

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**  
**WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ**

**Katedra Informatyki Przemysłowej**

**Rozprawa doktorska**

**Opracowanie i wdrożenie systemu sterowania Inteligentnym Budynkiem  
biurowym wyposażonym w Centrum Przetwarzania Danych (Data Center)**

Development and implementation of a control system for an Intelligent Office  
Building equipped with a Data Center

Autor: **mgr inż. Adam Kula**

Promotor: **dr hab. inż. Albert Smalcerz, Prof. PŚ**

Opiekun pomocniczy z podmiotu zatrudniającego doktoranta: **dr inż. Zygmunt Kamiński**

Katowice, 2024 r.

**Pragnę podziękować wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania tej pracy.  
W szczególności serdecznie dziękuję Panu dr hab. inż. Albertowi Smalcerzowi Prof. PŚ,  
Promotorowi niniejszej pracy, za pomoc, życzliwość, cierpliwość i zrozumienie,  
oraz możliwość współpracy i troskę o mój właściwy rozwój naukowy.**

**Pragnę również podziękować dr inż. Zygmuntowi Kamińskiemu,  
Opiekunowi pomocniczemu tej pracy,  
za nieocenioną pomoc merytoryczną niezbędną do powstania niniejszej pracy.**

**Pracę dedykuję ukochanej żonie Anecie  
i dziękuję za cierpliwość, zrozumienie, wiarę i ogromne poświęcenie.  
Dziękuję również mojej Rodzinie za motywację do napisania rozprawy.**

## Streszczenie

W dobie globalnej zmiany klimatu, kluczowe znaczenie ma redukcja emisji i oszczędność energii. Aby zmniejszyć wpływ budynków na energię i środowisko, w ostatnich latach wielu ekspertów przeprowadziło badania dotyczące zużycia energii i opublikowało ich wyniki. W 2021 roku eksploatacja budynków odpowiadała za 30% światowego końcowego zużycia energii i 27% całkowitej emisji z sektora energetycznego, z czego 8% stanowiły emisje bezpośrednie w budynkach, a 19% to emisje pośrednie powstałe w wyniku produkcji użytej energii elektrycznej i ciepła w budynkach. Stąd należy dążyć do poprawy efektywności wykorzystania energii, zwiększyć poziom wykorzystania energii odnawialnej oraz oszczędzania energii i redukcji emisji CO<sub>2</sub>.

Dzięki możliwościom funkcjonalnym zintegrowanych systemów sterowania i automatyzacji, możliwe jest efektywne zarządzanie energią, a także stworzenie ergonomicznych warunków pracy i życia ludzi. W niniejszej pracy przedstawiono propozycję działań i zastosowane rozwiązania, które mają na celu, zmniejszenia kosztów utrzymania budynku biurowego wyposażonego w Centrum Przetwarzania Danych (CPD), poprawę funkcjonalności oraz zapewnienie bezpieczeństwa obsługi i ergonomii wyposażenia technicznego.

Zadaniem, które było realizowane w ramach doktoratu wdrożeniowego było zaproponowanie rozwiązania oszczędzającego energię i zaprezentowanie strategii kontrolowanego zużycia energii w budynku biurowym wyposażonym w Centrum Przetwarzania Danych (CPD). Wiadomo, że zużycie energii wewnątrz budynku zależy od wielu zmiennych, takich jak pogoda, izolacja cieplna budynku na zewnątrz, zachowanie użytkowników, położenie geograficzne. Ponadto energia elektryczna używana przez budynki charakteryzuje się oczywistymi wzorcami sezonowymi i niepewnością.

Pracę można podzielić na 2 części. W pierwszej przedstawiono zagadnienia teoretyczne związane z automatyką i sterowaniem budynku, omówiono dostępne technologie i systemy automatyki budynku oraz dokonano porównania wybranych systemów automatyki budynkowej wykorzystywanych na całym świecie. W drugiej części pracy zaprezentowano szczegółowe koncepcje i wdrożenie dwóch projektów: serwerowni dla istniejącego budynku KS-133 oraz nowego budynku biurowego CRON. Wcześniej uzasadniono zaprojektowane rozwiązania. Przedstawiono wyniki wstępnych badań zrealizowanych dla istniejącego budynku biurowego GLON. Wyniki zarejestrowano dzięki zbudowanemu systemowi pomiarowemu umożliwiającemu rejestrację danych obejmujących parametry elektryczne systemów grzewczych i chłodzenia dla wybranych pomieszczeń wraz z parametrami środowiskowymi. Sprawdzono zaprojektowane rozwiązania z wykorzystaniem modeli predykcyjnych oraz modelu opartego o klasyczną analizę automatyki.

