000 godzinach wartość mierzonego napięcia wynosiła poniżej 2 V, dla kondensatorów o pojemności 0,47F (obudowa blokowa) i 1 F (obudowa okrągła) przebieg napięcia samorozładowania oraz wartość napięcia po 1000 godzinach wynosił ok. 2,8V. Dla kondensatorów hybrydowych Li-ion 3,8V wartość napięcia po 1000 godzinach spadła o zaledwie 0,1V co wskazuje na wysoką odporność tego typu kondensatorów na efekt samorozładowania. Pomimo tej zalety oraz dużej gęstości energii (kilka razy większej niż dla kondensatorów EDLC), superkondensatory hybrydowe Li-ion mają jednak poważną wadę w postaci braku możliwości ich głębokiego rozładowania (do napięcia zerowego), co wiąże się z ich trwałym uszkodzeniem.



Rys. 76. Samorozładowanie superkondensatorów ładowanych napięciem stałym o wartości 5,5V przez 72h oraz hybrydowych li-ion ładowanych napięciem stałym o wartości 3,8 V przez 72h, badanie prowadzono w temperaturze pokojowej.

11.6 Wnioski

Przedstawione porównanie cech kondensatorów elektrolitycznych i kondensatorów EDCL ładowanych ze źródła symulującego rzeczywiste źródło termoharvestingowe wskazuje na możliwość oraz zasadność zastosowania obu rodzajów kondensatorów jako buforów energii elektrycznej dla harvesterów energii cieplnej w zależności od wymagań stawianych takiemu rozwiązaniu, wielkości dostępnego miejsca oraz ciągłości i częstotliwości komunikacji bezprzewodowej. Ze względu na uniwersalność zastosowania, mniejsze wymiary, dłuższy czas samorozładowania kondensatora do wartości napięcia poniżej wartości operacyjnej, a przede wszystkim wielokrotnie większą pojemność elektryczną do dalszych badań wybrano kondensator EDCL o pojemności 0,33 F firmy BIGCAP. Ze względu na bardzo długi czas samorozładowania oraz względnie krótki czas ładowania kondensatora do wartości napięcia umożliwiającego pracę zdalnej platformy czujnikowej LoRa (3,3V) wynoszący ok. 1 godziny (napięciem 100mV) wybór kondensatora EDCL o pojemności 0,33F jest jak się wydaje rozwiązaniem optymalnym. Porównując cechy takiego rozwiązania z wymaganiami stawianymi urządzeniom pomiarowym w systemach BMS wartość energii zmagazynowanej

przy napięciu 5V pozwala teoretycznie wykonać 70 cykle pomiarowo nadawcze. Czas samorozładowania kondensatorów elektrolitycznych oraz EDCL o badanych pojemnościach w nieznacznym tylko stopniu wpływa negatywnie na zastosowanie tego typu kondensatorów w formie bufora energii, ze względu na nieporównywalnie krótszy okres powtarzania przez bezprzewodową platformę czujnikową cyklu pomiarowo nadawczego (ok. 15 minut).

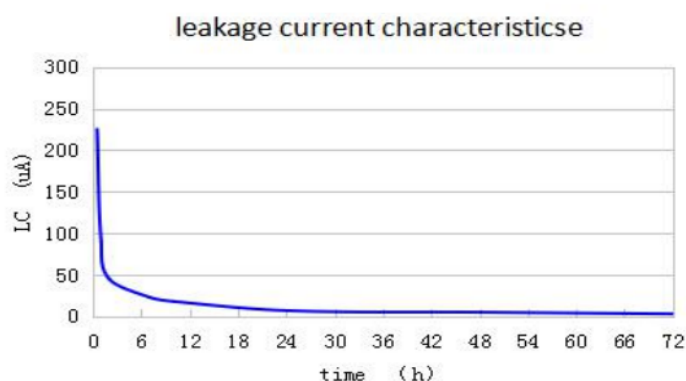
11.7 Zasilanie platform pomiarowych z użyciem opisanego harvestera energii cieplnej.

W kolejnym etapie badań laboratoryjnych skupiono się zatem nad pomiarem poboru energii elektrycznej z bufora energii w postaci kondensatora EDCL o pojemności 0,33 F przez zdalną platformę pomiarową wykonującą pomiar temperatury otoczenia oraz realizującą komunikację radiową z wykorzystaniem protokołu LoRa pracującego w klasie A oraz wysyłającego dane do serwera LoRa, uruchomionego na urządzeniu Multitech czyli w układzie symulującym podłączenie zdalnej platformy czujnikowej do nadrzędnego układu BMS CHRONOMATIK™. Platforma czujnikowa została zasilona z kondensatora naładowanego do napięcia 5V przez wbudowaną w platformę czujnikową przetwornicę step-down TPS62745DSSR obniżającą napięcie zasilania do wartości 3,3V.

Praca ultraniskonapięciowej przetwornicy DC-DC LTC3108 z skonfigurowanym napięciem wyjściowym na poziomie 5V zapewnia (przy maksymalnym naładowaniu kondensatora o pojemności 0,33 F) wartość zgromadzonej energii elektrycznej na poziomie 4,125 J, a wartość energii elektrycznej dostępnej dla napięcia spadającego do minimalnej wartości operacyjnej 3,3 V wynosi 2,33 J. Przy konsumpcji energii przez platformę czujnikową LoRa na potrzeby jednego cyklu pomiarowego wynoszącą ok. 33 mJ i z pominięciem wpływu samorozładowania kondensatora teoretycznie wystarcza to na realizację ok. 70 cykli pomiarowo nadawczych.

11.8 Pomiar rzeczywistej wartości konsumpcji energii elektrycznej podczas cyklu pomiarowo nadawczego bezprzewodowej platformy czujnikowej w projektowanym układzie zasilania.

Jednym ze sposobów pomiaru rzeczywistej wartości konsumpcji energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze EDCL potrzebnej na zrealizowanie pełnego cyklu pomiarowego oraz wysłania danych przez platformę czujnikową do serwera LoRa jest pomiar spadku wartości napięcia na tym kondensatorze o znanej pojemności. Zgodnie z zależnością wyrażającą wartość energii zgromadzonej w kondensatorze $E = \frac{U^2 C}{2}$ wartość spadku napięcia kondensatora przy znanej jego pojemności odpowiada wartości spadku energii wymaganej na zrealizowanie cyklu pomiarowo nadawczego. Ilość energii pobranej z kondensatora zapewnia także pokrycie wszelkich strat energetycznych wynikających ze sprawności układu zasilania platformy czujnikowej w tym z największym udziałem strat przetwornicy DC-DC stabilizującej wartość napięcia zasilania na poziomie 3,3V (czyli napięcie zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej). Należy podkreślić, że kondensatory EDCL charakteryzują się znaczącą różnicą dynamiki samorozładowania, a zatem spadku ich napięcia w zależności od czasu ładowania ich napięciem zewnętrznym. Różnica szybkości samorozładowania kondensatorów EDCL w zależności od czasu polaryzacji ich napięciem zewnętrznym ma bardzo duże znaczenie dla układów harvestingu energii cieplnej, które pracując na źródłach odpadowej energii cieplnej o stałej wartości temperatury mogą przez długi czas ładować kondensator a następnie podczas braku źródła cieplnej energii odpadowej pracować przez długi czas wykorzystując tak zmagazynowaną energię. Na wykresie na Rys. 77. przedstawiono przykładowy przebieg zmian wartości prądu samorozładowania kondensatora EDCL w zależności od czasu ładowania go napięciem 5,5V [105].



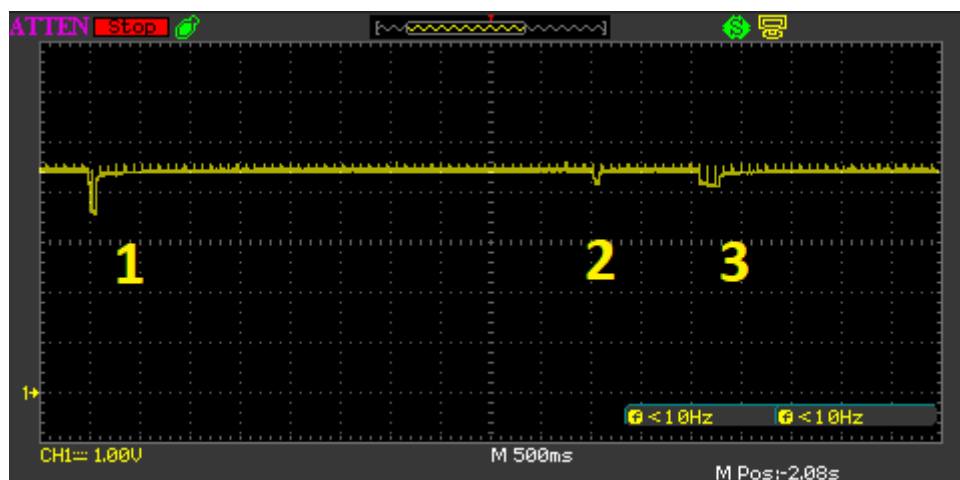
Rys. 77. Wartość prądu samorozładowania używanych kondensatorów EDCL w zależności od czasu ładowania kondensatora źródłem o napięciu 5,5V. [105]

Uwzględniając wpływ zależności przedstawionej na wykresie na Rys. 77. pomiary wykonano w dwóch znacząco różniących się momentach pracy superkondensatora jako magazynu energii dla układu zasilającego. Pierwszy - zasilając platformę czujnikową kondensatorem naładowanym do napięcia 5V i przy natychmiastowym wykorzystaniu energii z odłączonym źródłem harvestingowym oraz drugi – zasilając ją kondensatorem naładowanym do napięcia 5V, utrzymywanym wcześniej w stanie podłączonym do zewnętrznego źródła zasilania przez 72 h i wykonaniu cyklu pomiarowo nadawczym również przy odłączonym źródle termoharvestingowym (symulacja układu rzeczywistego ze stałym źródłem energii odpadowej o średniej mocy umożliwiającej utrzymywanie bufora energii w stanie naładowania do 5 V praktycznie przez cały czas).

Pierwszy pomiar wartości spadku napięcia kondensatora został zrealizowany z odłączoną przetwornicą (źródłem energii) bezzwłocznie po naładowaniu kondensatora do wartości napięcia 5V. Po wykonaniu jednego pełnego cyklu pomiarowo-nadawczego napięcie na kondensatorze spadło z 5 V do 4,975 V. Taka wartość spadku napięcia na kondensatorze o pojemności 0,33 F odpowiada wartości pobranej z niego energii równej 41 mJ. Tak oszacowana całkowita konsumpcja energii na poziomie 41 mJ uwzględnia wszystkie niekorzystne efekty jak np. prąd samorozładowania kondensatora. Należy zwrócić uwagę na to, że przy tak niekorzystnie krótkim okresie polaryzacji superkondensatora, przedstawiony na Rys. 77 prąd samorozładowania jest na poziomie 200 – 220 μA , co przy wartości napięcia kondensatora 5 V odpowiada mocy upływu ok. 1 mW. W efekcie podczas pojedynczego cyklu pomiarowo-nadawczego zdalnej platformy trwającego 10 sekund (pomiar, wysłanie danych

i oczekiwanie na odebranie danych czyli praca platformy czujnikowej LoRa w klasie A) wartość energii samorozładowania superkondensatora wynosi aż 10 mJ, natomiast konsumpcja energii przez platformę czujnikową LoRa to pozostałe 31 mJ.

Dla porównania drugi pomiar został zrealizowany z wykorzystaniem tego samego układu, natomiast w tym wypadku superkondensator był wstępnie polaryzowany źródłem zewnętrznym o napięciu 5V nieprzerwanie przez 72 godziny. W tym przypadku spadek napięcia po wykonaniu przez platformę czujnikową jednego cyklu pomiarowo- nadawczego wyniósł 0,015V. Obliczona wartość energii skonsumowanej na realizację pełnego cyklu pomiarowego wyniosła zatem ok. 33 mJ co idealnie zgadza się z wartością wyznaczoną doświadczalnie podczas badań konsumpcji energii przez platformę pomiarową opisanych w jednym z wcześniejszych rozdziałów dysertacji, dokładnie opisującym pracę platformy, a także wpływ warunków pracy na wartość konsumowanej przez nią energii.



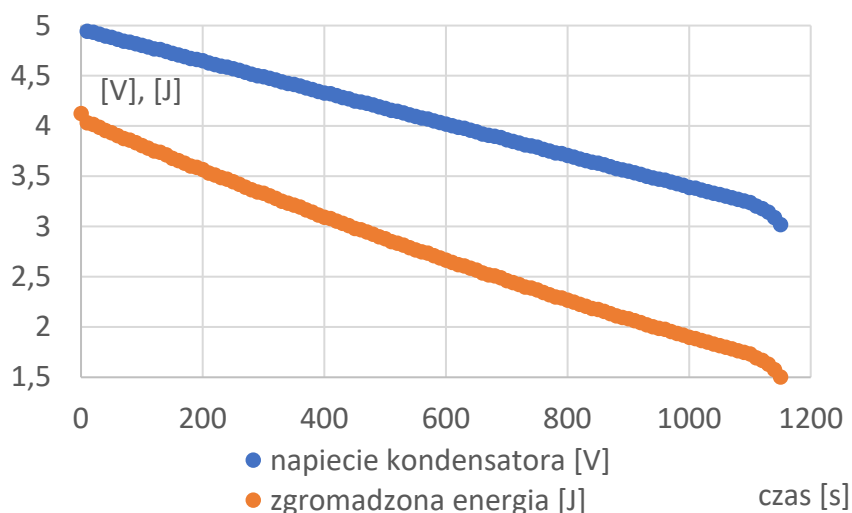
Rys. 78. Pomiar wartości napięcia zasilania platformy czujnikowej w trakcie jednego cyklu pracy (pomiar oraz wysyłanie danych podczas komunikacji LoRa w klasie A).

Na Rys. 78. przedstawiono przykładowy przebieg zmian wartości napięcia na superkondensatorze o pojemności 0,33 F zasilającym platformę czujnikową podczas jej bezbateryjnej pracy. Numerami 1,2,3 oznaczono charakterystyczne fazy pracy platformy czujnikowej. Zaznaczone krótkie zapady napięcia odpowiadają kolejnym etapom pojedynczego cyklu pracy bezbateryjnej platformy czujnikowej: 1 – wybudzenie procesora, pomiar i wysłanie danych, 2 i 3 – okno komunikacyjne czyli odpowiedź serwera LoRa przy komunikacji w klasie A.

Analizując zmiany napięcia na superkondensatorze podczas jednego cyklu pomiarowo-nadawczego przedstawionym na Rys. 78. widoczny jest znaczny - choć chwilowy - zapad napięcia podczas pierwszej fazy pracy platformy czujnikowej związanej z wybudzeniem procesora, wykonaniem pomiaru temperatury oraz wysłaniem danych drogą radiową. Zapad ten trwa zaledwie ok. 80 ms i dochodzi do ok. 800 mV. Zjawisko to jest związane z dużą dynamiczną rezystancją wewnętrzną ograniczającą wydajność prądową kondensatorów EDCL, w efekcie której następuje chwilowy, opisany spadek napięcia w chwili wysokiego poboru prądu przez platformę czujnikową. Jednak, jak widać na Rys. 78 nawet taki chwilowy zapad napięcia przy harvestingowym zasilaniu platformy z buforem energii w postaci superkondensatora EDLC nie jest dla niej groźny i nie wywołuje żadnych negatywnych skutków w jej działaniu i zapewnianiu danych pomiarowych niezbędnych dla systemu BMS CHRONOMATIK™.

Kolejnym etapem badań zmierzających do określenia rzeczywistej możliwości zasilania platformy czujnikowej z wykorzystaniem energii elektrycznej zmagazynowanej w kondensatorze EDCL było wykonanie pomiaru wartości napięcia na kondensatorze podczas wykonywania serii cykli pomiarowo-nadawczych przez platformę czujnikową LoRa. W celu znacznego ograniczenia wpływu efektu samorozładowania kondensatora EDCL platforma pomiarowa została przeprogramowana tak aby wykonywać cyklicznie pomiary co 12 sekund. Zużycie energii szacowano na podstawie zmian w czasie wartości napięcia na superkondensatorze.

Kondensator EDCL o pojemności 0,33F polaryzowany napięciem 5V przez 72 godziny został wykorzystany do zasilania platformy czujnikowej w sposób analogiczny do poprzednio opisanych badań. Na wykresie na Rys. 79. przedstawiono zmiany napięcia kondensatora podczas badań, a także obliczoną wartość zgromadzonej w nim energii elektrycznej. Przy napięciu o wartości 5V w kondensatorze zmagazynowano 4,125 J energii. Kondensator skutecznie zasilął platformę czujnikową (realizującą pomiary oraz wysłanie poprawnych ramek danych do serwera LoRa) aż do napięcia 3,1 V, przy którym w kondensatorze pozostała zmagazynowana energia 1,59 J. W efekcie podczas tego badania platforma czujnikowa wykorzystowała 2,54 J energii realizując przy tym 86 prawidłowych pomiarów oraz transmisji danych do serwera LoRa. Tym samym zużycie energii na wykonanie pojedynczego cyklu pomiarowo-transmisyjnego wyniosło w tym przypadku ok. 29,5 mJ.



Rys. 79. Pomiar napięcia oraz wyliczona wartość energii zgromadzonej w kondensatorze podczas prowadzenia cyklicznych pomiarów temperatury przez platformę czujnikową.

11.9 Podsumowanie.

W oparciu o przedstawione tu wyniki do dalszych badań układu harvestera energii cieplnej w warunkach operacyjnych wybrano bufor energii w postaci kondensatora EDCL o pojemności 0,33 F zapewniający wyważony kompromis pomiędzy czasem ładowania do wartości napięć zapewniających stabilną pracę platformy czujnikowej LoRa, a możliwym czasem zasilania platformy czujnikowej w stanach braku źródła odpadowej energii cieplnej. Jeżeli stabilne źródła odpadowej energii cieplnej w budynkach są dostępne przez dłuższy czas (minimum 4 - 6 godzin) superkondensator utrzymywany jest wtedy w korzystnym stanie pełnego naładowania co powoduje redukcję wartości jego prądu samorozładowania i pozwala zapewniać skuteczne zasilanie bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa nawet przez kolejną dobę już bez dostępu do źródła termicznej energii odpadowej. Dodatkowo wybór niewielkiego rozmiarowo kondensatora EDCL o pojemności 0,33 F zapewnia redukcję wymaganego miejsca w obudowie platformy czujnikowej, zajmując w efekcie (razem z przetwornicą LTC 3108) mniejszą ilość miejsca niż obecnie stosowany koszyk z dwoma bateriami Li-SOCl₂ o rozmiarze AA.

Przy wykorzystaniu źródła energii cieplnej zapewniającego napięcie wyjściowe termogeneratora na poziomie 100mV konsumpcja energii elektrycznej harvestera energii cieplnej przez platformę czujnikową wykonującą pomiary cykliczne co 15 minut jest

wielokrotnie mniejsza niż zdolność harwestera do pozyskiwania i magazynowania energii elektrycznej, w efekcie kompensując zużycie energii na cykl pomiarowy w czasie ok. 45 sekund co pozwala na utrzymanie superkondensatorowego magazynu energii w stanie pełnego naładowania bardzo korzystnym nie tylko z punktu widzenia dostępności dużej porcji energii ale również minimalizacji prądu upływu.

12 Badania harvestingowego zasilania platform czujnikowych w budynkach w warunkach przemysłowych.

12.1 Wstęp

Po przeprowadzeniu badań laboratoryjnych, w efekcie których dobrano elementy składowe układu oraz uruchomiono model harwestera odpadowej energii cieplnej zdolny zasilać bezprzewodową platformę czujnikową LoRa, kolejnym - ostatnim krokiem w tym obszarze badań było uruchomienie zasilanej w ten samowystarczalny, bezbaterijny sposób w pełni funkcjonalnej sieci LoRaWAN, analogicznej do tych z powodzeniem wdrażanych przez firmę KMB Grupa w przemysłowych systemach BMS CHRONOMATIK™. W tym celu jako źródło odpadowej energii cieplnej został wybrany fragment wspomianej już wcześniej instalacji odprowadzającej odpadowe ciepło ze sprężarki Atlas Copco GA 160 zainstalowanej w pomieszczeniu sprężarkowni w zakładzie produkcyjnym sprzętu AGD we Wrocławiu.

Kanały odprowadzające ciepło odpadowe ze sprężarek są standardowo szczelnie izolowane termicznie (izolacja wełną mineralną o grubości 50mm pokryta dodatkowo warstwą folii aluminiowej). Dlatego praktycznie jedynym miejscem umożliwiającym montaż harwestera energii cieplnej na kanale bez uszkodzenia warstwy izolacji termicznej był obszar obudowy przepustnicy zainstalowanej na kanale wentylacyjnym, która regulowała udział ciepłego powietrza odprowadzanego ze sprężarki w procesie ogrzewania hali produkcyjnej. Ze względu na zastaną architekturę budowy kanałów wentylacyjnych systemu odprowadzania ciepła, powietrze w miejscu dostępnym do montażu harwestera energii było nagrzewane na skutek pracy którejkolwiek z kilku sprężarek zainstalowanych w układzie (wybrano wspólny kolektor układu wentylacyjnego).

Zasadność oraz znaczenie pomiaru wartości temperatury powietrza w układzie odprowadzania ciepła odpadowego z instalacji sprężarek w zakładach produkcyjnych zostały opisane we wcześniejszym rozdziale doktoratu dotyczącym harvestingu energii cieplnej z instalacji odprowadzenia ciepła odpadowego ze sprężarek na potrzeby ogrzewania hali produkcyjnej. We wspomnianym rozdziale opisany został także system automatycznego sterowania udziałem ciepła odpadowego na cele ogrzewania pomieszczenia sprężarkowni i hali produkcyjnej, a także usuwania nadmiaru ciepła na zewnątrz obiektu oraz funkcje

spełniane przez czujniki temperatury powietrza w pomieszczeniu sprężarkowi (które we wcześniej opisanym rozwiązaniu realizują komunikację z systemem BMS CHRONOMATIK™ z wykorzystaniem połączeń przewodowych). Natomiast w tym rozdziale przedstawione zostaną wyniki badań skupiających się nad uruchomieniem bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa z w pełni samowystarczalnym, bezbaterijnym zasileniem harvestingowym, transmitującej dane do serwera systemu BMS CHRONOMATIK™.

12.2 Opis badań w budynku przemysłowym

W obiekcie przemysłowym – fabryce sprzętów AGD, zainstalowano przemysłową sieć komunikacji bezprzewodowej LoRaWAN wykorzystującą opisane w poprzednich rozdziałach urządzenia sieciowe (sterownik PLC WAGO, server LoRa Multitech Conduit).

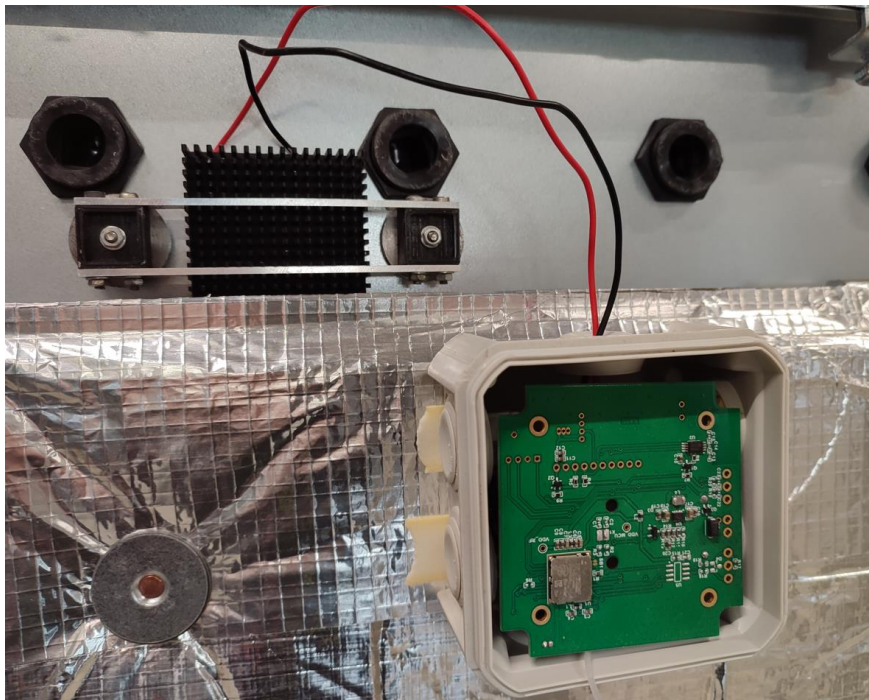


Rys. 80. Sprężarki podłączone do instalacji odprowadzania ciepła odpadowego z układu chłodzenia.

Bezprzewodowa sieć systemu BMS została połączona ze sterownikiem PLC WAGO 750-8202 (zabudowanym w rozdzielnicy automatyki w pomieszczeniu sprężarkowni) poprzez protokół komunikacyjny Modbus TCP/IP. Testowa platforma czujnikowa została zabudowana w hermetycznej puszcze elektroinstalacyjnej PVC i przymocowana do izolowanej części kanału odprowadzającego ciepło ze sprężarki. W puszcze elektroinstalacyjnej, pod widoczną na zdjęciu

na Rys. 80. platformą czujnikową została zabudowana ultraniskonapięciowa przetwornica LTC3108 wyposażona w kondensator EDCL o pojemności 0,33 F (tak jak w omówionym wcześniej układzie wykorzystywanym w badaniach laboratoryjnych).

Termosy TEC 12710 zostały zamocowane do stalowego kanału przepustnicy przy użyciu uchwytu z magnesami neodymowymi zapewniającego odizolowanie termiczne radiatora od obudowy przepustnicy. Opisany montaż przedstawiono na Rys. 81.

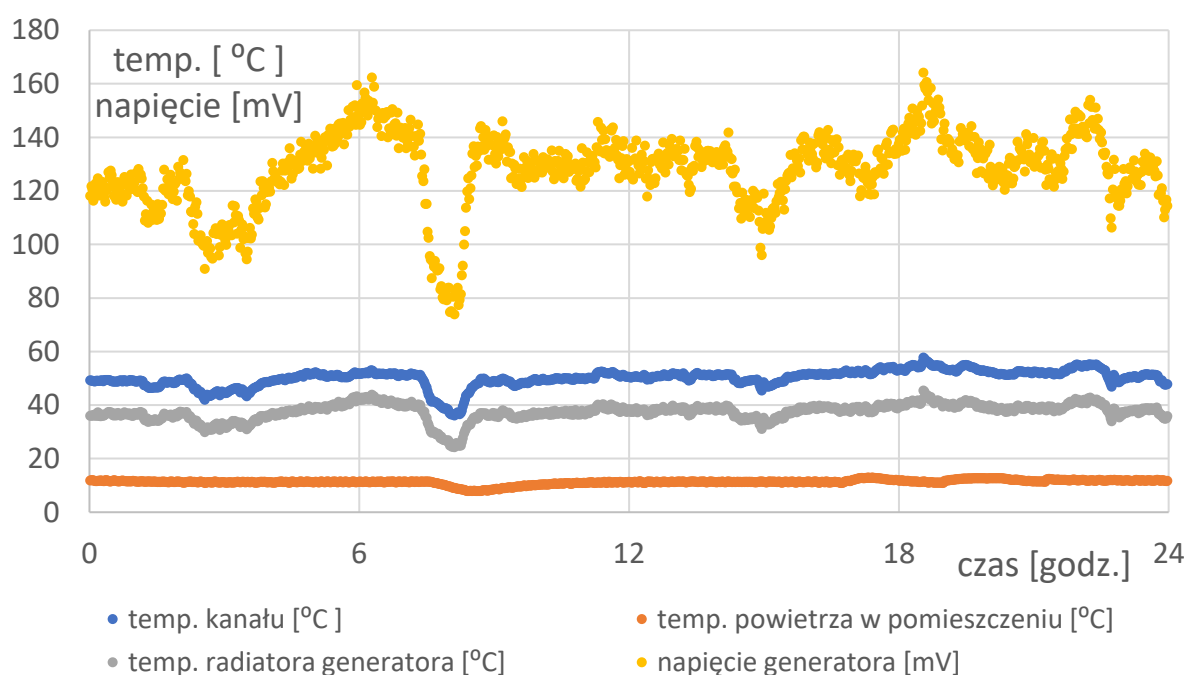


Rys. 81. Montaż termogeneracji na stalowej obudowie przepustnicy kanałowej wraz z przetwornicą LTC3108 i kondensatorem EDCL 0,33F zainstalowanymi w hermetycznej puszcze elektroizolacyjnej na izolowanej termicznie części kanału.

Przygotowany układ pomiarowy, pracujący w rzeczywistych warunkach przemysłowych po uruchomieniu realizował pomiar temperatury, skutecznie transmitował dane do serwera LoRa zainstalowanego w urządzeniu Multitech Conduit oraz udostępniał te dane do sterownika PLC za pośrednictwem protokołu Modbus TCP/IP symulując tym samym rzeczywistą pracę urządzeń w systemie BMS CHRONOMATIK™. Przedstawione rozwiązanie pracowało z bezbaterijnym zasilaniem nieprzerwanie przez miesiąc (luty 2023). W tym czasie w cyklicznych 15 minutowych odstępach wykonało 2 688 prawidłowych pomiarów oraz transmisji danych do serwera LoRa.

Ze względu na ciągły, trzymianowy charakter pracy zakładu produkcyjnego w lutym 2023, układ sprężarek realizował pracę zapewniając stałą, wysoka temperaturę kanału wentylacyjnego, dzięki czemu możliwe było przeprowadzenie ciągłych testów pracy bezbateryjnego układu zasilania platformy czujnikowej.

Podczas badań, w trakcie pracy układu system pomiarowy na kilka dni został wyposażony dodatkowo w przewodowe monitorowanie wartości napięcia generowanego przez przestawiony termoelektryczny harvester energii. Przykładowe dobowo rejestrowane wartości przedstawiono na Rys. 82. gdzie przebieg zaznaczony kolorem żółtym to napięcie wyjściowe termostosu obciążonego przetwornicą LTC3108, a przebieg niebieski, szary i pomarańczowy to odpowiednio temperatura kanału, radiatora termogeneratora i powietrza w jego otoczeniu. Dane te zostały zaimportowane wprost z serwera danych systemu BMS CHRONOMATIK™ pracującego na omawianym obiekcie przemysłowym wykorzystanym do omawianych testów.



Rys. 82. Dobowy przebieg napięcia generowanego przez harvester odpadowej energii cieplnej, wartości temperatury powierzchni kanału, radiatora układu harwestera oraz powietrza w pomieszczeniu.

Analizując przebiegi wartości mierzonych, kluczowych temperatur oraz poziomu napięcia generowanego przez termogenerator (czyli wartości napięcia wejściowego

przetwornicy LTC3108) widać silną korelację pomiędzy wartością napięcia generowanego a różnicą temperatur pomiędzy powierzchnią kanału wentylacyjnego a temperaturą otoczenia. Na przedstawionym na Rys. 82. wykresie widać także silne wzrosty wartości generowanego napięcia podczas dynamicznego wzrostu temperatury obudowy kanału – na przykład na skutek intensywnej pracy sprężarek bądź okresów zmian ich wydajności (prowadzących w efekcie do powstania dynamicznych zmian wartości temperatury). W trakcie miesięcznej rejestracji danych przez układ pomiarowy, rejestrowano także dane dotyczące wartości napięcia na kondensatorze EDCL magazynującym energię elektryczną na potrzeby zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej. Wartość mierzonego napięcia w trakcie badań (przy ciągłej pracy sprężarek) wynosiła 5 V i charakteryzowała się całkowitą odpornością na spadki napięcia generowane przez pracę zdalnej platformy czujnikowej.

Poza rejestracją danych związanych z działaniem układu zasilania platformy czujnikowej, podczas testów przeprowadzono również obserwacje dotyczące skuteczności pomiaru oraz transmisji danych bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa pracującej w trudnych warunkach przemysłowych, jakie panowały w pomieszczeniu sprężarkowni:

- Wysoka temperatura otoczenia - montaż wprost na kanale wentylacyjnym.
- Przemysłowy charakter środowiska pracy. Sąsiedztwo pracujących napędów falownikowych o dużej mocy elektrycznej (sprężarki o mocy elektrycznej 160 kW).
- Zmienne środowisko pracy. Występowanie wahań temperatury i wilgotności powietrza, występowanie wibracji mechanicznych.
- Trudne środowisko propagacji fal radiowych. Występowanie stalowych przegród (kanały wentylacyjne, konstrukcja pomieszczenia – występowanie stalowych antresoli pomiędzy platformą czujnikową, a gateway'em i serwerem LoRa).

Pomimo tak trudnego środowiska pracy zarówno termoharvesterowy układ zasilający jak również zasilana przy jego użyciu zdalna platforma pomiarowa z łącznością w standardzie LoRa pracowały bezawaryjnie przez cały miesięczny okres testów zapewniając w sposób nieprzerwany cyklicznie co 15 minut dane pomiarowe niezbędne do prawidłowej pracy systemu BMS CHRONOMATIK™.

12.3 Wnioski

Podczas trwających ponad miesiąc badań układu harvestera energii cieplnej zasilającego bezprzewodową platformę czujnikową zrealizowano z powodzeniem wszystkie wymagania stawiane układowi, związane z bezawaryjną, ciągłą i stabilną pracą. Potwierdzono tym samym słuszność i możliwość praktycznej realizacji koncepcji samowystarczalnego, bezbaterijnego zasilania platformy czujnikowej realizującej pomiar temperatury otoczenia (lub innych temperatur procesowych) z zastosowaniem harvestera energii cieplnej i magazynu energii elektrycznej w formie kondensatora EDCL. Zastosowane rozwiązanie zapewnia także skuteczne podtrzymanie pracy układu pomiarowego przy chwilowych zanikach źródła energii, w analizowanym przypadku nawet do 20 godzin.

Dodatkowo uzyskane znaczne przewymiarowanie termogeneratora jako źródła energii, pozwalające uzupełniać ilość energii skonsumowanej podczas jednego pełnego cyklu pomiarowo nadawczego platformy czujnikowej w czasie 45 sekund pozwala na znaczne, nawet 20-krotne zwiększenie częstotliwości wykonywania pomiaru oraz transmisji danych. W aspekcie zwiększania częstotliwości komunikacji należy jednak zwrócić uwagę na prawne ograniczenie zajętości otwartego pasma komunikacyjnego, wykorzystywanego w standardzie LoRa 868 MHz (standard w Europie) na poziomie zaledwie 1% czasu zajętości pasma. W bezprzewodowych sieciach LoRa złożonych z wielu, często nadających urządzeń czujnikowych może być to realnym ograniczeniem częstotliwości transmisji danych.

System automatycznej regulacji udziału ciepła odpadowego z instalacji chłodzenia sprężarek w procesie ogrzewania hali produkcyjnej pracuje w oparciu o szereg czujników temperatury, które z powodzeniem mogą być zasilane w sposób bezbaterijny co potwierdzono w wyniku badań opisanych w bieżącym rozdziale manuskryptu. Obecnie taka modyfikacja wdrożeniowa jest już w fazie planowania, niestety z terminem praktycznej implementacji już po zakończeniu mojego doktoratu.

Kolejną, realną możliwością wykorzystania nadwyżki energetycznej jest rozszerzenie platformy czujnikowej o dodatkowe rodzaje urządzeń peryferyjnych komunikujących się z wykorzystaniem złącz szeregowych, zaimplementowanych na płycie platformy czujnikowej (I²C, SPI i UART). Aby to zilustrować mogę ujawnić, że wśród wielu komercyjnych projektów zrealizowanych przez moją macierzystą firmę KMB Grupa z powodzeniem zaprojektowałem

i wykonałem instalację serii zdalnych platform czujnikowych pracujących w sieci LoRaWAN mierzących poziom stężenia dwutlenku węgla w powietrzu przy pomocy czujników Sensirion SCD30 [82]. Czujniki te komunikują się z platformą czujnikową za pośrednictwem interfejsu I²C i udostępniają dane pomiarowe o stężeniu CO₂ drogą radiową do serwera LoRa. Dla platform czujnikowych CO₂ wykorzystywanych we wspomnianym projekcie zmierzona wartość energii pobieranej przez nie przy zasilaniu bateryjnym czasie wykonywania pojedynczego pomiaru stężenia CO₂ wynosiła średnio 100 mJ. Wartość konsumpcji energii przez platformę czujnikową nawet na poziomie 100 mJ jest zatem nadal wartością umożliwiającą realizację tego typu zadań pomiarowo-nadawczych z wykorzystaniem w pełni bezbateryjnego zasilania opisanego w tym rozdziale.

Analiza wyników przeprowadzonych badań w odniesieniu do rozdziału rozprawy dotyczącego wpływu harvestingu energii cieplnej z układu chodzenia sprężarek na zwiększenie efektywności energetycznej budynku również potwierdza słuszność drugiej tezy doktoratu.

13 Opis budowy układu harvestera energii mechanicznej– przetwornica DC-DC i badania nad układem.

13.1 Wstęp

W kolejnym etapie badań nad możliwością pozyskiwania energii odpadowej wewnątrz budynków opracowano i uruchomiono stanowisko pomiarowe służące do badania skuteczności wykorzystania odpadowej energii mechanicznej pochodzącej z aktywności ludzi przebywających w budynku oraz przekształcenia jej na energię elektryczną przeznaczoną do bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych w systemie BMS CHRONOMATIK™. W tym celu przygotowano stanowisko laboratoryjne, za pomocą którego przeprowadzono badania miniaturowych silników elektrycznych pracujących jako mikrogeneratory energii elektrycznej.

Prowadzono badania nad możliwością odzyskiwania odpadowej energii mechanicznej wewnątrz budynku z wykorzystaniem licznych rodzajów oraz modeli silników prądu stałego oraz silników krokowych. Odrębnym, istotnym aspektem badań było także znalezienie optymalnej architektury układu przetwarzającego napięcie wyjściowe z takiego generatora elektromechanicznego na napięcie pozwalające zasilać bezprzewodowe platformy czujnikowe LoRa. Podczas badań opracowano różne strategie przetwarzania energii elektrycznej do wymaganych parametrów napięciowych.