Rezultatem tych badań było zaproponowanie i wprowadzenie usprawnień w systemie, tak aby uzyskać oszczędności energii. Ostatnim elementem zaprezentowanym w pracy był projekt i wdrożenie rozwiązania instalacji PV wraz z magazynem energii. W ostatnim rozdziale pracy dokonano podsumowania, uzasadniono znacznie przeprowadzonych badań oraz osiągnięcie założonych celów badań.

## Abstract

In the era of global climate change, the reduction of emissions and energy savings is of paramount importance. To mitigate the impact of buildings on energy consumption and the environment, in recent years, many experts have conducted research on energy consumption and published their findings. In 2021, building operations accounted for 30% of the world's final energy consumption and 27% of total emissions from the energy sector, of which 8% were direct emissions from buildings, and 19% were indirect emissions resulting from the production of electricity and heat consumed by buildings. Therefore, efforts should be directed towards improving energy efficiency, increasing the use of renewable energy, as well as saving energy and reducing CO<sub>2</sub> emissions.

Thanks to the functional capabilities of integrated control and automation systems, it is possible to manage energy efficiently, as well as create ergonomic working and living conditions. This paper presents proposed actions and solutions aimed at reducing the maintenance costs of an office building equipped with a Data Processing Center (DPC), improving functionality, and ensuring the safety of operation and the ergonomics of technical equipment.

The task carried out within the framework of the industrial doctorate was to propose an energy-saving solution and present a strategy for controlled energy consumption in an office building equipped with a Data Processing Center (DPC). It is known that energy consumption inside a building depends on many variables, such as weather, thermal insulation of the building's exterior, user behavior, and geographical location. Moreover, the electricity consumed by buildings is characterized by clear seasonal patterns and uncertainty. The work can be divided into two parts. The first part presents the theoretical issues related to building automation and control, discusses available building automation technologies and systems, and compares selected building automation systems used worldwide.

The second part of the paper presents detailed concepts and the implementation of two projects: a server room for the existing KS-133 building and a new CRON office building. The designed solutions were previously justified. The results of preliminary research conducted for the existing GLON office building were presented. The results were recorded thanks to the measurement system, which enabled the collection of data, including electrical parameters of heating and cooling systems for selected rooms along with environmental parameters. The designed solutions were verified using predictive models and a model based on classical control system analysis.

The result of this research was the proposal and introduction of improvements to the system to achieve energy savings. The final element presented in the paper was the design and implementation of a PV installation with an energy storage system. In the final chapter, a summary was made, the significance of the research was justified, and the achievement of the research objectives was confirmed.

## Spis treści

Streszczenie.....	4
Abstract .....	5
1 Wstęp.....	8
2 Automatyka i Sterowanie Budynkiem.....	11
2.1 Historia automatyki i sterowania budynkiem .....	11
2.2 Nowoczesne instalacje w budynkach.....	14
2.3 Pojęcie inteligencji w budynku.....	16
2.4 Internet rzeczy (IoT) .....	18
2.5 Sztuczna inteligencja (AI) .....	19
3 Technologie i Systemy Automatyki Budynku.....	21
3.1 Wprowadzenie .....	21
3.2 Cechy Systemów Automatyki Budynkowej .....	23
3.3 Porównanie wybranych systemów automatyki budynkowej .....	25
3.4 Skalowalność Systemów Automatyki Budynkowej .....	27
3.5 System KNX.....	28
4 Hipoteza badawcza, cel i zakres pracy, struktura pracy .....	32
4.1 Struktura pracy.....	33
4.2 Wdrożenia.....	35
5 Projekt budowlany i projekty wykonawcze budynku biurowego Centrum Rozwoju Nauki .....	37
5.1 Badania wstępne .....	37
5.2 Opis i parametry budynku biurowego GLON.....	38
5.3 System pomiarowy .....	42
5.4 Wyniki badań.....	45
5.5 Podsumowanie badań i analizy wyników .....	60
5.6 Założenia projektowe nowego budynku biurowego .....	61
5.7 Projekt budowlany i projekty wykonawcze budynku biurowego Centrum Rozwoju Nauki .....	63
6 Wdrożenie systemu sterowania w budynku biurowym wyposażonym w Centrum Przetwarzania Danych.....	85
6.1 Projekt serwerowni i opis instalacji .....	85
6.2 Koncepcja i wdrożenie projektu serwerowni.....	88
6.2.1 Opis serwerowni.....	88
6.2.2 Metodyka badań .....	91
6.2.3 Systemy zbierania danych pomiarowych .....	95
6.3 Modele predycyjne i ocena istotności zmiennych pomiarowych.....	96
6.3.1 Wprowadzenie .....	96
6.3.2 Założenia procesu modelowania .....	97
6.3.3 Charakterystyka modeli predycyjnych wykorzystanych w badaniu .....	102
6.3.4 Opis eksperymentów.....	106
6.3.5 Wyniki.....	107
6.4 Budowa modelu automatyki sterowania procesem chłodzenia jednostek serwerowych .....	110
6.4.1 Struktura układu sterowania .....	110