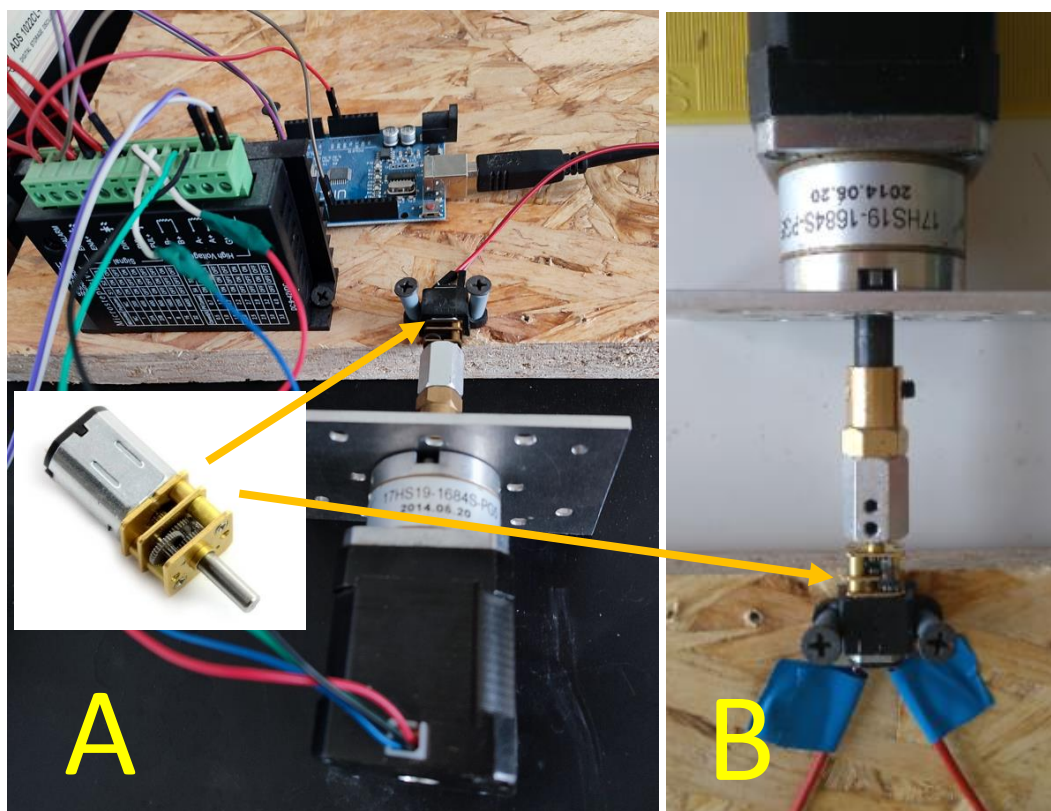
Pośród źródeł odpadowej energii mechanicznej dostępnych wewnątrz budynków wybrane zostały dwa. Skupiono się nad możliwością pozyskiwania energii mechanicznej z samozamykaczy drzwiowych oraz mechanizmów klamki w drzwiach wewnętrznych w budynku. Źródła te wybrano ze względu na ich powszechne występowanie w budynkach, zwykle centralne miejsce instalacji wewnątrz pomieszczeń oraz szacowany duży potencjał pozyskiwania ilości energii wystarczającej dla zasilania bezbateryjnych platform czujnikowych dla systemu BMS CHRONOMATIK™. Zbliżone rozwiązanie zostało co prawda opisane w literaturze przez Dale i współpracowników. W przytoczonym artykule wykorzystano jednak ruch obrotowy zawiasu drzwiowego drzwi wewnętrznych w budynku a energia elektryczna pozyskiwana z wykorzystaniem opisanego harvestera energii mechanicznej służyła do zasilania układów elektrycznych zamków drzwiowych w systemach kontroli dostępu

w budynkach. Z przedstawionych przez autorów badań wynika, że w podobnym rozwiązaniu zdolność generatorów energii mechanicznej w cyklu ruchu drzwi pozwala osiągać chwilowe moce elektryczne na poziomie od 6,5mW do nawet 0,53W w zależności od silnika elektrycznego wykorzystanego w roli generatora [106].

13.2 Badania laboratoryjne

Zaprojektowano stanowisko pomiarowe umożliwiające symulację obu wymienionych źródeł energii mechanicznej (klamka i samozamykacz drzwi) oraz pomiar generowanego napięcia w celu obliczeniowego oszacowania energii elektrycznej powstałej w trakcie cyklu pracy. Wykorzystując silnik krokowy z przekładnią planetarną 17HS19-1684S [107], sterownik silników krokowych typu DM542 [108] oraz platformę Arduino UNO zaprojektowano układ pomiarowy przedstawiony na Rys. 83. W układzie tym platforma Arduino UNO syntezuje przebieg impulsów o zmieniającej się w czasie częstotliwości. Impulsy te są następnie przekształcane przez sterownik DM542 na dwufazowe przebiegi sterujące silnikiem krokowym z przekładnią planetarną. Czasowy przebieg zmian częstotliwości impulsów sterujących jest dobierany tak aby obroty osi przekładni planetarnej ściśle odwzorowywały zmiany prędkości obrotowej osi samozamykacza drzwiowego lub klamki drzwiowej w czasie otwierania i zamykania drzwi oraz naciskania i ruchu powrotnego klamki.

W prowadzonych badaniach skupiono się nad wykorzystaniem komutatorowych mikrosilników prądu stałego serii N20-BT33 z wbudowaną przekładnią mechaniczną obniżającą prędkość obrotową wału silnika. Silnik taki zainstalowany na stanowisku testowym pokazano na Rys. 83. Dodatkowo przeprowadzono również liczne testy wielu innych rodzajów silników pracujących jako generatory energii elektrycznej. Badano między innymi silniki krokowe, które pracując w roli generatorów charakteryzują się jednak zmiennym, piłokształtnym przebiegiem generowanego napięcia, wymagającym dodatkowych prostujących układów elektronicznych w obwodach zasilania oraz charakteryzujących się większymi gabarytami od silników DC typu N20-BT33 [109].



Rys. 83. Stanowisko symulacyjne: A) Zdjęcie układu (silnik krokowy z przekładnią, sterownik silników krokowych, platforma Arduino UNO, B) mocowanie wału silnika N20-BT33 do wału silnika krokowego.

Inne testowane silniki prądu stałego to np. 24V silniki HG37-200-AB-00 NIDEC COMPONENTS [110] z przekładniami planetarnymi co prawda wyróżniały się wysoką wydajnością energetyczną w roli generatora, ale niestety miały niską wytrzymałość mechaniczną przekładni planetarnej (podczas testów wytrzymałościowych przekładnia planetarna ulegała uszkodzeniu po ok. 600 symulowanych cyklach pracy samozamykacza drzwi). W efekcie wstępnych testów związanych z wyborem silników elektrycznych pracujących w roli generatorów energii elektrycznej do dalszych badań wybrano właśnie silniki serii N20-BT33 z przekładniami mechanicznymi o różnym stopniu przełożenia.

W pierwszym etapie badając ruch rzeczywistych drzwi z zainstalowanym obrotowym samozamykaczem hydraulicznym wyznaczono prędkość ruchu wału samozamykacza. Podczas pełnego cyklu zamknięcia drzwi samozamykacz wykonuje swoją pracę w czasie ok. 4 – 6 s. Czas ten przyjęto na podstawie obserwacji pracy drzwi w budynkach biurowych wyposażonych w bardzo popularne samozamykacze produkcji firmy GEZE. W zależności od modelu samozamykacza, wagi skrzydła drzwi, regulacji siły hamowania samozamykacza i innych

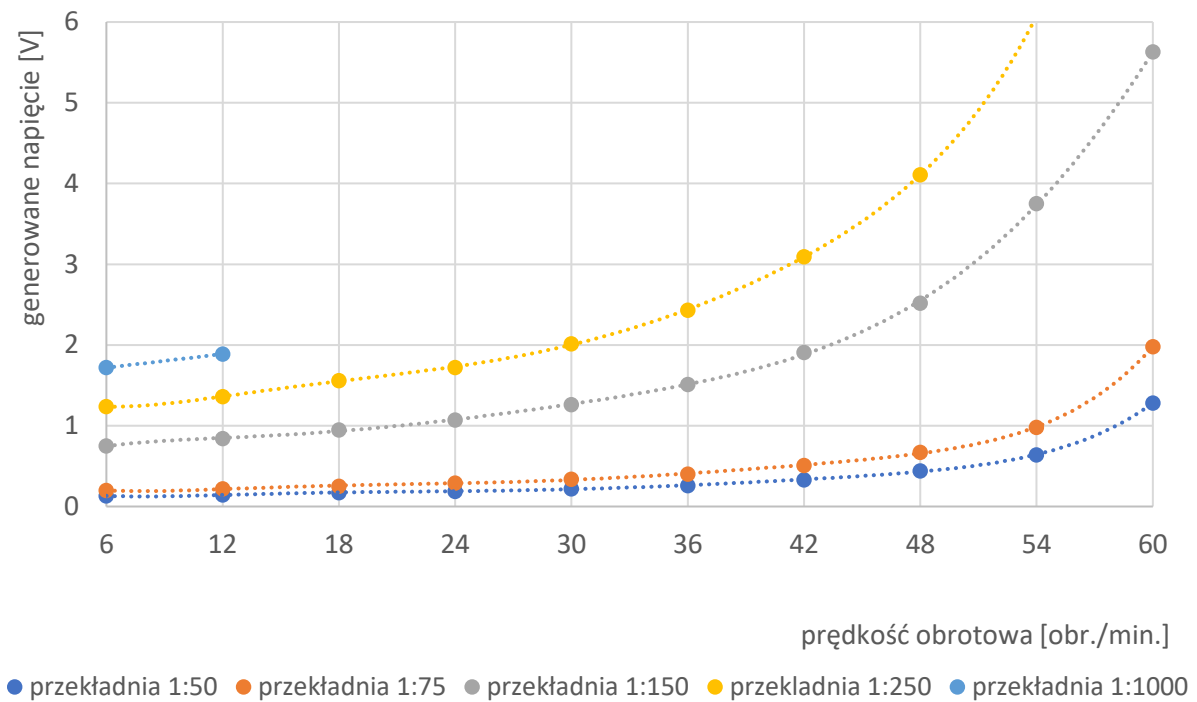
czynników czas ten może być oczywiście zmienny, jednak okres 4-6 s wydaje się być optymalny i bardzo często stosowany w praktyce. Obserwowano również kąt otwarcia drzwi, który w zdecydowanej większości przypadków jest bliski 90°. Na podstawie tych obserwacji stanowisko pomiarowe zaprogramowano w sposób umożliwiający odwzorowanie wyżej opisanego ruchu w postaci ¼ pełnego obrotu osi trwającego 6 sekund. Natomiast do symulacji pracy wału klamki w drzwiach wewnętrznych najpierw na podstawie zarejestrowanego oscyloskopowo przebiegu zmian napięcia generowanego przez mikrosilnik sprzęgnięty z rzeczywistą klamką określono średnią prędkość obrotową wału typowej klamki drzwiowej na poziomie 33 obr/min. Przygotowane w ten sposób stanowisko pomiarowe umożliwiała swobodne zadawanie prędkości obrotowej wału generatora symulujące rzeczywiste obroty wału samozamykacza lub osi klamki.

Podczas badań przeprowadzono testy generatorów energii elektrycznej z wykorzystaniem mikrosilników N20-BT33 z przekładnią zębatą o przełożeniu 1:50, 1:75, 1:150, 1:250 oraz 1:1000. Wszystkie badane silniki pracujące w roli generatora energii elektrycznej zostały dobrane z tej samej grupy produktowej – były to silniki o napięciu znamionowym 9 V DC serii HP, o wymiarach korpusu 24 mm x 10 mm x 12 mm. Wał silnika o średnicy 3mm w kształcie litery D pozwala na wykorzystanie ogólnie dostępnych sprzęgieł sztywnych jak i elastycznych umożliwiających pewne połączenie mikrosilnika-generatora ze źródłem energii mechanicznej. Na potrzeby laboratoryjnych badań efektywności energetycznej harwestera wykorzystano sztywne połączenie osi silnika z napędem na stanowisku symulacyjnym. W warunkach laboratoryjnych oś wału symulatora oraz oś wału generatora zostały wycentrowane eliminując powstawanie niekorzystnych momentów sił działających na wyjściowy wał przekładni, tym samym zagrażającym jej uszkodzeniu. Natomiast w warunkach przemysłowych do połączenia mechanicznego generatora z wałem źródła energii mechanicznej (samozamykacz) wykorzystane zostało kierunkowe sprzęgło elastyczne (co zostało szczegółowo opisane w jednym z następujących podrozdziałów).

13.3 Dobór przekładni generatora w zależności od aplikacji

W pierwszym etapie badań wyznaczono przebiegi wartości generowanego napięcia w zależności od prędkości obrotowej wału silnika. Przeprowadzono badania dla prędkości obrotowych od 6 do 60 obr/min a ich wyniki zilustrowano na Rys. 84. oraz w tabeli Tabela 7.

Dla silnika z przekładnią 1:1000 przeprowadzono badania tylko dla dwóch najniższych prędkości obrotowych 6 i 12 obr./min ze względu na duży stopień przełożenia, co przy wyższych prędkościach obrotowych pracy silnika w roli generatora spowodowałoby nadmierne obciążenie mechaniczne przekładni i mogłoby doprowadzić do jej uszkodzenia.



Rys. 84. Wartość generowanego napięcia na zaciskach silników N20-BT33 z przekładniami 1:50, 1:75, 1:150, 1:250 i 1:1000 pracujących z rozwartym uzwojeniem generatora (bez obciążenia).

Na podstawie przedstawionych charakterystyk napięciowych generatorów wyposażonych w przekładnie mechaniczne o przełożeniach od 1:50 do 1:1000 wytypowano te, które mogą zostać wykorzystane w harvesterach energii mechanicznej wewnątrz budynków wykorzystujących mechanizm samozamykacza drzwi, a także mechanizm klamki w drzwiach. Selekcję generatorów wykonano na podstawie wartości generowanego napięcia, przyjmując za kryterium wartość napięcia pracy wstępnie dobranych przetwornic tj. 380 mV (napięcie zimnego startu) dla przetwornicy AEM30940 [111] i 1V dla przetwornicy 134n3P [112]. W tabeli Tabela 7 wartości napięć generowanych przez mikrosilniki powyżej progowych wartości dla obu przetwornic oznaczono kolorowym tłem.

Tabela 7. Wartości napięcia generowanego przez silniki N20-BT33 w zależności od prędkości obrotowej wału generatora (na zielono zaznaczono wartości napięcia pracy dla przetwornicy AEM30940 uwzględniając jej „zimny start”, na szaro wartości napięcia pracy obu przetwornic AEM30940 i 134n3p).

prędkość obrotowa wału – obr./min.	wartość generowanego napięcia [V] dla silnika z przekładnią:				
	1:50	1:75	1:150	1:250	1:1000
6	0,13	0,20	0,75	1,24	1,72
12	0,14	0,22	0,84	1,36	1,89
18	0,17	0,25	0,95	1,56	
24	0,19	0,29	1,07	1,72	
30	0,22	0,34	1,26	2,02	
36	0,26	0,40	1,51	2,43	
42	0,33	0,51	1,91	3,09	
48	0,44	0,67	2,52	4,11	
54	0,64	0,98	3,75	6,08	
60	1,28	1,98	5,63		

13.4 Wybór przetwornicy napięcia

Podczas badań przeprowadzono również w warunkach laboratoryjnych próby uruchomienia układu zasilania harwestera energii mechanicznej z opisanymi powyżej silnikami pracującymi w roli generatorów napięcia stałego. Napięcia wyjściowe generowane przez mikrosilniki są zbyt niskie do bezpośredniego zasilania platform czujnikowych z łącznością w standardzie LoRa. W celu podniesienia tego napięcia do wymaganego poziomu zasilania (3,3V) przetestowano przetwornice DC-DC step up typu 134n3P oraz AEM30940. W przypadku układu AEM30940 wykorzystano płytkę ewaluacyjną produkcji firmy e-peas [113] pozwalającą na podnoszenie napięcia wejściowego w zakresie od 50mV do 5V podczas pracy ciągłej oraz wymagającej napięcia 380 mV podczas zimnego startu przetwornicy. Porównując istotne cechy w zakresie wykorzystania w przyszłym, komercyjnym rozwiązaniu opisanych harvesterów energii mechanicznej w układach zasilających bezprzewodowe platformy czujnikowe LoRa obie przetwornice charakteryzują się niedużymi wymiarami (odpowiednio 32 x 17 mm AEM 30940 i 18x 15 układ 134n3P) oraz podobną ceną.

Ze względu na wymaganą odporność układu na uszkodzenia mechaniczne oraz wymagany długi czas życia produktu docelowego (czyli minimalizowanie obciążeń mechanicznych przekładni mikrogenerators), we wszystkich prowadzonych badaniach wykorzystywano mikrogeneratory elektromechaniczne w postaci silników N20-BT33 z przekładnią podwyższającą obroty o możliwie najmniejszym przełożeniu, zapewniając tym samym najmniejsze wartości momentu siły działającej na każdy stopień przekładni, co pozytywnie wpływa na ich większą żywotność, minimalizując ich przedwczesne zużycie. W efekcie do badań harvestera energii mechanicznej z przetwornicą 134n3P dla samozamykacza drzwi wybrano mikrogenerator z przekładnią mechaniczną o przełożeniu 1:250 uzyskując napięcie na poziomie 1,24V dla ruchu ze średnią prędkością 6 obr./min natomiast dla harvestera energii mechanicznej dla układu klamki wybrano generator z przekładnią mechaniczną o przełożeniu 1:150 uzyskując napięcie na poziomie 1,26 V dla ruchu ze średnią prędkością 30 obr./min. Natomiast dla układu pracującego z przetwornicą AEM30940 wybrano mikrogeneratory z przekładnią 1:150 dla samozamykacza i z przekładnią 1:75 dla klamki.

13.5 Określenie wydajności energetycznej harvestera energii mechanicznej w warunkach laboratoryjnych

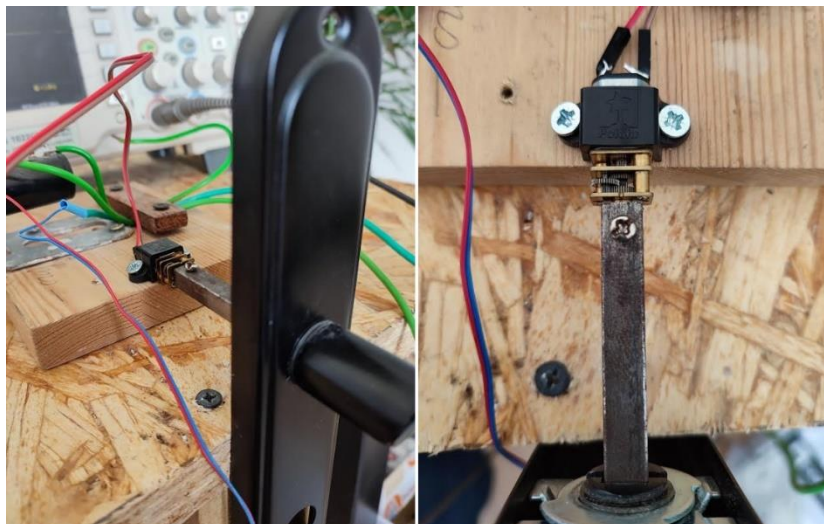
W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych określono wydajności energetyczne harvesterów energii mechanicznej skonstruowanych na bazie silników komutatorowych N20-BT33. W badaniach wykorzystano silniki z przekładniami o przełożeniu 1:75, 1:150 i 1:250 docelowo wybrane do użycia w opisanych układach odzyskujących energię mechaniczną. Podczas badań, do pomiaru wydajności energetycznej harvesterów wykorzystano wyżej opisane stanowisko testowe. Mierzono wartość generowanego napięcia, a także wykorzystując kondensator o znanej pojemności ilość pozyskiwanej przez harvester energii w postaci elektrycznej.

Najpierw przeprowadzono badania wydajności energetycznej harvestera energii mechanicznej pracującego z samozamykaczem drzwi. Używając kondensatora elektrolitycznego o pojemności 10000 μF w roli magazynu energii elektrycznej podłączonego bezpośrednio do silnika elektrycznego N20-BT33 z przekładnią 1:250 pracującego w roli generatora (to znaczy w układzie bez przetwornicy DC-DC step up) czas osiągnięcia

maksymalnego napięcia kondensatora wynoszącego 1,26V wynosi zaledwie 400 ms, gromadząc po tym czasie w kondensatorze 7,9 mJ energii. A zatem już w początkowej fazie ruchu powrotnego samozamykacza napięcie na magazynie energii w postaci kondensatora 10000 uF jest wystarczająco wysokie do uruchomienia zarówno przetwornicy 134n3p jak również przetwornicy AEM30940.

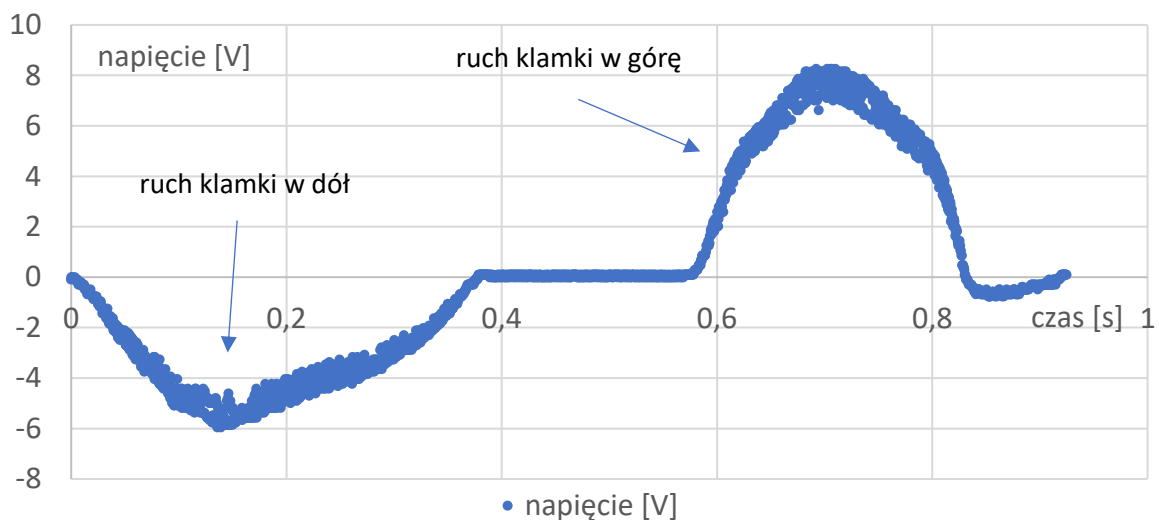
Podobne badania przeprowadzono dla harvestera energii mechanicznej pracującej na trzpieniu klamki. Silnik N20-BT33 z przekładnią 1:150 podczas pracy w roli generatora energii elektrycznej z prędkością obrotową 30 obr./min. generował moc chwilową o wartości 19,8mW. Przyjmując zmierzony czas ruchu klamki 200 ms w dół oraz 200 ms w górę, wartość pozyskanej energii elektrycznej wynosi 7,9 mJ dla całego cyklu pracy klamki góra-dół. Bazując na wynikach badań można zatem założyć, że dla pozyskania wystarczającej ilości energii dla skutecznego zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa z wykorzystaniem przetwornicy podnoszącej napięcie układ będzie musiał wykonać minimum 5 cykli pracy (przy założonej konsumpcji energii przez platformę czujnikową 33 mJ na jeden cykl pomiarowo-transmisyjny)

Podczas badań laboratoryjnych przeprowadzono także badania na rzeczywistej klamce drzwiowej. W tym celu zbudowano stanowisko z wykorzystaniem klamki połączonej z wałem silnika N20-BT33, co przedstawiono na Rys. 85.

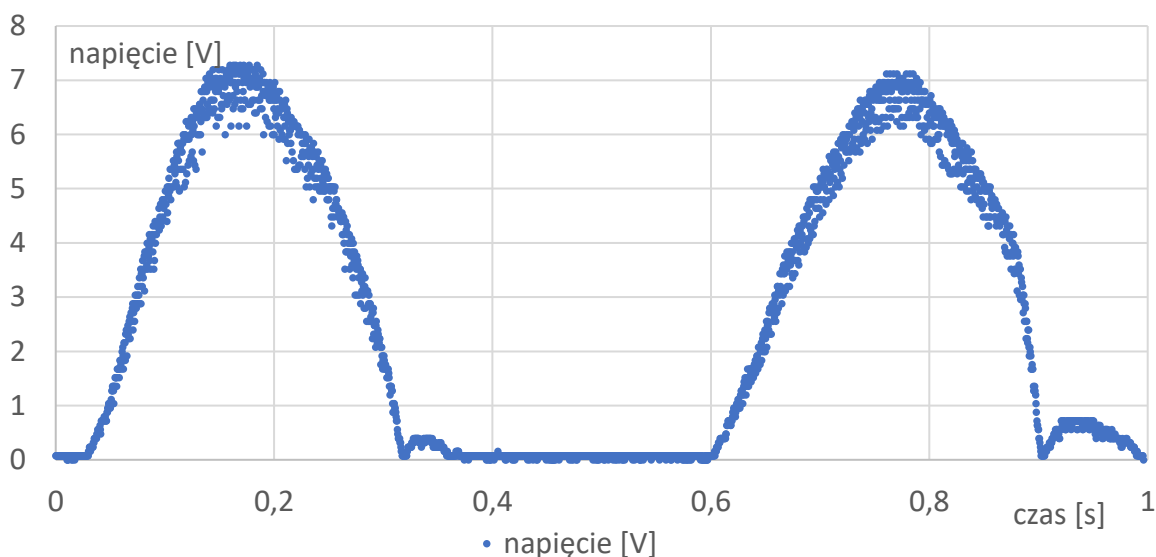


Rys. 85. Zdjęcie stanowiska pomiarowego harvestera energii mechanicznej – symulacja rzeczywistego ruchu klamki z wykorzystaniem w roli generatora silnika N20-BT33 z przekładnią 1:150.

Pełny ruch klamki dół-góra powoduje zmianę kierunku ruchu obrotowego trzpienia, w efekcie generowane napięcie zmienia polaryzację. Przebieg wartości napięcia generowanego podczas pracy takiego harvestera energii mechanicznej przedstawiono na wykresie na Rys. 86, na którym widoczna jest ta zmiana polaryzacji napięcia. Zmierzona wartość napięcia dotyczy pełnego ruchu klamki w zakresie 40° obrotu trzpienia klamki w dół i w górę. Ze względu na zmianę polaryzacji napięcia generowanego, układ zasilania został wyposażony w mostek Gretza, wykonany z wykorzystaniem czterech diod Schottky'ego charakteryzujących się niskim spadkiem napięcia w kierunku przewodzenia ($U_F = \text{ok. } 0,3 \text{ V}$). Podczas prowadzonych badań, przy naturalnym ruchu klamki zmierzona wartość szczytowa generowanego napięcia w rozwartym obwodzie zasilania waha się w zakresie 7,2V do 8,2 V w trakcie ruchu. Tak wysoka wartość generowanego napięcia związana jest z dużą dynamiką rzeczywistego ruchu klamki. Kształt przebiegu napięcia po zastosowaniu układu prostującego przedstawiono natomiast na Rys. 87.



Rys. 86. Przebieg napięcia generowanego przez mikrośilnik podczas ruchu klamki z rozwartym obwodem zasilania.

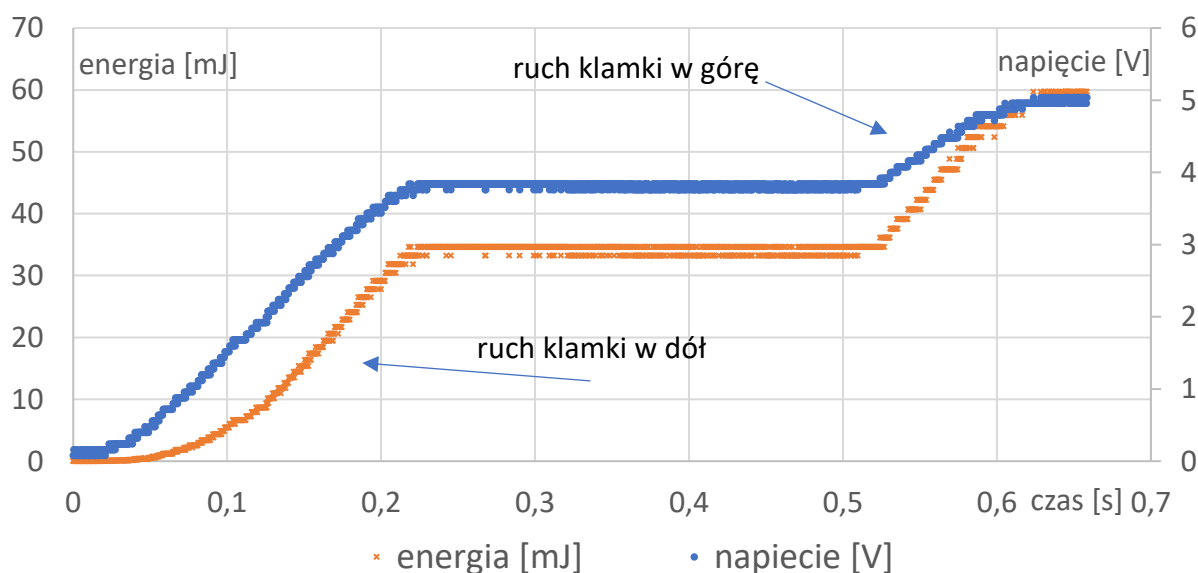


Rys. 87. Przebieg wartości napięcia generatora podczas ruchu klamki w układzie z prostownikiem mostkowym Gretza, z rozwartym obwodem zasilania.

Wyznaczając wartość energii elektrycznej pozyskiwanej podczas ruchu klamki przy użyciu kondensatora elektrolitycznego o pojemności 10000 μF , po wykonaniu pełnego ruchu klamki (dół – góra) zmierzona wartość napięcia na kondensatorze osiąga 3,4 V, w efekcie odpowiadając zgromadzonej energii na poziomie 61,3 mJ. Tym samym rzeczywista wartość energii zgromadzonej w kondensatorze jest ponad sześciokrotnie wyższa od wartości energii zmierzonej podczas badań laboratoryjnych przy stałej prędkości obrotowej 30 obr./min. Pomimo krótkiego czasu ruchu klamki, pozyskiwana wartość energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze jest wystarczająco duża aby wykonać niemal 2 cykle pomiarowo-nadawcze platformy czujnikowej LoRa (nie uwzględniając w obliczeniach sprawności przetwornicy i zakładając wykorzystanie całość energii zgromadzonej w kondensatorze).

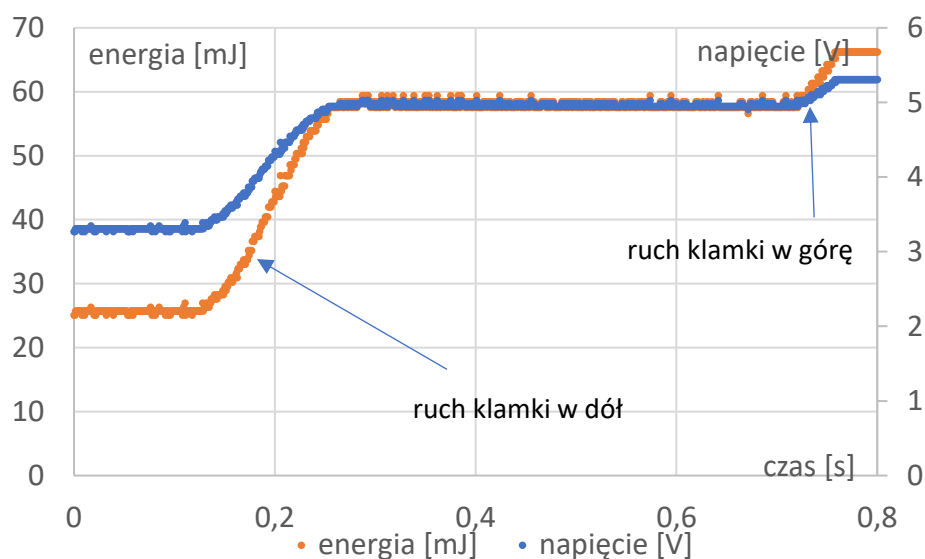
Bazując na zmierzonych wartościach generowanego napięcia oraz energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 10000 μF zdecydowano docelowy układ przetwarzania oraz magazynowania energii elektrycznej pozyskiwanej z wykorzystaniem harvestera energii mechanicznej (klamka) wykonać bez użycia przetwornicy. W związku z tym kluczowe było dobranie pojemności kondensatora magazynującego umożliwiającego gromadzenie wystarczająco dużej części energii elektrycznej (minimum 33 mJ – porcja energii

niezbędna do wykonania pełnego cyklu pomiarowo-nadawczego) powyżej granicznej wartości napięcia pracy platformy czujnikowej wynoszącego 3,3V. Do dalszych badań wykorzystano kondensator o mniejszej pojemności tzn. 4700 μF , dzięki czemu poniżej poziomu napięcia kondensatora 3,3V wartość zgromadzonej w nim energii to zaledwie 25,6 mJ, w efekcie powyżej wartości napięcia 3,3 V możliwe było zgromadzenie w kondensatorze energii na poziomie 35,7 mJ, a więc energii wystarczającej do wykonania jednego cyklu pracy platformy czujnikowej LoRa. Energia elektryczna magazynowana bezpośrednio w kondensatorze elektrolitycznym Low ESR o pojemności 4700 μF jest następnie wykorzystywana przez platformę czujnikową LoRa. Realizując cykl ładowania układu zaczynając z całkowicie rozładowanego kondensatora magazynującego energię elektryczną, podczas pracy harwestera energii mechanicznej (klamka) w trakcie 1 cyklu pracy osiąga wartość napięcia na poziomie 5,04 V co odpowiada zmagazynowanej energii elektrycznej o wartości 59,7 mJ. Przyrost zmierzonego napięcia kondensatora oraz przyrost obliczonej energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze przedstawiono na Rys. 88. (wartość energii zmagazynowanej w kondensatorze o pojemności 4700 μF przy napięciu 5,04V odpowiada wartości energii zmagazynowanej w kondensatorze o pojemności 10000 μF przy napięciu 3,45V).



Rys. 88. Przebieg wartości napięcia kondensatora magazynującego energię elektryczną harwestera energii mechanicznej (układ odzysku z mechanizmu klamki) oraz przebieg obliczonej wartości energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 4700 μF .

Przedstawiony sposób zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej, odpadającą energią mechaniczną pozyskiwaną z pominięciem użycia przetwornicy DC-DC umożliwia podniesienie efektywności energetycznej harwestera energii poprzez wyeliminowanie straty energii na rzecz pracy przetwornicy. Zastosowanie kondensatorów elektrolitycznych pozwala na utrzymywanie dolnego poziomu wartości napięcia powyżej 3,3V (napięcie pracy przetwornicy bezprzewodowej platformy czujnikowej) przez stosunkowo długi czas np. podczas braku aktywności osób w budynku podczas weekendu (zmierzony dobowy spadek napięcia dla kondensatora 4700uF wynosi poniżej 0,1V/24h). Praca układu harwestera energii mechanicznej z kondensatorem o pojemności 4700 μ F naładowanym do poziomu 3,3V generuje przyrost zmagazynowanej energii elektrycznej podczas jednego cyklu pracy na poziomie 41 mJ. Przyrost napięcia przy takim „gorącym” starcie harwestera (to znaczy z częściowo naładowanym kondensatorem) z poziomu 3,3V (co odpowiada energii 25,13 mJ zmagazynowanej w kondensatorze) do wartości 5,31 V (co odpowiada energii - 66,26 mJ zmagazynowana w kondensatorze) przedstawiono na wykresie na Rys. 89.



Rys. 89. przebieg wartości napięcia oraz energii zgromadzonej w kondensatorze elektrolitycznym o pojemności 4700 μ F podczas „gorącego” startu układu harwestera energii mechanicznej (klamka) dla kondensatora wstępnie naładowanego do wartości napięcia równej 3,3 V.

Opisany układ zasilania umożliwia zatem teoretycznie wykorzystanie nadwyżki energii elektrycznej (41 mJ) zgromadzonej w kondensatorze powyżej poziomu minimalnej wartości napięcia pracy przetwornicy TPS62745 (wbudowanej w układ zasilania bezprzewodowej

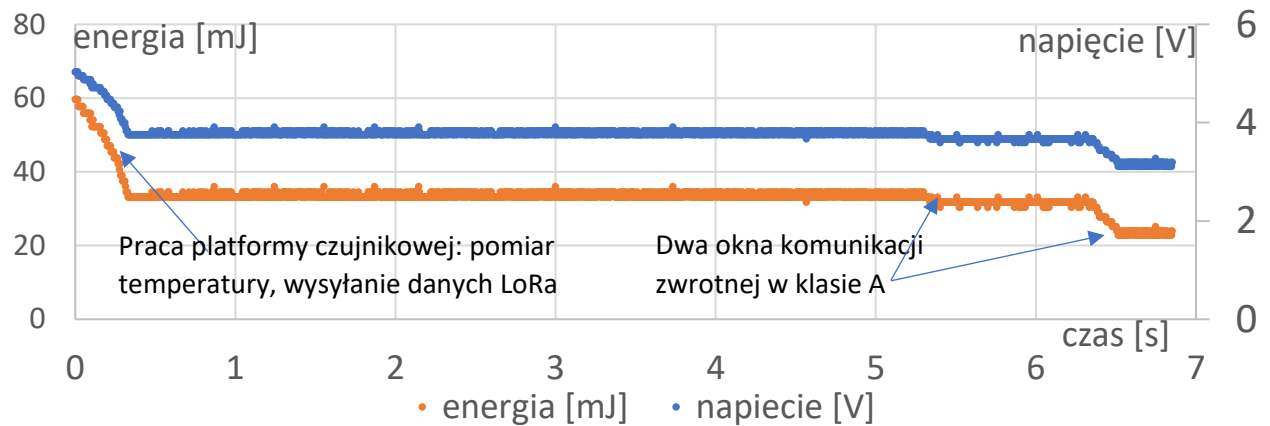
platformy czujnikowej LoRa) wynoszącej 3,3V i skuteczne zasilenie platformy czujnikowej podczas jednego pełnego cyklu jej pracy.