6.4.2	Metody regulacji temperatury .....	113
6.4.3	Klimatyzator jako element wykonawczy.....	120
6.4.4	Optymalizacja sterowania w oparciu o dostępne pomiary temperatury w serwerowni .....	126
6.4.5	Podsumowanie .....	147
6.5	Projekt i wdrożenie rozwiązania instalacji PV i magazynu energii .....	149
6.5.1	Zużycie energii elektrycznej w budynku biurowym wyposażonym w CPD.....	149
6.5.2	Projekt instalacji PV – opis wariantów .....	150
6.5.3	Dobór magazynu energii – opis wariantów .....	151
6.5.4	Analiza opłacalności inwestycji.....	164
7	Podsumowanie i wnioski .....	167
8	Literatura .....	171
9	Spis rysunków .....	182
10	Spis tabel .....	187

# 1 Wstęp

Energetyka jest podstawowym elementem gospodarki narodowej i jest nie tylko gwarancją bezpieczeństwa strategicznego kraju, ale także warunkiem osiągnięcia zrównoważonego wzrostu gospodarczego. Produkcja i zużycie energii w Polsce stale rośnie, wymaga to jednak ciągłej poprawy efektywności wykorzystania energii, poziomu wykorzystania energii odnawialnej, oszczędzania energii i redukcji emisji CO<sub>2</sub> [1]. Aby przetrwać globalną zmianę klimatu, kluczowe znaczenie ma redukcja emisji i oszczędność energii. Aby zmniejszyć wpływ budynków na energię i środowisko, w ostatnich latach wielu ekspertów przeprowadziło badania dotyczące zużycia energii i opublikowało ich wyniki. W wielu artykułach wykazano, że prognozowanie zużycia energii przez budynki jest ważnym krokiem w rozwiązywaniu różnorodnych problemów inżynierskich [2, 3]. Należy jednak podkreślić, że problematyka prognozowania zużycia energii wewnątrz budynku jest zależna od wielu zmiennych, a jej dokładny opis jest skomplikowany. Niewiele prac przedstawia jednak dane pomiarowe stworzone dla obiektów rzeczywistych, zwłaszcza budynków biurowych. Jest to spowodowane trudnością w prowadzeniu pomiarów w długim okresie i stworzeniu odpowiednich warunków do tych pomiarów, np. wyłączeniem pomieszczeń z użytkowania. Zachowanie użytkowników wewnątrz budynków jest ważnym aspektem wykorzystania energii [4]. W budynkach biurowych pomieszczenia są prawie zawsze zajęte przez użytkowników w ciągu dnia, tygodnia, miesiąca, roku. Na przykład w pozycji [5] zestawiono wyniki z 48 biur w 3 budynkach uniwersyteckich w Austrii, składających się z 41 pokoi jednoosobowych i 7 pokoi wieloosobowych. Z przedstawionych wyników wynika, że średnie wykorzystanie tych biur rzadko przekracza 60%, biorąc pod uwagę obliczone 24-godzinne profile prawdopodobieństwa użytkowania. Innym przykładem jest biurowiec zlokalizowany w Singapurze [6]. Jednak stopień wykorzystania nie jest jedyną zmienną wpływającą na zużycie energii elektrycznej w budynkach biurowych [7, 8].

Zadaniem, które było realizowane w ramach doktoratu wdrożeniowego było zaproponowanie rozwiązania oszczędzającego energię i zaprezentowanie strategii kontrolowanego zużycia energii w budynku biurowym wyposażonym w Centrum Przetwarzania Danych (CPD). Optymalizacja i zarządzanie zużyciem energii wymaga pełnego zrozumienia efektywności budynku [9]. Należy przede wszystkim określić przeznaczenie budynku i końcowych użytkowników. Badania dotyczące końcowego przeznaczenia budynków pokazują, że można je podzielić na sześć części, obejmujących: systemy ogrzewania, wentylację, klimatyzację (HVAC), oświetlenie, gniazdka elektryczne i zastosowania specjalne, takie jak windy, kuchnie i pomieszczenia usługowe itp. [10] Na podstawie badań wykazanych przez liczne pozycje literaturowe, w tym te podkreślone wcześniej, ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja (HVAC) odpowiadają za większość (40%) zużycia energii wewnątrz budynku [11].

Wiadomo, że zużycie energii wewnątrz budynku zależy od wielu zmiennych, takich jak pogoda, izolacja cieplna budynku na zewnątrz, zachowanie użytkowników, położenie geograficzne. Ponadto energia



elektryczna zużywana przez budynki charakteryzuje się oczywistymi wzorcami sezonowymi i niepewnością [12].

W ostatnich latach wielu naukowców wykorzystuje metody czarnych skrzynek, bazujących na własnych danych służących do przewidywania zużycia energii wewnątrz budynków. Metody oparte na danych pomijają proces modelowania fizycznego [13-14]. Istnieją trzy główne metody wykorzystujące modele oparte na danych do tworzenia prognoz okresów, które obejmują analizę statystyczną, uczenie maszynowe i głębokie uczenie się. Najpopularniejszymi metodami analizy statystycznej jest ARIMA. Metoda ta w dużej mierze opiera się na danych historycznych. Jeśli jednak dane są bardzo zmienne, to metoda ta nie jest właściwa, szczególnie do przewidywania długoterminowych okresów [15]. Wśród metod uczenia maszynowego w przewidywaniu okresów czasu najczęściej wykorzystuje się metody: k-bliskich sąsiadów (KNN), sztuczne sieci neuronowe (ANN) i maszyny wektorów wspieranych (SVM) [16-26]. Wszystkie proponowane modele wykorzystują również jako dane wejściowe historyczne pomiary użytkownika budynków. Z tego powodu we wszystkich rozwiązaniach jego precyzja w dużej mierze zależy od wiarygodności i dokładności danych. Jednocześnie w literaturze zaproponowano wiele metod prognostycznych zużycia energii elektrycznej [10, 27-39].

W pracy przeprowadzono wiele analiz zaproponowanych rozwiązań ograniczających zużycie energii budynku biurowego wyposażonego w Centrum Przetwarzania Danych (CPD). Koncepcja systemu sterowania i pomiarów dla nowego budynku biurowego wyposażonego w CPD została przeze mnie opracowana. Przygotowane przeze mnie lub przy moim współudziale projekt budowlany oraz projekty wykonawcze, przeszły weryfikację i zakończyły się uzyskaniem pozwolenia na budowę w 2021 r. Jednak wprowadzone w czasie panowania wirusa Covid-19 zmiany w sposobie realizacji obowiązków przez pracowników, przejście częściowo na pracę zdalną, spowodowało czasowe odstąpienie od budowy nowego budynku biurowego CRON. Dlatego drugim wdrożeniem opracowanym w trakcie realizacji pracy było opracowanie projektu nowej serwerowni (Data Center) w istniejącym budynku biurowym K-133. Wdrożenie koncepcji sterowania ogrzewaniem i klimatyzacją oraz budowa CPD doszła do skutku w 2022 r. Dodatkowo przygotowano i wdrożono instalację PV wraz z magazynem energii dla budynku biurowego (K-133) wyposażonego w Data Center. Wszystkie projekty i wdrożenia zostały poprzedzone badaniami i analizą pracy urządzeń elektrycznych wykorzystywanych w celach grzewczych, chłodzenia, oświetlenia oraz sterowania i automatyki. Wnioski uzyskane na podstawie zebranych danych i przeprowadzonych analiz pozwoliły zaproponować modyfikacje i usprawnienia działających systemów. W badaniach wykorzystano klasyczną analizę sterowania automatyką urządzeń oraz modele predykcyjne wykorzystujące sztuczną inteligencję. Niezbędnym aspektem badań było przygotowanie systemu pomiarowego do rejestracji i analizy ogromnej liczby danych.