Dla obu sposobów ładowania kondensatora o pojemności 4700 μ F (wartość napięcia początkowego 0V i 3,3 V) wartość końcowa napięcia oscyluje w granicach 5V. Tym samym przyrost zgromadzonej energii w trakcie ładowania kondensatora jednym cyklem pracy generatora z poziomu 0V wynosi 66,2 mJ oraz 41,1 mJ przy ładowaniu kondensatora z poziomu napięcia 3,3 V. Zmierzone wartości napięcia w obu przebiegach ładowania kondensatora wskazują, że dla jednego cyklu ruchu klamki (dół, góra) maksymalna otrzymywana wartość napięcia kondensatora wynosi ok 5V i wynika z ograniczenia jakim jest wartość napięcia maksymalnego osiąganego przez generator energii elektrycznej oscylującego w granicach 7V – 8V dla rozwartego układu zasilania oraz w granicach 5V dla układu obciążonego układem prostownika (mostek Gretz'a) i kondensatorem.

13.6 Harvestingowe zasilanie bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa.

W kolejnym etapie badań w warunkach laboratoryjnych uruchomiono bezprzewodową platformę czujnikową LoRa, zasilaną tylko z wykorzystaniem energii zgromadzonej w kondensatorze elektrolitycznym o pojemności 4700 μ F, naładowanym do napięcia 5V po zaledwie jednym ruchu klamki przy użyciu opisanego wcześniej harwestera energii mechanicznej. W tym celu platformę czujnikową LoRa podłączono bezpośrednio do kondensatora magazynującego harwestera. W takich warunkach bezprzewodowa platforma czujnikowa z powodzeniem wykonała pełny cykl pomiarowo nadawczy z wykorzystaniem energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze. Na wykresie pokazanym na Rys. 90. przedstawiono przebieg wartości napięcia oraz obliczonej wartości energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze podczas pełnego cyklu pracy bezprzewodowej platformy czujnikowej zasilonej w ten bezbateryjny sposób. Pierwsze zbrocze spadku wartości napięcia kondensatora z poziomu 5,04 V do wartości 3,92 V (wiążące się ze zużyciem 23,6 mJ energii) związane jest z wybudzeniem procesora, pomiarem wartości temperatury otoczenia, uśpieniem procesora oraz wysłaniem paczki danych do serwera LoRa (przy użyciu komunikacji w klasie A protokołu LoRa). Następnie platforma czujnikowa LoRa w czasie dwóch okien komunikacyjnych odbiera dane z serwera LoRa a obsługa obu tych okien

komunikacyjnych konsumuje kolejne 8 mJ energii elektrycznej ustalając łączny koszt energetyczny przedstawionego cyklu pomiarowo nadawczego na poziomie 31,6 mJ, przy końcowej wartości napięcia kondensatora na poziomie 3,3 V.



Rys. 90. Przebieg wartości napięcia na kondensatorze o pojemności 4700 μ F oraz wyliczonej wartości zmagazynowanej energii elektrycznej w kondensatorze podczas zasilania platformy czujnikowej z zaznaczonymi spadkami napięcia w poszczególnych etapach pracy platformy.

13.7 Badania laboratoryjne harvestingu energii mechanicznej układu samozamykacza drzwi.

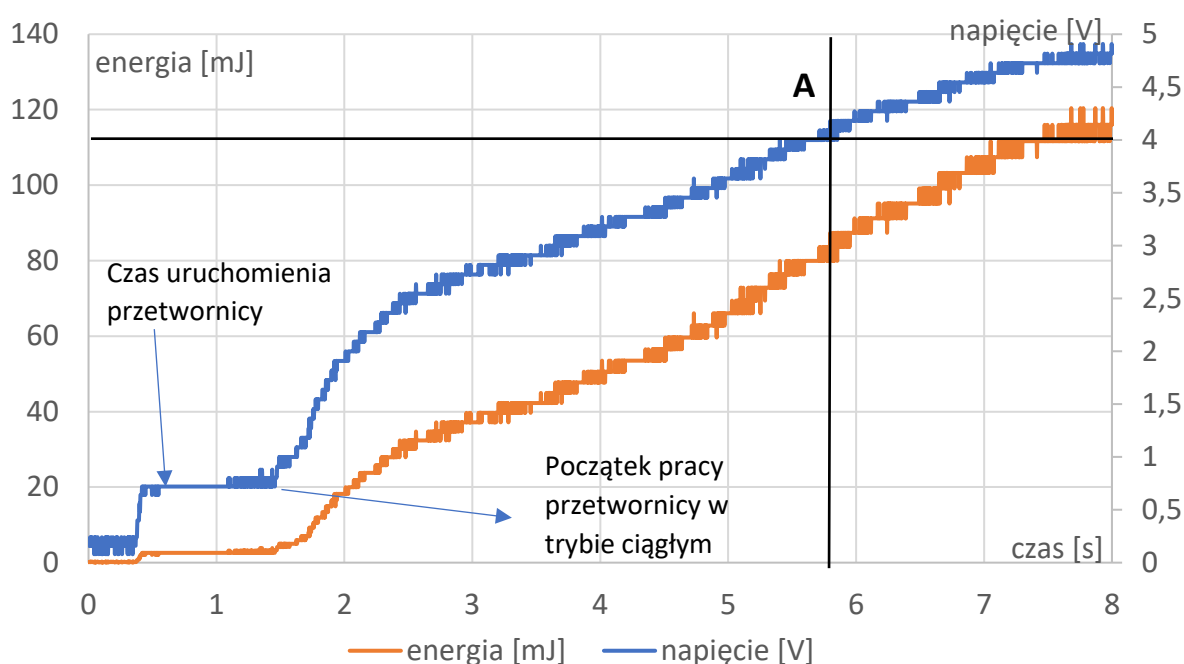
Drugim laboratoryjnie przebadanym źródłem energii mechanicznej dla układu harwestera energii był samozamykacz drzwi. W odniesieniu do wstępnych badań skupiających się nad wyborem generatora energii elektrycznej przedstawionych w poprzednim rozdziale manuskryptu wybrano silnik N20-BT33 z przekładnią 1:250 lub 1:150. Zmierzono największą chwilową moc generatora w warunkach laboratoryjnych na poziomie 20 mW, przy napięciu wyjściowym generatora na poziomie 1,24V, co odpowiada wartości energii otrzymywanej podczas jednego cyklu ruchu samozamykacza na poziomie 120 mJ dla generatora z przekładnią 1:250. Teoretycznie zatem powinna to być ilość pozyskiwanej energii zapewniająca prawidłową i stabilną pracę bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa. Ze względu na zbyt niskie napięcie, nie wystarczające do bezpośredniego zasilenia platformy LoRa w oparciu o wspomniane wcześniejsze badania wybrano przetwornicę DC-DC 134n3P podnoszącą wartość napięcia wejściowego od 1 V do wartości 5V oraz przetwornicę AEM30940 podnoszącą wartość napięcia wejściowego od 50 mV do 5V (przy „zimnym starcie” od 380 mV).

Ze względu na dużą ilość energii elektrycznej osiągającą wartość 120 mJ z jednego cyklu pracy samozamykacza z wykorzystaniem tylko ruchu powrotnego drzwi układ magazynowania energii został wyposażony w kondensator elektrolityczny o pojemności 10000 μ F umożliwiający przy naładowaniu go do napięcia 5V (maksymalne napięcie wejściowe wybranych przetwornic) zmagazynowanie energii elektrycznej o wartości 125 mJ, tym samym zapewniając możliwość odbioru całości wygenerowanej przez harvester energii elektrycznej w trakcie jednego pełnego cyklu pracy (czyli otwarcia i zamknięcia drzwi).

Wykorzystując omówione wcześniej stanowisko laboratoryjne układ harvestera energii mechanicznej z samozamykaczem drzwi został poddany badaniom zmierzającym do określenia wydajności napięciowej pozwalającej na pracę dobranej przetwornicy, a także możliwości stabilnego zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej. Stanowisko symulacyjne zostało skonfigurowane do pracy z prędkością obrotową 6 obr./ min. Zastosowanie takiej prędkości obrotowej samozamykacza drzwi w ruchu powrotnym wynikała z testów doświadczalnych przeprowadzonych dla samozamykacza zainstalowanego na drzwiach docelowo wybranych jako późniejsze testowe środowisko przemysłowe pracy harvestera energii mechanicznej. Znajdowało się ono na drzwiach wejściowych do magazynu firmy KMB Grupa wyposażonych w przykładowy samozamykacz GEZE model TS 2000 [114] z regulowaną prędkością zamykania drzwi - jest to model samozamykacza powszechnie montowany w biurach i budynkach technicznych. Wybrane do późniejszych badań połowych drzwi zewnętrzne, otwierane na zewnątrz zapewniały maksymalne wychylenie kątowne skrzydła drzwi do ok. 120°. Zatem opisywane tu badania laboratoryjne obejmowały czas trwania ruchu 7 sekund co pokrywało się z czasem powrotnego domknięcia drzwi otwartych w zakresie ok 100°. Z obserwacji oraz charakteru pracy wspomnianych drzwi testowych (były to drzwi zewnętrzne do magazynu technicznego często używane do wnoszenia większych przedmiotów, narzędzi, itp.) przyjęto taki zakres kątowny otwarcia drzwi jako typowy.

Podczas opisanych wcześniej badań harvestera energii mechanicznej bez podłączonej przetwornicy napięcia przy zasilaniu kondensatora magazynującego energię elektryczną o pojemności 10000 μ F bezpośrednio z generatora pracującego z prędkością obrotową 6 obr./min wartość napięcia 1,24V na kondensatorze została osiągnięta w zaledwie 400ms od początku ruchu co wiązało się ze zgromadzeniem energii elektrycznej o wartości 7,7mJ.

Kolejnym etapem badań było zatem określenie szacunkowej ilości energii elektrycznej magazynowanej podczas jednego cyklu domykania drzwi z wykorzystaniem przetwornicy napięcia step-up DC-DC 134n3P. Układ elektryczny składający się z przetwornicy oraz kondensatora magazynującego 10000uF podłączonego na jej wyjściu został podłączony do mikrogeneratora elektromechanicznego na stanowisku testowym. Podczas pracy układu symulującego ruch powrotny samozamykacza drzwi zarejestrowano przebieg napięcia na kondensatorze, a także wyznaczono wartość energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze podczas takiego jednego cyklu pracy układu harvestingu energii mechanicznej. Przebieg tych wartości przedstawiono na wykresie na Rys. 91.



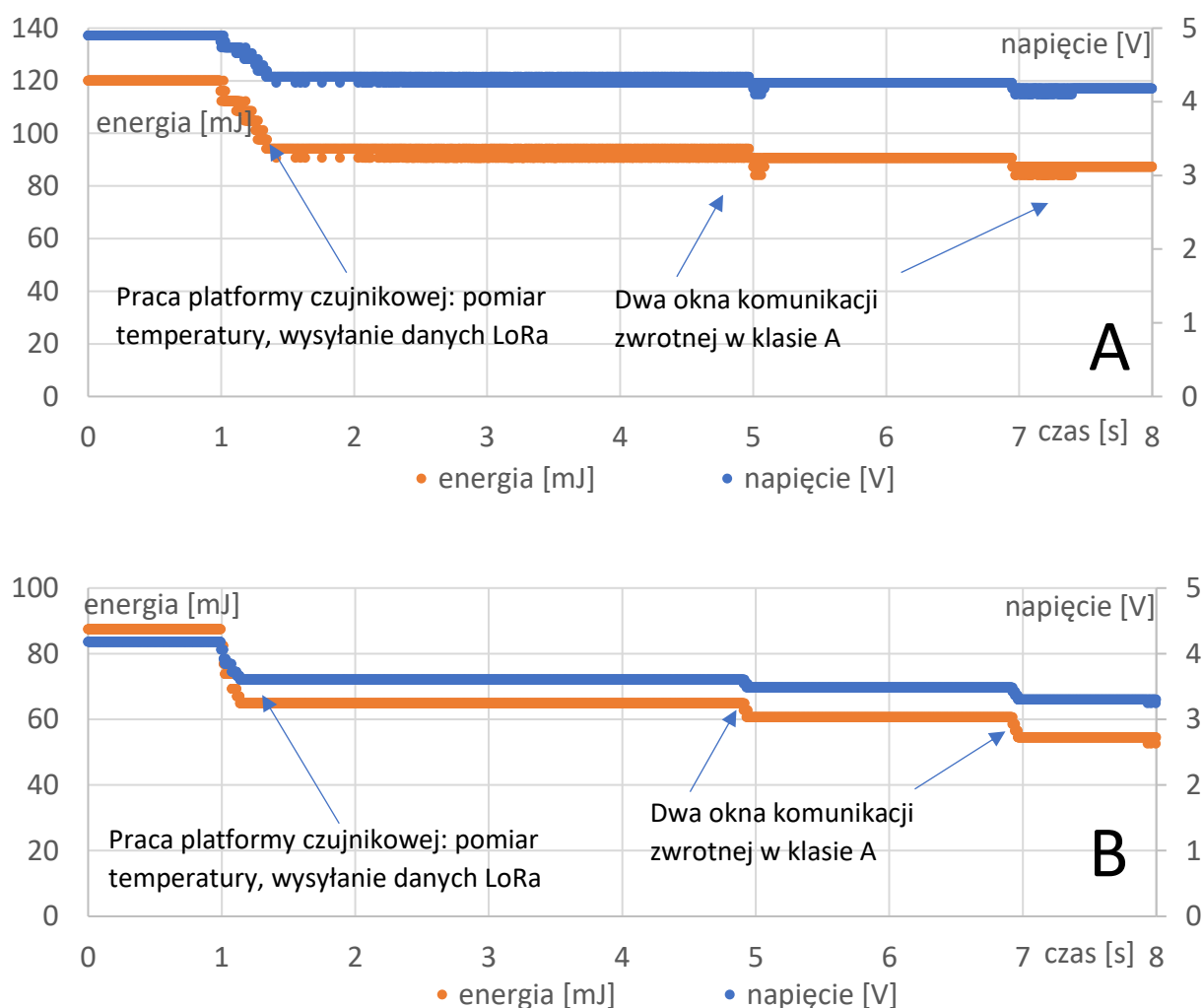
Rys. 91. Przebieg wartości napięcia kondensatora magazynującego energię elektryczną harvestera energii mechanicznej (układ odzysku z mechanizmu samozamykacza) oraz przebieg obliczonej wartości energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 10000 μ F.

Analizując zmiany wartości napięcia na kondensatorze magazynującym energię elektryczną na potrzeby zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa w trakcie jednego cyklu zamknięcia drzwi widać, że wartość napięcia maksymalnego osiąganego przez przetwornicę wynosi 4,9V i jest osiągnięta po pełnym cyklu pracy układu harvestingowego. Przedstawiony na Rys. 91 wykres przebiegu zmian napięcia i energii zgromadzonej w kondensatorze 10000uF został przesunięty na osi czasu o 350 ms, z uwagi na zwiększenie czytelności pierwszej fazy pracy przetwornicy. Dodatkowo na wykresie zaznaczono punkt A,

znajdujący się na przecięciu osi czasu w momencie trwania ruchu ok. 5,5 s. oraz wartości napięcia kondensatora 4,2 V dla którego obliczona wartość zgromadzonej w kondensatorze energii wynosi 88 mJ. Punkt ten określa chwilę, w której energia zmagazynowana w kondensatorze jest wystarczająca do wykonania pełnego cyklu pomiarowo nadawczego przez bezprzewodową platformę czujnikową LoRa, przy zakładanym koszcie energetycznym o wartości ok. 33 mJ i jest równa wartości energii zgromadzonej w kondensatorze w zakresie różnicy napięć pomiędzy 3,3 V (minimalne napięcie pracy platformy czujnikowej) a 4,2 V.

Przedstawiony na wykresie na Rys. 91. przebieg dotyczy uruchomienia przetwornicy DC-DC 134n3P dla całkowicie rozładowanego kondensatora magazynującego energię elektryczną (czyli jej tzw. „zimny start”). Widoczne są na nim dwa charakterystyczne etapy pracy części mikroelektronicznej takiego układu harvestingowego. W takim scenariuszu pracy harwestera energii pierwszy etap związany jest z uruchomieniem przetwornicy DC-DC 134n3P i ładowaniem jej pojemności wewnętrznych. Zajmuje on ok. 1 sekundy początkowego czasu pracy harwestera i objawia się utrzymywaniem na wyjściu przetwornicy praktycznie stałego napięcia o wartości ok. 0,75 V. Po tym wstępnym etapie następuje dynamiczny przyrost napięcia na wyjściu przetwornicy, a tym samym przyrost energii gromadzonej w kondensatorze na jej wyjściu. Napięcie na kondensatorze na skutek pracy przetwornicy DC-DC osiąga ostatecznie wartość 4,9 V co odpowiada zmagazynowanej energii 120 mJ.

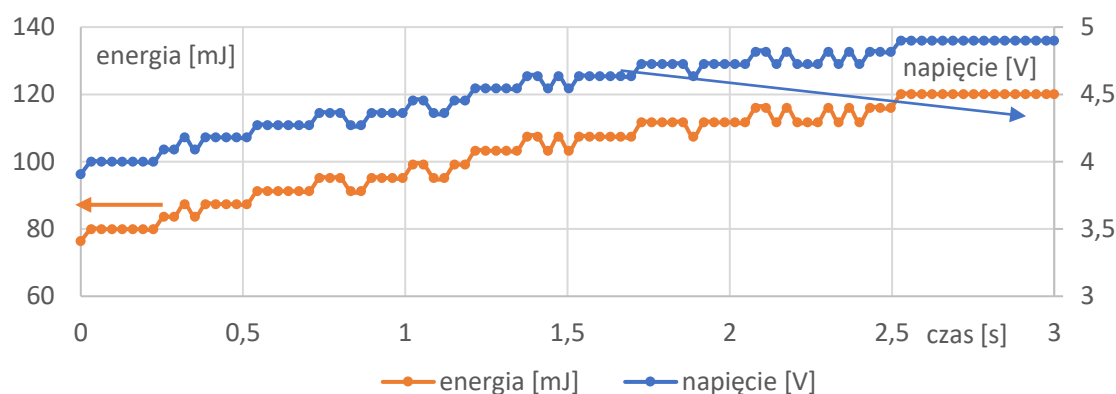
W trakcie jednego cyklu pracy bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa zasilanej omawianym harvesterem energii mechanicznej napięcie na kondensatorze 10000uF spada z poziomu 4,9 V do poziomu 4,2 V. W rezultacie możliwe jest wykonanie przez platformę czujnikową dwóch cykli pomiarowo nadawczych przy każdym cyklu zamknięcia drzwi i użyciu jako magazynu energii kondensatora o pojemności 10000 μ F. Drugi cykl pomiarowo nadawczy redukuje napięcie kondensatora do wartości 3,3 V. Na Rys. 92 przedstawiono przebieg napięcia na kondensatorze oraz energii elektrycznej w nim zgromadzonej podczas pierwszego cyklu pomiarowo nadawczego platformy czujnikowej – wykres A oraz podczas drugiego cyklu pomiarowo nadawczego-platformy czujnikowej – wykres B.



Rys. 92. Przebieg wartości napięcia na kondensatorze harwestera energii mechanicznej oraz wyliczona wartość zmagazynowanej energii elektrycznej podczas zasilania platformy czujnikowej z zaznaczonymi spadkami napięcia w wyniku pracy platformy czujnikowej: A) pierwszy cykl pomiarowo-nadawczy, B) drugi cykl pomiarowo-nadawczy.

Podczas badań laboratoryjnych zarejestrowany został także przebieg zmian napięcia kondensatora 10000uF podczas jego kolejnego ładowania w trybie pracy zasilania platformy czujnikowej po wykonanym przez nią cyklu pomiarowo nadawczego (jest to zatem przypadek „gorącego” startu układu harwestera i platformy, gdy pojemności wewnętrzne przetwornicy dc-dc są już naładowane). Jest to typowy scenariusz pracy układu harvestingowo-czujnikowego w rzeczywistych warunkach przemysłowych, w których po wykonanym pomiarze warunków środowiskowych i przesłaniu danych do serwera LoRa, w trakcie piętnastominutowego okresu uśpienia czujnika nastąpi doładowanie kondensatora. Taki przebieg pracy harwestera dla wartości początkowego napięcia na kondensatorze 10000uF

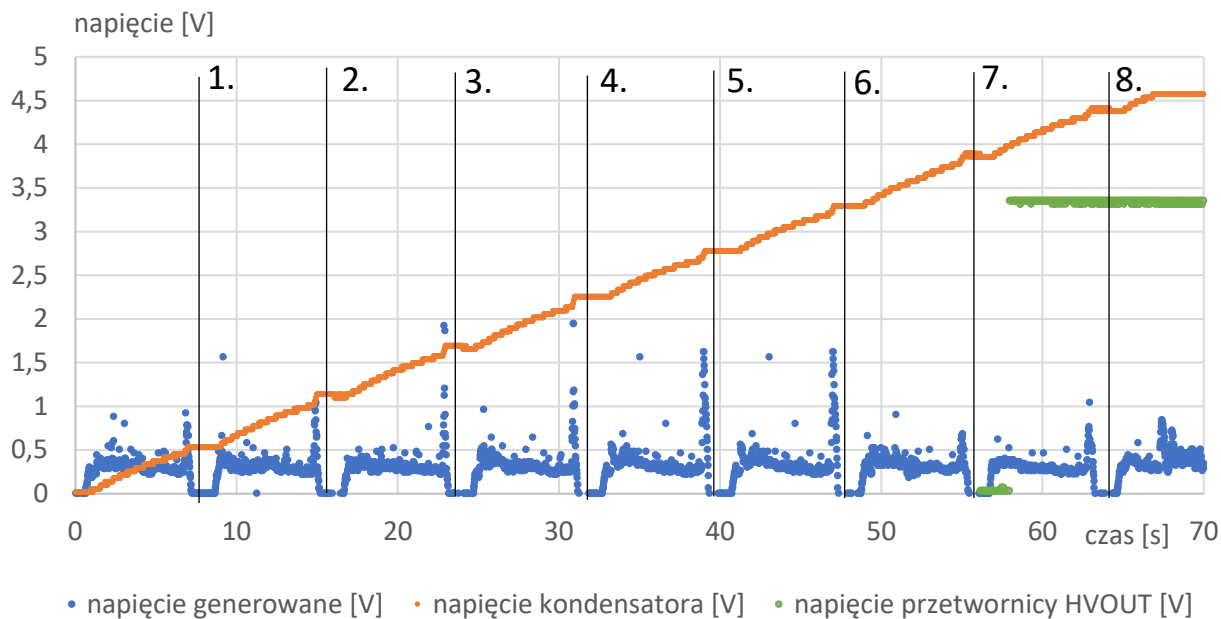
równego 3,9 V do wartości napięcia maksymalnego generowanego z wykorzystaniem przetwornicy 134n3P (4,9V) przedstawiono na Rys. 93.



Rys. 93. Przebieg wartości napięcia na kondensatorze magazynującym energię elektryczną harwestera energii mechanicznej (układ odzysku z mechanizmu samozamykacza) oraz zmiany energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 10000 μ Fw zakresie napięć 3,9V -4,9V.

Przebieg ładowania kondensatora z poziomu napięcia początkowego 3,9 V do wartości napięcia maksymalnego 4,9V realizowany jest w trakcie już pierwszych 2,5 sekund trwania ruchu powrotnego samozamykacza drzwi. Wartość energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze w tym czasie wzrasta z wartości 76 mJ do wartości 120 mJ co stanowi wzrost o 44 mJ. Przyjmując stałą wydajność energetyczną układu harwestera energii w trakcie takiej pracy, można wyznaczyć średnią moc elektryczną badanego układu jako równą 17,6 mW.

Podobne badania przeprowadzono również dla układu harwestera wyposażonego w przetwornicę AEM30940. W badaniach wykorzystano platformę ewaluacyjną e-peas. W trakcie badań z użyciem samozamykacza GEZE oraz silnika N20-BT33 w roli generatora mierzono wartość napięcia na wyjściu generatora podłączonego do wejścia przetwornicy (wejście oznaczone SRC) oraz wartość napięcia kondensatora o pojemności 10000 μ F podłączonego do wyprowadzenia przetwornicy oznaczonych BATT . Badania przeprowadzono z użyciem całkowicie rozładowanego kondensatora magazynującego energię elektryczną i pozostałych pojemności w układzie, wymuszając tym samym „zimny start” przetwornicy. Na Rys. 94. przedstawiono przebieg ładowania kondensatora do maksymalnej wartości napięcia osiąganego na połączeniach BATT przetwornicy, wynoszącego 4,58V. Układ harwestera energii z samozamykaczem w warunkach laboratoryjnych wymagał ośmiu cykli ruchu do pełnego naładowania kondensatora magazynującego energię elektryczną.



Rys. 94. Przebieg wartości napięcia na kondensatorze magazynującym energię elektryczną harwestera energii mechanicznej (układ odzysku z mechanizmu samozamykacza) oraz zmiany energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności $10000\mu\text{F}$ w zakresie napięć $0\text{V} - 4,58\text{V}$.

Każdy cykl pracy generatora powodował przyrost wartości napięcia w kondensatorze o ok. $0,55\text{ V}$, aż do pełnego naładowania kondensatora do napięcia $4,58\text{V}$ co odpowiada zgromadzonej energii na poziomie $104,9\text{ mJ}$. Opisane powyżej zjawisko związane jest ze stałoprądowym charakterem pracy przetwornicy. Z uwagi na geometryczny przyrost energii zgromadzonej w kondensatorze w stosunku do liniowego przyrostu wartości napięcia kondensatora, pierwsze cykle ruchu generatora charakteryzują się bardzo niską wydajnością energetyczną odpowiednio $1,46\text{ mJ}$ dla pierwszego cyklu i $5,04\text{ mJ}$ dla drugiego cyklu, narastająco aż do $23,57\text{ mJ}$ dla cyklu ósmego. Porównanie przyrostu wartości napięcia kondensatora oraz zgromadzonej energii elektrycznej w kondensatorze przedstawiono w tabeli Tabela 8.

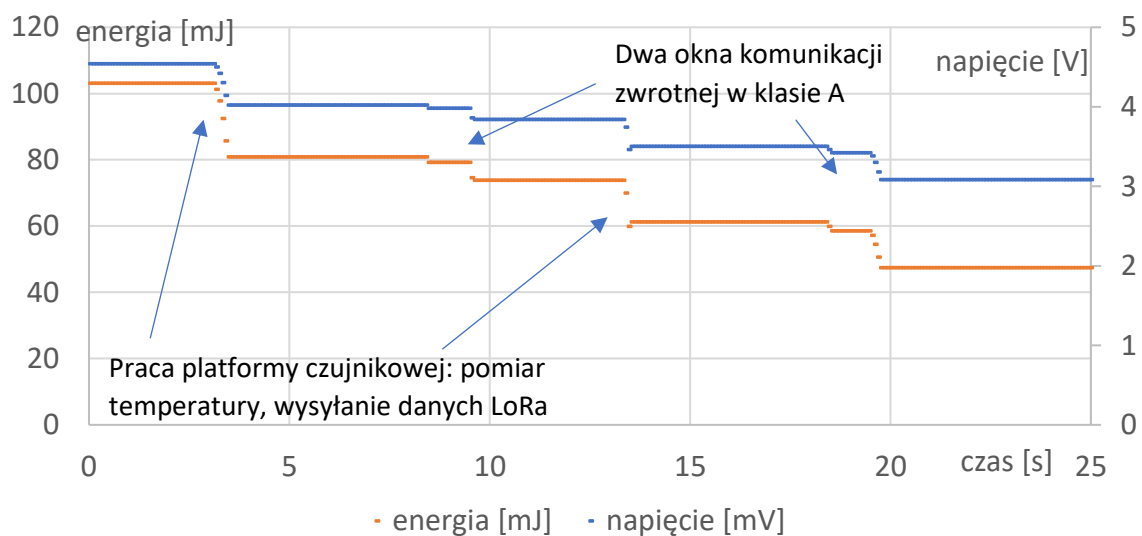
Tabela 8. przyrost wartości napięcia oraz zgromadzonej energii w kondensatorze dla każdego cyklu pracy generatora.

Numer cyklu pracy generatora	Napięcie kondensatora [V]	Przyrost napięcia kondensatora [V]	Energia zgromadzona w kondensatorze [mJ]	Przyrost energii zgromadzonej w kondensatorze[mJ]
1	0,54	0,54	1,46	1,46
2	1,14	0,60	6,50	5,04
3	1,70	0,56	14,45	7,95
4	2,26	0,56	25,54	11,09
5	2,78	0,52	38,64	13,10
6	3,30	0,52	54,45	15,81
7	3,85	0,55	74,11	19,66
8	4,42	0,57	97,68	23,57
9	4,58	0,16	104,88	7,20

Graniczna, minimalna wartość napięcia kondensatora pozwalająca na uruchomienie zdalnej platformy czujnikowej i wysłanie danych do serwera LoRa dla badanego układu wynosi 4,16 V, przy której wartość zgromadzonej energii w kondensatorze o pojemności 10000 μF osiąga wartość 86,5 mJ co przekłada się na różnicę energii o wartości 32 mJ w stosunku do wartości napięcia granicznego pracy zdalnej platformy czujnikowej przy wartości napięcia kondensatora wynoszącego 3,3V i zgromadzonej energii w kondensatorze na poziomie 54,5 mJ.

Podczas badań mierzono także wartość napięcia na wysokonapięciowym wyjściu przetwornicy AEM30940 oznaczonym HVOUT, udostępniającym napięcie 3,3V. Przetwornica załączała wyjście napięciowe HVOUT przy wartości napięcia kondensatora magazynującego energię elektryczną podłączonego do wyprowadzeń BATT na poziomie 3,85V. Próby zasilania zdalnej platformy czujnikowej z wykorzystaniem wyjścia HVOUT kończyły się jednak niepowodzeniem. Kondensator magazynujący energię elektryczną rozładowywał się w bardzo krótkim czasie uniemożliwiając wysłanie poprawnych danych do serwera LoRa. Opisana praca przetwornicy może wynikać z dużego poboru prądu przy starcie platformy czujnikowej, co powoduje natychmiastowe rozładowanie kondensatora poniżej wartości napięcia 3,85 V, a to z kolei powoduje wyłączenie wyjścia napięciowego HVOUT przetwornicy. Ze względu na to zjawisko w badaniach związanych z bezbaterijnym zasilaniem platformy czujnikowej do jej zasilania wykorzystano kondensator magazynujący energię podłączony do zacisków BATT, z którego bezpośrednio zasilano platformę czujnikową.

W trakcie badań przeprowadzono testy zasilania platformy czujnikowej z opisanego powyżej układu harvestera energii mechanicznej. Kondensator o pojemności 10000 μF został naładowany do napięcia 4,58 V, następnie przeprowadzono dwa skuteczne cykle pracy platformy czujnikowej. W pierwszym cyklu platforma czujnikowa na potrzeby pomiaru wartości temperatury i wilgotności powietrza oraz przesłania danych do serwera LoRa wykorzystowała 29,3 mJ energii, w drugim cyklu pomiarowo nadawczym platforma czujnikowa wykorzystowała 26,3 mJ energii.



Rys. 95. Przebieg wartości napięcia oraz energii zgromadzonej w kondensatorze magazynującym 10000 μF w trakcie pracy platformy czujnikowej realizującej dwa cykle pomiarowo-nadawcze.

Na wykresie na Rys. 95. przedstawiono przebieg wartości napięcia na kondensatorze oraz zmiany energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze podczas realizacji dwóch cykli pomiarowo nadawczych przez bezprzewodową platformę czujnikową LoRa. Tym samym udowodniono, że wykorzystując opracowany budynkowy harvester energii mechanicznej wyposażony w niskonapięciową przetwornicę DC-DC AEM30940 można poprawnie w sposób w pełni bezbaterijny zasilac bezprzewodową platformę czujnikową LoRa.

Kolejnym etapem badań związanych z bezbaterijnym zasilaniem platform czujnikowych LoRa było przeprowadzenie testów pracy układu harvestera energii mechanicznej w warunkach przemysłowych.

13.8 Badania w warunkach przemysłowych

Badania przemysłowe z wykorzystaniem prototypowego rozwiązania harvestera energii mechanicznej wewnątrz budynku wykonano z użyciem harvestera zainstalowanego na samozamykaczu drzwi. Harvester energii mechanicznej pozyskujący energię z ruchu samozamykacza charakteryzuje się bardziej złożonym układem przekształcającym generowane napięcie niż układ harvestera energii dostosowany do współpracy z klamką drzwi.

Badania przemysłowe zrealizowano wykorzystując samozamykacz GEZE model TS 2000 z regulowaną prędkością zamykania drzwi. Samozamykacz zainstalowano na drzwiach w magazynie firmy KMB Grupa. Układ harvestera energii mechanicznej zasilający bezprzewodową platformę czujnikową był testowany przez trzy tygodnie. W czasie testów w warunkach polowych zastosowany został ten sam układ, który był używany w warunkach laboratoryjnych jednak został on dodatkowo wyposażony w kierunkowe, elastyczne sprzęgło zamocowane do wału silnika N20-BT33. Tak doposażony układ harvestera energii mechanicznej pracował zatem wyłącznie podczas ruchu powrotnego drzwi. Zabieg ten pozwolił wykorzystywać płynny, powtarzalny ruch skrzydła drzwi uzyskiwany tylko w trakcie ruchu powrotnego. Ruch drzwi podczas ich otwierania przez różne osoby i w różnych sytuacjach charakteryzował się co prawda wyższą dynamiką zapewniającą wyższą wartość generowanego napięcia, a w rezultacie pozyskiwanie większych porcji energii elektrycznej. Jednak praca mikrogeneratorsa w trakcie otwierania drzwi wiąże się z dużym obciążeniem zastosowanej przekładni mechanicznej 1:250 co grozi jej szybkim zużyciem.

Harvester energii połączony z samozamykaczem drzwi został podłączony do zdalnej platformy czujnikowej również zainstalowanej na wspomnianych drzwiach. W obszarze magazynu zainstalowano także sterownik PLC WAGO 750-8202 oraz gateway LoRa Multitech (czyli identyczny zestaw jak ten użyty w badaniach przemysłowych harvestera energii cieplnej w sprężarkowni). Platforma czujnikowa została zaprogramowana do wykonywania pomiaru i transmisji danych każdorazowo po wybudzeniu. Układ pracował 3 tygodnie łącznie wykonując i rejestrując 465 prawidłowo odebranych pakietów danych pomiarowych przesłanych ze zdalnej, w pełni bezbaterijnie zasilanej platformy czujnikowej. Daje to średnio prawie 4 pomiary na godzinę uwzględniając rzeczywisty czas użytkowania magazynu, w którym prowadzono testy (jedna zmiana, tylko w dni robocze) i średnio prawie 1 pomiar na

godzinę gdy uwzględnimy całkowity łączny czas pracy platformy testowej (czyli 3 tygodnie po siedem 24 godzinnych dni). Pierwsza z tych wartości jest wystarczająca z punktu widzenia wymagań systemu BMS CHRONOMATIK™.

Praca bezprzewodowej platformy czujnikowej zasilanej z wykorzystaniem harvestingu energii mechanicznej w warunkach polowych rozpoczyna się w pierwszym cyklu, w którym kondensator magazynujący energię elektryczną jest zupełnie rozładowany, zostaje zasilony i naładowany na skutek pracy samozamykacza. Przy napięciu na kondensatorze powyżej 3,3V, następuje uruchomienie bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa, wykonanie pomiaru warunków środowiskowych, wysłanie danych do serwera LoRa i ponowne uśpienie platformy. Jeżeli napięcie na kondensatorze po cyklu pomiarowo nadawczym przekracza poziom 3,3 V, platforma czujnikowa przechodzi w tryb uśpienia, zasilana energią elektryczną zgromadzoną w kondensatorze z poborem prądu zmierzonym w warunkach laboratoryjnych na poziomie 2 μ A. Po piętnastu minutach platforma czujnikowa wybudza się, wykonuje kolejny cykl pomiarowo nadawczy i ponownie przechodzi w tryb uśpienia. Jeżeli energia zgromadzona w kondensatorze jest niewystraczająca na zrealizowanie cyklu pomiarowo nadawczego, platforma rozładowuje kondensator do wartości napięcia 3V, w efekcie resztkowe napięcie kondensatora jest za niskie, żeby uruchomić przetwornicę DC-DC wbudowaną w układ zasilania platformy czujnikowej. W rezultacie platforma czujnikowa wyłącza się zupełnie. Układ pozostaje wyłączony do czasu wykonania kolejnego ruchu samozamykacza, ładującego kondensator powyżej napięcia 3,3 V.

Zarejestrowane dane przesłane z serwera LoRa do sterownika PLC zostały zapisane na karcie SD w formie pliku csv zawierającego oprócz zmierzonej wartości temperatury także stempel czasu pozwalająca określić czas odebrania danych przez serwer LoRa. Wykorzystując tak zebrane dane przygotowano wykres prezentujący na Rys. 96. ilość odebranych prawidłowych cykli pomiarowo-nadawczych wysłanych przez platformę czujnikową zasilaną z wykorzystaniem harvestera energii mechanicznej zainstalowanego na samozamykaczu drzwi w warunkach przemysłowych. Z trzytygodniowego okresu rejestracji danych wybrano jeden przykładowy tydzień, dla którego przedstawiono dobowy rozkład odebranych komunikatów.



Rys. 96. Rozkład odebranych transmisji LoRa pomiędzy bezprzewodową platformą czujnikową, a serwerem LoRa podczas badań realizowanych w warunkach przemysłowych z harvestingowym zasilaniem platformy czujnikowej.

Rozkład poprawnie odebranych transmisji radiowych LoRa przedstawionych na wykresie na Rys. 96. zawiera łącznie 145 komunikatów. W trakcie tygodnia platforma pracowała średnio 29 razy dziennie wysyłając dane pomiarowe o wartości temperatury i wilgotności powietrza w pomieszczeniu. Największa ilość zrealizowanych pomiarów przypada na środę (36 pomiarów), najmniejsza na piątek (20 pomiarów), w sobotę i niedzielę nie zarejestrowano żadnych pomiarów (ze względu brak aktywności pracowników firmy KMB Grupa w tych dniach w magazynie). Odpowiada to zatem średnio 3 prawidłowym pomiarom i bezprzewodowym transmisjom danych na godzinę.