Rozprawa doktorska została opracowana w następujący sposób. W pierwszej części dla istniejącego budynku biurowego przeprowadzono badania wstępne, których celem było przygotowanie systemu pomiarowego, ocena wpływu warunków zewnętrznych na zużycie energii w pomieszczeniach znajdujących się w różnych częściach budynku oraz ocena parametrów sterowania instalacją ogrzewania / chłodzenia tj. czas

pracy, temperatura regulacji na zużycie energii elektrycznej. Wiedzę pozyskaną z przeprowadzanych badań wykorzystano do opracowania projektów: budowlanego, wykonawczych i instalacji dla nowego budynku biurowego. Na podstawie wcześniejszych badań wskazano inny systemy instalacji grzewczej i chłodzenia.

Drugi etap pracy dotyczy przygotowania i wdrożenia systemu sterowania i automatyki układu klimatyzacji dla Centrum Przetwarzania Danych. Projekt ten zakończył się wdrożeniem proponowanych rozwiązań. Opracowany system pomiarowy do rejestracji i analizy danych pozwolił na wykorzystanie narzędzi informatycznych do budowy systemu predykcji temperatury w kanale ciepłym i ocenę istotności mierzonych w serwerowni zmiennych. Wykorzystano również wiedzę uzyskaną na podstawie klasycznej analizy z zakresu automatyki i sterowania pracą urządzeń chłodzących. Istotnym rezultatem tych badań było dokonanie usprawnień pozwalających dodatkowo zmniejszyć zużycie energii elektrycznej w budynku. Ostatnim elementem badań i wdrożenia było opracowanie instalacji PV wraz magazynem energii dla budynku, w którym znajduje się nowa serwerownia. Badania obejmowały również analizę opłacalności proponowanych rozwiązań.

## 2 Automatyka i Sterowanie Budynkiem

### 2.1 Historia automatyki i sterowania budynkiem

Automatyka budynku to dziedzina, która zajmuje się zarządzaniem, kontrolą i monitorowaniem systemów budynkowych takich jak ogrzewanie, wentylacja, klimatyzacja (HVAC), oświetlenie, systemy bezpieczeństwa oraz inne mechanizmy wpływające na komfort i efektywność energetyczną budynku. Jej rozwój jest wynikiem dążenia do zwiększenia efektywności energetycznej, poprawy komfortu użytkowników oraz zapewnienia bezpieczeństwa. W tym rozdziale pracy przedstawiono historię automatyki budynku od jej początków, aż po współczesne rozwiązania. Zrozumienie tej ewolucji pozwoliło lepiej docenić, jakie zmiany zaszły w kwestii technologii zarządzania budynkami oraz jakie daje to nowoczesne możliwości i zastosowania.

Automatyka inteligentnego budynku ma swoje korzenie w rozwoju technologii komputerowych i systemów sterowania w XX wieku. Pierwsze próby stworzenia inteligentnych systemów zarządzania budynkami pojawiły się już w latach 70. i 80. XX wieku, jednak prawdziwy rozwój tej dziedziny nastąpił w ostatnich kilkunastu latach. Początkowo automatyka inteligentnego budynku ograniczała się głównie do prostych systemów kontroli oświetlenia, ogrzewania i klimatyzacji. Jednak wraz z postępem technologicznym i rozwojem Internetu rzeczy (IoT) możliwości inteligentnego zarządzania budynkiem znacznie się rozszerzyły. Obecnie inteligentny budynek może być zarządzany za pomocą zaawansowanych systemów sterowania, które integrują różne urządzenia i systemy w jedną spójną całość. Dzięki temu możliwe jest optymalne zarządzanie zużyciem energii, monitorowanie warunków środowiskowych, zapewnienie bezpieczeństwa oraz komfortu użytkowników.

Chociaż współczesna automatyka budynku opiera się na zaawansowanych technologiach, jej korzenie sięgają czasów starożytnych. Już w starożytnym Rzymie używano pierwszych systemów do zarządzania komfortem wewnętrznym. Rzymianie stosowali hypocaustum – system centralnego ogrzewania, który polegał na rozprowadzaniu ciepła z pieca przez puste przestrzenie pod podłogami i ścianami. Był to jeden z pierwszych przykładów, jak ludzkość próbowała kontrolować warunki wewnętrzne budynków dla poprawy komfortu życia. System ten, mimo swojej prostoty, był niezwykle efektywny i świadczył o zaawansowanym rozumieniu zasad termodynamiki przez starożytnych inżynierów.