13.9 Wnioski i podsumowanie.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają, że wykorzystując opracowane harvestery energii mechanicznej w budynku sprzężone z mikrogeneratorem energii elektrycznej (w postaci silnika DC pracującego jako generator energii elektrycznej) oraz układem magazynowania energii elektrycznej (w postaci kondensatora elektrolitycznego) można pozyskiwać wystraszająco dużo energii na potrzeby zasilania bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa już przy jednokrotnym ruchu klamki lub samozamykacza drzwi. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają także możliwość wykorzystania tego typu harvesterów energii mechanicznej wewnątrz budynku w celu w pełni bezbaterijnego zasilania zdalnych układów czujnikowy wykorzystujących protokół łączności radiowej dalekiego zasięgu LoRa do współpracy z budynkowym systemem BMS CHRONOMATIK™. W przedstawionych rozwiązaniach wykorzystujących w roli magazynu energii kondensator elektrolityczny o prawidłowo dobranej pojemności zaprezentowano dwie strategie pozwalające na uzyskiwanie odpowiednio wysokiego napięcia kondensatora, a zatem ilość zmagazynowanej energii wystarczającą do prawidłowego zasilania zdalnej platformy czujnikowej LoRa. W układzie harvestingowym wykorzystującym ruch klamki użyty kondensator o pojemności (4700 μ F) zapewnia gromadzenie wystarczającej ilości energii elektrycznej (przy napięciu naładowania kondensatora do wartości 5V) do pracy bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa bez użycia przetwornicy DC-DC. W efekcie opracowane rozwiązanie pozwala skutecznie zasilać platformę czujnikową bez dodatkowego układu elektronicznego podnoszącego wartość napięcia elektrycznego, tym samym poprawiając efektywność całego układu i umożliwiając realizowanie cyklu pomiarowo nadawczego platformy czujnikowej przy każdym ruchu klamki.

W rozwiązaniu wykorzystującym energię mechaniczną pozyskiwaną w ruchu powrotnym samozamykacza drzwi ze względu na małą dynamikę ruchu drzwi, a tym samym niską prędkość obrotową wału mikrogeneratora układ harvestera energii został dodatkowo wyposażony w przetwornicę DC-DC podnoszącą wartość napięcia wejściowego mikrogeneratora już od 1V do wartości 5V. Ze względu na duży potencjał energetyczny związany z ruchem samozamykacza drzwi w układzie wykorzystano również kondensator elektrolityczny o większej pojemności (10000 μ F), pozwalający zarówno zmagazynować całą

generowaną energią jak również przy pełnym naładowaniu (5V) realizować dwa cykle pomiarowo nadawcze platformy czujnikowej LoRa. Dzięki zastosowaniu miniaturowego silnika N20-BT33 z przekładnią 1:150 (klamka) oraz 1:250 (samozamykacz) układ takiego harvestera energii w docelowych rozwiązaniach wdrożeniowych, planowanych przez macierzystą firmę Autora (KMB Grupa) można z powodzeniem zabudować bezpośrednio w mechanizmie bądź sztyldzie klamki lub konstrukcji samozamykacza. W efekcie opracowane rozwiązanie z powodzeniem może zostać wykorzystane do w pełni bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych dostarczających danych o warunkach środowiskowych w pomieszczeniach, niezbędnych do prawidłowej pracy budynkowego systemu BMS CHRONOMATIK™ i do optymalizacji zużycia energii w budynkach. Platformy czujnikowe LoRa, dysponujące szeregiem interfejsów komunikacyjnych (i²C, UART, SPI) umożliwiają integrację dużej liczby elektronicznych urządzeń czujnikowych dostępnych na rynku, takich jak czujniki do pomiaru lotnych związków organicznych, detekcji obecności w pomieszczeniu, pomiaru natężenia oświetlenia, liczniki otwarcia drzwi, itp. Układy takie stanowią zatem bardzo elastyczne rozwiązanie bazowe wielu urządzeń automatyki budynkowej współpracujących z BMS CHRONOMATIK™. Dane pomiarowe pozyskiwane przy ich pomocy są kluczowe dla optymalnej pracy wszystkich systemów regulacji instalacji budynkowych HVAC integrowanych i zarządzanych z poziomu nadrzędnego systemu BMS CHRONOMATIK™, przyczyniając się tym samym do znaczącej – opisanej w drugim rozdziale monografii - poprawy efektywności energetycznej budynków w świetle normy PN-EN 15232-1:2017-07. Są też doskonałym sposobem rozwiązania problemu bezinwazyjnej instalacji systemów automatyki budynkowej w obiektach istniejących (często o niekorzystnej charakterystyce zużycia energii z uwagi na swój wiek i/lub konstrukcję), trudnych do wyłączenia z użytkowania na czas realizacji systemów automatyki w konwencjonalnej to znaczy przewodowej architekturze. W tego typu budynkach realna poprawa efektywności energetycznej poprzez optymalizację zużycia energii na potrzeby funkcjonowania budynków jest możliwa praktycznie tylko z wykorzystaniem systemów bezprzewodowych i bezbateryjnych. Bez informacji o zmianach wartości temperatury w pomieszczeniach nie jest możliwa realizacja precyzyjnej regulacji temperatur zapewniającym jednocześnie komfort cieplny użytkowników i poprawę efektywności energetycznej budynku. Bez pomiaru stężenia CO₂ nie jest możliwe dynamiczne dostosowanie wydatku układów wentylacyjnych do wymaganego udziału świeżego powietrza, co również bardzo silnie pogarsza efektywność

energetyczną budynku. Bez informacji o udziale światła naturalnego i o obecności osób w pomieszczeniach nie jest możliwe dynamiczne sterowanie instalacją oświetlenia a tym samym ograniczenie zużycia energii elektrycznej i docelowa poprawa efektywności energetycznej. Tym samym wyniki badań zaprezentowane w tym rozdziale potwierdzają prawdziwość drugiej tezy doktoratu.

Jako kierunek dalszego rozwoju harwesterów energii mechanicznej wewnątrz budynków może wskazać próbę wykorzystania silników elektrycznych o większej mocy pozyskujących mechaniczną energię odpadową z ruchu powrotnego zamykania drzwi. Silnik elektryczny o większej mocy pracujący w roli generatora energii elektrycznej mogłyby pełnić zarówno funkcję samego zamykacza drzwi, jak i harwestera energii mechanicznej z całkowitym wyeliminowaniem standardowych, obecnie instalowanych samozamykaczy mechaniczno-hydraulicznych. Szacunkowa wartość energii mechanicznej możliwej do odzyskania z ruchu skrzydła drzwi wynosi (w zależności od wielkości skrzydła drzwi oraz jego masy) ok. 4J [106]. Przy wysokiej sprawności docelowych harwesterów energii mechanicznej możliwe byłoby wykorzystywanie pozyskiwanej energii na znacznie częstsze uruchamianie bezprzewodowych platform czujnikowych, a przy zastosowaniu pojemniejszych układów magazynowania energii elektrycznej nawet na zasilanie urządzeń wykonawczych instalowanych w instalacjach HVAC sterowanych z poziomu systemu BMS wpływających na zwiększanie efektywności energetycznej budynków (siłowniki przepustnic VAV, siłowniki zaworów regulacyjnych, itp.).

14 Podsumowanie pracy i koncepcja bezprzewodowego systemu BMS z zasilaniem harvestingowym układów czujnikowych.

14.1 Podsumowanie

W efekcie przeprowadzonych oraz opisanych w pracy badań skupiających się nad szeroko pojętym harvestingiem energii wewnątrz budynków w kontekście poprawy efektywności energetycznej budynków wyposażonych w systemy BMS (w tym w autorskie rozwiązanie firmy KMB Grupa - system BMS CHRONOMATIK™) potwierdzono obie tezy postawione na wstępie przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Pierwsza teza rozprawy dotyczy analizy wpływu pracy układów harvestingu energii w budynkach zarządzanych przez systemy BMS CHRONOMATIK™ w kontekście poprawy efektywności energetycznej tych budynków. Do przeprowadzonych badań wybrano instalację pozyskiwania ciepła odpadowego powietrza w kuźni aluminium, a także instalację odprowadzania ciepła odpadowego z układu chłodzenia sprężarek. Jakość poprawy efektywności energetycznej budynków wynikających z realizacji opisanych instalacji oceniono w oparciu o aktualne normy klasyfikujące wpływ systemów klasy BMS na poprawę efektywności energetycznej budynków.

Druga teza rozprawy dotyczy możliwości bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa (w tym referencyjnych platform opracowanych i wytwarzanych przez firmę KMB Grupa) poprzez harvesting energii wewnątrz budynków przy użyciu harvesterów energii cieplnej oraz mechanicznej. Aby udowodnić tę tezę przeprowadzono badania skupiające się nad określeniem konsumpcji energii elektrycznej przez platformy czujnikowe LoRa, zaprojektowano i wykonano stanowiska laboratoryjne symulujące rzeczywiste źródła energii odpadowej wewnątrz budynku oraz badające charakterystyki mocowe harvesterów energii, oraz zbudowano harvestery energii cieplnej i mechanicznej zdolne do bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych w budynkach. Następnie opracowane rozwiązania - zarówno harvester energii cieplnej jak i harvester energii mechanicznej zainstalowano w budynkach przemysłowych (fabryka sprzętu AGD oraz warsztat firmy KMB Grupa), gdzie bezbateryjnie zasilają one zdalne platformy czujnikowe LoRa, a dane

pomiarowe z platform czujnikowych za pośrednictwem bramy komunikacyjnej LoRa były przesyłane do sterownika PLC czyli typowego elementu systemu BMS CHRONOMATIK™.

W trakcie prowadzonych badań wskazano szereg powszechnie występujących niskoenergetycznych źródeł energii cieplnej w budynkach w tym: instalacja wody zimnej, szyby okienne, elementy instalacji ogrzewania w budynkach, które pozwalają (z wykorzystaniem ultraniskonapięciowych przetwornic DC-DC) zapewnić pracę harvesterów energii cieplnej, a w efekcie bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa. Dla harvesterów energii mechanicznej wybrane źródła energii to: samozamykacz drzwi oraz mechanizm klamki. Podobnie jak w przypadku harvesterów energii cieplnej oba źródła energii mechanicznej powszechnie występują w budynkach co korzystnie wpływa na możliwość zasilania w ten sposób urządzeń czujnikowych pracujących w systemie BMS CHRONOMATIK™.

Przedstawione wyniki badań potwierdzają obie tezy doktoratu. Energia pozyskiwana z otoczenia poprawia efektywność energetyczną budynków z systemem BMS CHRONOMATIK™, a harvesting energii wewnątrz budynków pozwala na bezbateryjne zasilanie bezprzewodowych platform czujnikowych LoRa, w efekcie system BMS CHRONOMATIK™ pracujący w oparciu o urządzenia bezprzewodowe zasilane bezbateryjnie pozwala na poprawę energetyczną budynków.

14.2 Rozwój systemu BMS CHRONOMATIK™

Zasadność stosowania urządzeń bezprzewodowych w systemach automatyki budynkowej oraz BMS wpływających na znaczne zwiększanie efektywności energetycznej budynków stanowi także podstawę do dalszych badań, związanych z przygotowaniem autorskiej koncepcji, projektu oraz prototypu systemu BMS CHRONOMATIK 2.0 o całkowicie bezprzewodowej architekturze z pełnym wyeliminowaniem okablowania sygnałowego, budynkowych rozdzielnic automatyki, a także sieciowych sterowników PLC. Biorąc pod uwagę przesłanki i wnioski płynące z przeprowadzonych badań oraz całkowicie innowacyjne podejście związane z architekturą systemów BMS w obiektach wielkokubaturowych, przemysłowych i użyteczności publicznej (galerie handlowe, dworce, szpitale, szkoły, uczelnie wyższe, itp.) opracowałem autorski, innowacyjny projekt rozwojowy systemu BMS firmy KMB Grupa o roboczej nazwie CHRONOMATIK™ 2.0. Dzięki niemu będzie możliwe wykonywanie systemów automatyki budynkowej i BMS w pełni bezprzewodowej architekturze, w rezultacie wielokrotnie zmniejszając czas wymagany na realizację dużych systemów BMS w obiektach nowopowstających, jak i tych już zbudowanych. Pozwoli to na także na znaczną redukcję kosztu wykonania takich systemów jak i wymaganego czasu przestoju obiektów (przy czym w niektórych obiektach jest to obecnie warunek praktycznie wykluczający ich modernizację i instalację w nich systemów BMS - są to głównie szpitale oraz niektóre instytucje publiczne).

W wyniku pracy nad koncepcją systemu CHRONOMATIK™ 2.0 złożono projekty w ramach dwóch konkursów:

1. HORIZON EUROPE w ramach klastra nr 5. Climate, Energy and Mobility.: project pod tytułem: *„Smart wireless, safe BACS with centralized virtual PLC controllers as a method of increasing energy efficiency and its optimisation in buildings supporting digital building logbook.”*
2. NCBR – Konkurs Szybka Ścieżka – Innowacje cyfrowe, projekt pod tytułem: *„Prace B+R nad opracowaniem innowacyjnego, skalowalnego, w pełni bezprzewodowego systemu BMS integrującego w czasie rzeczywistym urządzenia IoT w systemach automatyki budynkowej i przemysłowej, z wyeliminowaniem fizycznych sterowników PLC*

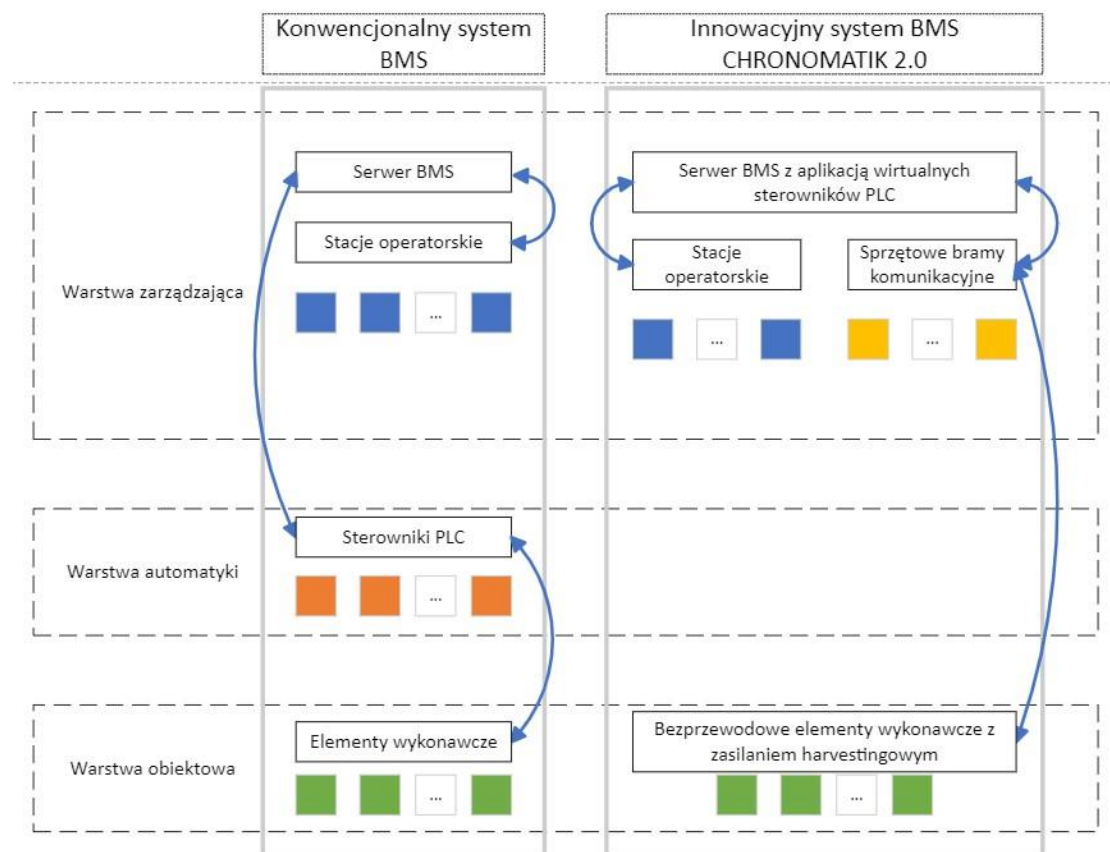
i z wykorzystaniem AI/ML w algorytmach sterowania urządzeniami wykonawczymi i zapewnieniem komfortu cieplnego.”

Projekty złożone w obu konkursach przedstawiają koncepcję opracowania narzędzia do realizacji bezprzewodowych systemów BMS wykorzystujących w swojej budowie elementy bezprzewodowe z komunikacją radiową między innymi z protokołem komunikacyjnym LoRa oraz zasilaniem bezbaterijnym będącym rozwinięciem prac w zakresie harvestingowego zasilania między innymi bezprzewodowych platform czujnikowych przedstawionego w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Celem tych projektów jest opracowanie kompletnego, spójnego, bezprzewodowego systemu BMS eliminującego fizyczne sterowniki PLC, zastępując je innowacyjnym rozwiązaniem programowym w formie “wirtualnych sterowników PLC” istniejących tylko w serwerowym systemie BMS oraz rozszerzenie go o moduł realizujący automatycznie zadanie zmniejszenia zużycia mediów, poprawę parametrów jakościowych powietrza oraz poprawę bezpieczeństwa użytkowników przy utrzymaniu komfortu cieplnego. Dzięki wynikom badań przeprowadzonych podczas realizacji doktoratu znaczna część tych bezprzewodowych urządzeń będzie mogła zostać rozbudowana o moduły zasilania bezbaterijnego wykorzystujące harvestery energii dostępnej wewnątrz budynków (między innymi w oparciu o energię cieplną, mechaniczną i/lub świetlną).

Realizacja systemów BMS w konwencjonalnej architekturze, opartej o przewodową wymianę danych oraz węzłowe rozdzielnice automatyki wyposażone w programowalne sterowniki PLC wymaga zaangażowania licznego zespołu pracowników (do realizacji infrastruktury BMS) i prowadzi do dużego zapotrzebowania materiałowego (w przypadku dużych inwestycji są to w praktyce kilometry przewodów, setki metrów tras kablowych, dziesiątki rozdzielnic i sterowników PLC).

Alternatywą dla takich konwencjonalnych systemów jest proponowane przeze mnie rozwiązanie wykorzystujące komunikację bezprzewodową, a także komunikację przewodową *Ethernet over Power* z użyciem linii niskiego napięcia (czyli zawsze istniejącego elementu infrastruktury budynkowej) oraz przeniesienie zadań fizycznych sterowników PLC do proponowanej aplikacji BMS w ramach modułu “wirtualnych sterowników PLC” (WSPLC).



Rys. 97. Graficzne przedstawienie koncepcji systemu bezprzewodowego z wykorzystaniem wirtualnych sterowników PLC.

Moje autorskie rozwiązanie polega na udoskonaleniu obecnego systemu BMS CHRONOMATIK™ w zakresie interoperacyjności systemów, w tym między systemami automatyki i sterowania budynkiem a innymi technicznymi systemami i urządzeniami (w tym IoT). Proponowane rozwiązanie ma na celu wyeliminowanie sprzętowej warstwy automatyki przedstawionej schematycznie na Rys. 97. i zastąpienie jej bezpośrednią, bezprzewodową komunikacją z serwerem systemu BMS. Zadania obecnie realizowane na poziomie tych warstw zostaną zastąpione przez wirtualne sterowniki WSPLC umożliwiające realizowanie wszystkich funkcji obecnie spełnianych przez fizyczne, sprzętowe sterowniki PLC oraz inne fizyczne elementy logiczne stosowane w systemach automatyki budynkowej.

W ramach proponowanych, przyszłych projektów zbadane zostaną techniczne możliwości stosowania szeroko pojętej niskoenergetycznej komunikacji bezprzewodowej wewnątrz budynku na skalę umożliwiającą realizację w pełni bezprzewodowych systemów BMS. Zbadane zostaną techniczne możliwości wykorzystywania komunikacji bezprzewodowej

w budynkach o standardowej konstrukcji, uwzględniając zdolność do realizacji stabilnej, ciągłej, odpornej na zakłócenia, komunikacji dwukierunkowej.

Wylimitowanie fizycznych urządzeń logicznych (czyli sterowników PLC) poprzez wprowadzenia do aplikacji BMS modułu WSPLC będzie wymagało badań przemysłowych w efekcie których określone zostaną realne możliwości obsługi wielu zmiennych wejść/wyjść do aplikacji BMS (fizyczne wejścia i wyjścia sterowników PLC zostaną zastąpione przez bezprzewodowe urządzenia: czujniki i elementy wykonawcze komunikujące się z serwerem z aplikacją WSPLC drogą bezprzewodową). Badania te pozwolą także określić możliwości techniczne obsługi opisanej części aplikacji (WSPLC) w zakresie serwerowych wymagań sprzętowych oraz ich ograniczeń w trakcie realizowania równoległego sterowania urządzeniami wykonawczymi/systemami automatyki budynkowej (np. regulatory PID, algorytmy pracy central wentylacyjnych, węzłów chłodu, kotłowni, itd.). Aby uzmysłowić skalę tego rozwiązania dla „dużych” systemów BMS system BMS CHRONOMATIK™ aktualnie stosowany w obiekcie dworca kolejowego Nowa Łódź Fabryczna obsługuje w czasie rzeczywistym ok. 70 000 zmiennych natomiast system BMS CHRONOMATIK™ pracujący w centrum handlowym Wroclavia we Wrocławiu nadzoruje w czasie rzeczywistym ponad 110 000 zmiennych.

Mam nadzieję, że w efekcie proponowanych przyszłych badań zrealizowany zostanie innowacyjny system BMS CHRONOMATIK 2.0 charakteryzujący się pełną skalowalnością oraz elastycznością, pozwalającą na bezinwazyjną instalację w nowoprojektowanych budynkach, ale przede wszystkim w budynkach już istniejących (*retrofitting*) oraz obiektach pod nadzorem konserwatorskim (ratusze, szpitale, szkoły itd.) obecnie praktycznie wykluczonych z rynku rozwiązań przewodowych ze względu na realny brak możliwości ingerencji w istniejącą infrastrukturę i zabytkowa tkankę architektoniczną. Proponowane przeze mnie rozwiązanie pozwoli zatem zwiększać efektywność energetyczną w opisanych budynkach, co jest bardzo istotne w okresie nadchodzącej transformacji energetycznej oraz w obliczu kryzysu energetycznego oraz doskonale wpisuje się w obecnie realizowaną politykę Unii Europejskiej w zakresie poprawy efektywności energetycznej i dążenia do zeroemisyjności także w przypadku budynków już istniejących.

Literatura

- [1] Pervez Hameed Shaikh, Nursyarizal Bin Mohd Nor, Perumal Nallagownden, Irraivan Elamvazuthi, Taib Ibrahi A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings Universiti Teknologi PETRONAS, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bandar Seri Iskandar, 31750 Tronoh, Perak, Malaysia
- [2] Yifan Liu A process model for heating, ventilating and air conditioning systems design for advanced energy retrofit projects June 2012 10.13140/RG.2.2.30071.88487
- [3] Ghezlane Halhouli Merabet , Mohamed Essaaidi , Mohamed Ben Haddou , Basheer Qolomany , Junaid Qadir , Muhammad Anan , Ala Al-Fuqaha , Mohamed Riduan Abid , Driss Benhaddou Intelligent building control systems for thermal comfort and energy-efficiency: A systematic review of artificial intelligence-assisted techniques Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 144, July 2021
- [4] <https://kmb-grupa.pl/#chromatik>
- [5] <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- [6] Bruno Eduardo Medina, Leandro Tiago Manera Retrofit of air conditioning systems through an Wireless Sensor and Actuator Network: An IoT-based application for smart buildings IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), May 2017
- [7] J. K. Wong and H. Li Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in Multi-Criteria Analysis of the Selection of Intelligent Building Systems Build. Environ., vol. 43, no. 108–125, 2008
- [8] Omorogiuwa Eseosa, Folorunsho Isaac Temitope Review of Smart Based Building Management System World Journal of Innovative Research (WJIR) ISSN: 2454-8236, Volume-7, Issue-2, 2019
- [9] <https://www.wago.com/pl/technika-budynkowa/system-bms-wago-visu-building>
- [10] Intelligent Buildings and Building Automation Spon Press an imprint of Taylor & Francis, London and New York
- [11] Popescu Daniela E., Prada Marcela F. Some Aspects about Smart Building Management Systems -Solutions for Green, Secure and Smart Buildings Conference on Recent Advances in Environmental Science, Lemesos, Cyprus, March 2013
- [12] G. P. Sullivan, R. Pugh, A. P. Melendez, W. D. Hunt, Operations & Maintenance, Best Practices, A Guide to Achieving Operational Efficiency EERE Information Center
- [13] Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; 2010/31/UE
- [14] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej.
- [15] Dz. U. 1994 Nr 89 poz. 414 U S T AWA z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane
- [16] Art. 2 ust. 3 ustawy o ee z 2016.
- [17] German Osmaa, Laura Amadoa, Rodolfo Villamizara, Gabriel Ordoñez Building automation systems as tool to improve the resilience from energy behavior approach International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction

-
- [18] Hendro Wicaksono, Sven Rogalski, Enrico Kusnady Knowledge-based Intelligent Energy Management Using Building Automation System Intelligent Systems and Production Engineering/ Process and Data Management in Engineering
- [19] Tom J. Kaźmierski, Steve Beeby Energy Harvesting Systems Principles, Modeling and Applications Springer New York, NY 2011.
- [20] Sherali Zeadally, Faisal Karim Shaikh, Anum Talpur, Quan Z. Sheng Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things Renewable and Sustainable Energy Reviews 128 (2020) 109901
- [21] S. Brückner, H. Schäfers, I. Peters, E. Lävemann Using industrial and commercial waste heat for residential heat supply: A case study from Hamburg, Germany Sustainable Cities and Society, October 2014
- [22] Tang X, Zuo L Simulation and experiment validation of simultaneous vibration control and energy harvesting from buildings via tuned mass dampers Sustainable Cities and Society, Proceedings of America control conference, San Francisco
- [23] PKN Norma PN-EN ISO 52120-1:2022-09E
- [24] PKN Norma PN-EN 15232-1:2017-07
- [25] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensornetworks. IEEE Commun Mag 2002;40(8):102–14.
- [26] Arshad R, Zahoor S, Shah MA, Wahid A, Yu H. Green IoT: An investigation on energy saving practices for 2020 and beyond IEEE Access 2017
- [27] Shaikh FK, Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review Renew Sustain Energy Rev 2016;55:1041–54.
- [28] Flammini A, Sisinni E. Wireless sensor networking in the internet of things and cloud computing era Procedia Eng 2014;87:672–9.
- [29] Dziadak B, Makowski Ł, Michalski A. Survey of energy harvesting systems for wireless sensor networks in environmental monitoring. Metrol Meas Syst 2016;23(4):495–512.
- [30] Faisal Karim Shaikh, Sherali Zeadally Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review Renewable and Sustainable Energy Reviews 55(2016)1041–1054 ELSEVIER
- [31] Akhtar F, Rehmani MH. Energy replenishment using renewable and traditional energyresources for sustainable wireless sensor networks: A review. Renew Sustain Energy Rev 2015;45:769–84.
- [32] Ku M-L, Li W, Chen Y, Liu KR. Advances in energy harvesting communications: Past, present, and future challenges IEEE Commun Surv Tutor 2015;18(2):1384–412.
- [33] Lazaros Tzounis Organic Thermoelectrics and Thermoelectric Generators (TEGs) Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications International Journalof Distributed Sensor Networks, June2013
- [34] Nguyen T. Hung, Ahmad R. T. Nugraha, Riichiro Saito Thermoelectric Properties of Carbon Nanotubes MDPI Energis 11.2019.
- [35] Bhatti NA, Alizai MH, Syed AA, Mottola L. Energy harvesting and wirelesstransfer in sensor network applications: Concepts and experiences ACM Trans Sensor Netw 2016;12(3):24.
- [36] Shishir Pandya, Gabriel Velarde, Lei Zhang, Joshua D. Wilbur, Andrew Smith, Brendan Hanrahan, Chris Dames, Lane W. Martin. New approach to waste-heat energy harvesting: pyroelectric energy conversion Pandya et al. NPG Asia Materials (2019) 11:26

-
- [37] Scott R. Hunter, Nickolay V. Lavrik, Thirumalesh Bannuru, Salwa Mostafa, Slo Rajic, Panos G. Datskos Development of MEMS based pyroelectric thermal energy harvesters Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering May 2011
- [38] Khoshdel V, Shokooh-Saremi M. Design and optimization of slot nano-antennas for ambient thermal energy harvesting. *Optik* 2017;138:470–5.
- [39] McKay IS, Wang EN. Thermal pulse energy harvesting *Energy* 2013;57:632–40.
- [40] Roundy S. On the effectiveness of vibration-based energy harvesting *Mater Syst Struct* 2005;16(10):809–23.
- [41] X. Zhao, H. Askari, J. Chen Nanogenerators for smart cities in the era of 5G and Internet of Things *Joule* (2021) ,
- [42] Yisha Jiang, Yitian Wu, Guoheng Xu, Senyao Wang, Tingting Mei, Nannan Liu, Tao Wang, Yude Wang, and Kai Xiao, Charges Transfer in Interfaces for Energy Generating *Joule* (2021), *Small Methods* 2023
- [43] J. Zhu, M. Zhu, Q. Shi, F. Wen, L. Liu, B. Dong, et al., Progress in TENG technology energy harvesting to nanoenergy and nanosystem, *EcoMat* 2 (2020)
- [44] S. Boisseau, G. Despesse, B. Ahmed Seddik Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting LETI, CEA, Minatec Campus, Grenoble, France 2012
- [45] Alper Erturk, Daniel J. Inman Piezoelectric Energy Harvesting Wiley & Sons, (2010)
- [46] N. Sezer, M. Koc, A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting *Nano Energy*, Volume 80, February 2021
- [47] T. Li, P. S. Lee Piezoelectric Energy Harvesting Technology: From Materials, Structures, to Applications *Small Structures*, 2022, vol. 3
- [48] A. Toprak O. Tigli Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges 4 AIP Publishing LLC 2014
- [49] JABBAR H., SONG Y., JEONG T.T. RF Energy Harvesting System and Circuits for Charging of Mobile Devices *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 2010
- [50] MI M., MICELE M.H., CALELLI C., SWIFT H., RF Energy Harvesting with Multiple Antennas in the Same Space *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 2005
- [51] B. Milosevic, M. Radovanovic, B. Jokanovic Measurement of rectifying diode impedance and efficiency for energy harvesting applications *IEEE EUROCON* 2019
- [52] Kim S, Vyas R, Bito J, Niotaki K, Collado A, Georgiadis A Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms *Proc IEEE* 2014
- [53] J W Matiko Review of the application of energy harvesting in buildings 2014 *Meas. Sci. Technol.* 25
- [54] <https://www.viridiansolar.co.uk/resources-4-1-photovoltaic-effect.html>
- [55] Bhatti NA, Alizai MH, Syed AA, Mottola L. Energy harvesting and wireless transfer in sensor network applications: Concepts and experiences *ACM Trans Sensor Netw* 2016
- [56] Honan G, Gekakis N, Hassanaliyagh M, Nadeau A, Sharma G, Soyata T. Energy harvesting and buffering for cyber-physical systems: A review 2015 *Cyber-physical systems*
- [57] K.S. Srivishnu, Manne Naga Rajesh, Seelam Prasanthkumar, Lingamallu Giribabu Photovoltaics for indoor applications: Progress, challenges and perspectives, *Solar Energy*, Volume 264, November 2023
- [58] S. Hwang, T. Yasuda. Indoor photovoltaic energy harvesting based on semiconducting π conjugated polymers and oligomeric materials toward future IoT applications *Polymer Journal*, 2023, volume 55, *Polymer Journal*, 2023, volume 55

-
- [59] Yue X, Kauer M, Bellanger M, Beard O, Brownlow M, Gibson D Development of an indoor photovoltaic energy harvesting module for autonomous sensors in building air quality applications IEEE Internet Things J 2017
- [60] Bruno Franciscatto Design and implementation of a new low-power consumption DSRC transponder DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 2016
- [61] Wensi Wang, Victor Cionca, Ningning Wang Thermoelectric Energy Harvesting for Building Energy Management Wireless Sensor Networks International Journal of Distributed Sensor Networks, June 2013
- [62] Shashank Priya, Hyun-Cheol Song, Yuan Zhou, Ronnie Varghese, Anuj Chopra, Sang-Gook Kim, Isaku Kanno, Liao Wu, Dong Sam Ha, Jungho Ryu and Ronald G. Polcawich A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits DE GRUYTER Energy Harvesting and Systems 2017
- [63] Kim, S. C. ; Adesogan, A. T. ; Arthington, J. D., Optimizing nitrogen utilization in growing steers fed forage diets supplemented with dried citrus pulp J. Anim. Sci., 85 (10): 2007
- [64] Gyeong Ju Song Jae Yong Cho Kyung-Bum Kim Jung Hwan Ahn Yewon Song Wonseop Hwang Seong Do Hong Tae Hyun Sun Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered walkway applications Applied Energy 256 (2019) 113916
- [65] Andrei David, Brian Vad Mathiesen, Helage Averfalk, Sven Werner, Henrik Lund Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems MDPI energies, 2017
- [66] Ehab Foda, Kai Sirén, Janne Hirvonen Heat recovery – heat pump system with a thermal storage: A case study from an industrial application InnoStock 2012- 12th international conference on thermal energy storage At: Lleida, Spain
- [67] Peter HERMANUCZ, Gabor GECZI, Istvan BAROTFI Energy Efficient Solution in The Brewing Process Using a Dual-Source Heat Pump Thermal Science 26(00):26-26 January 2022
- [68] Rokas Valancius, Rao Martand Singh, Andrius Jurelionis, Juozas Vaiciunas A Review of Heat Pump Systems and Applications in Cold Climates: Evidence from Lithuania MDPI energies, 2019
- [69] Karta danych produktu Stiebel Eltron WPF 66, 233008, 2019
- [70] Instrukcja obsługi pomp ciepła Stiebel Eltron WPF 66, A 332112-42472-9559
- [71] <https://ourworldindata.org/>
- [72] D. Vittorini, R. Cipollone. Energy savings potential in existing industrial compressors Energy 102, p. 502-515 (2016)
- [73] Save energy with oil-free water-cooled compressors Energy recovery solutions (ER 90 900) Atlas Copco – White paper
- [74] Bei Zhang, Mingsheng Liu, Yunhua Li, Lixia Wu Optimization of an Industrial Air Compressor System Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineers 110(6):52-64 2013
- [75] Richard Vaillenco Simple Solution To Energy Calculation 2022
- [76] <https://www.prometheanenergy.com/>
- [77] Projekt POIR.02.03.02-02-0002 Opracowanie innowacyjnej platformy czujnikowej z łącznością bezprzewodową LPWAN zunifikowanej z systemem zarządzania inteligentnym budynkiem BMS Chronomatik
- [78] Sub-G Module Data Sheet, MP Part Number: CMWX1ZZABZ078 CMWX1ZZABZ-091 Specification Number : BP-ABZ-C, Murata

-
- [79] TPS62745, TPS627451. TPS62745 Dual-cell Ultra Low IQ Step Down Converter for Low Power Wireless Applications REVISED JUNE 2015
- [80] ST25DV04K ST25DV16K ST25DV64K. Dynamic NFC/RFID tag IC with 4-Kbit, 16-Kbit or 64 Kbit EEPROM, and fast transfer mode capability
- [81] Dokumentacja techniczna obudowa KRADEX Z123 Enclosure Z123 – assembly 2016
- [82] Sensirion SCD30 Sensor Module CO₂, humidity, and temperature sensor, Preliminary version 0.8 – D1 – January 2018, Sensirion AG
- [83] Dokumentacja czujnik DS18B20
- [84] STM32 LoRaWAN® Expansion Package for STM32Cube, ST Microelectronics, UM2073, rev. 11, 2021
- [85] LoRa Alliance. LoRaWAN v1.1 Specification; LoRa Alliance: 3855 SW 153rd Drive Beaverton, OR 97003
- [86] Semtech Corporation. LoRa Modulation Basics
- [87] Ertürk M.A., Aydın M.A., Büyükakkaslar M.T., Evirgen H. A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies October 2019 Future Internet 11(10):216
- [88] Oniga, B.; Dadarlat, V.; Poorter, E.D.; Munteanu, A. Analysis, design and implementation of secure LoRaWAN sensor networks International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), Cluj-Napoca, Romania, 7–9 September 2017; pp. 421–428
- [89] Dokumentacja Kontaktron VEGA SMART-MC01010
- [90] Dokumentacja Sterownik PLC WAGO 750-8202
- [91] Dokumentacja Gateway Multitech
- [92] Dokumentacja ogniwo TEC- 12710
- [93] Gołaś A. Ryś M. Gajda R. Badanie własności termoizolacyjnych okien z wykorzystaniem metody elementów skończonych MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X 41, s. 91-98, Gliwice 2011
- [94] ISO 10077-2:2003, Thermal performance of windows, doors and shutters — Calculation of thermal transmittance
- [95] Jakub JURA Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym Politechnika Częstochowska
- [96] Dokumentacja DC-DC converter EM8900
- [97] Claudia Agudelo-Vera Drinking Water Temperature around the Globe: Understanding, Policies, Challenges and Opportunities Water 2020, 12, 1049;
- [98] Dokumentacja LTC3108 Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager
- [99] EN 442-2:2014, Radiators and convectors – Part 2. Test methods and rating.
- [100] EN 14511-2:2018: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling-Part 2: Test conditions
- [101] Mikk Maivel, Jarek Kurnitski Heating system return temperature effect on heat pump performance 2015, Energy and Buildings, 94, pp. 71-79
- [102] Dokumentacja DC-DC converter LTC
- [103] Dokumentacja LEGUER Electrolytic Capacitors
- [104] Jingyuan Zhao, Andrew Burke Review on supercapacitors: Technologies and performance evaluation Journal of Energy Chemistry 59, November 2020
- [105] Dokumentacja BIGCAP Electrolytic EDLC Capacitors
- [106] Dale H. Litwhiler, Thomas H. Gavigan A Door Motion Energy Harvesting System for Powering an Electronic Door Lock Proceedings of The 2014 IAJC/ISAM Joint International Conference ISBN 978-1-60643-379-9

-
- [107] Dokumentacja silnika krokowego z przekładnią planetarną 17HS19-1684S
 - [108] Dokumentacja sterownik silników krokowych DM542
 - [109] Dokumentacja silników serii DC Pololu N20-BT33
 - [110] Dokumentacja silnika HG37-200-AB-00 NIDEC COMPONENTS
 - [111] Dokumentacja przetwornicy DC-DC AEM30940
 - [112] Dokumentacja przetwornicy DC-DC 134n3p
 - [113] Dokumentacja płytki ewaluacyjnej e-peas
 - [114] Dokumentacja samozamykacz drzwiowy GEZE TS 2000