Prawdziwy rozwój automatyki budynku rozpoczął się wraz z rewolucją przemysłową w XVIII i XIX wieku. Wynalezienie termostatu przez Corneliusa Drebbela w XVII wieku oraz rozwój systemów grzewczych i wentylacyjnych były kamieniami milowymi. James Watt, wynalazca maszyny parowej, przyczynił się do powstania bardziej efektywnych systemów ogrzewania. Te wynalazki były przełomowe, ponieważ pozwoliły na bardziej precyzyjną kontrolę temperatury i wentylacji w budynkach, co bezpośrednio przekładało się na komfort mieszkańców. Rewolucja przemysłowa wprowadziła również elektryczność do budynków, co otworzyło nowe możliwości dla automatyki. Elektryczne systemy oświetlenia, ogrzewania i wentylacji stały się bardziej powszechne, a ich automatyzacja była naturalnym krokiem w kierunku poprawy efektywności i

komfortu. Dzięki elektryczności możliwe stało się również wprowadzenie pierwszych systemów alarmowych i zabezpieczeń, które z czasem ewoluowały w skomplikowane systemy bezpieczeństwa używane dzisiaj.

Wiek XX to początki nowoczesnej automatyki budynku. Pierwsze systemy automatyki budynkowej oparte na elektryczności pojawiły się na początku XX wieku. W 1906 roku Albert Butz wynalazł pierwszy elektryczny termostat, który mógł automatycznie sterować systemami grzewczymi w zależności od temperatury wewnętrznej budynku. Było to ogromne ułatwienie w zarządzaniu komfortem cieplnym. Termostat Butza był prostym, ale skutecznym urządzeniem, które mogło włączać i wyłączać ogrzewanie w odpowiedzi na zmieniające się warunki, co nie tylko poprawiało komfort, ale również pomagało w oszczędzaniu energii. W tym samym czasie rozwijano również pierwsze systemy wentylacyjne, które mogły automatycznie dostosowywać przepływ powietrza w budynkach. Rozwój tych technologii był kluczowy dla zapewnienia zdrowego i komfortowego środowiska wewnętrznego, zwłaszcza w dużych budynkach użyteczności publicznej, takich jak szpitale, biura i szkoły. Automatyka zaczęła odgrywać coraz większą rolę w codziennym życiu, a jej znaczenie rośnie wraz z postępem technologicznym i rosnącymi wymaganiami użytkowników budynków.

W latach 50. i 60. XX wieku automatyka budynku zaczęła korzystać z komputerów i mikroprocesorów. Pierwsze systemy zarządzania budynkiem (BMS - Building Management Systems) były w stanie kontrolować różne aspekty budynku z jednego centralnego punktu. Systemy te były stosowane głównie w dużych budynkach komercyjnych i przemysłowych. Dzięki zastosowaniu komputerów możliwe stało się monitorowanie i sterowanie skomplikowanymi systemami HVAC, oświetleniem, bezpieczeństwem i innymi elementami budynków z jednego miejsca, co znacznie uprościło zarządzanie i poprawiło efektywność.

W 1968 roku Honeywell wprowadził swój pierwszy system BMS, który mógł monitorować i sterować ogrzewaniem, wentylacją i klimatyzacją (HVAC). Był to przełomowy moment, który zapoczątkował nową erę w zarządzaniu budynkami. Systemy BMS zaczęły integrować różne technologie i protokoły komunikacyjne, co pozwoliło na jeszcze bardziej precyzyjne i efektywne zarządzanie budynkami. Rozwój tych systemów był napędzany przez rosnące potrzeby komercyjnych i przemysłowych budynków, które wymagały coraz bardziej zaawansowanych rozwiązań do zarządzania energią, bezpieczeństwem i komfortem.

W latach 80-tych i 90-tych XX wieku rozwój technologii informacyjnych i telekomunikacyjnych umożliwił dalszą integrację systemów budynkowych. Powstały zaawansowane systemy automatyki budynkowej, które mogły zarządzać oświetleniem, bezpieczeństwem, systemami przeciwpożarowymi oraz innymi urządzeniami w budynku. Nowe technologie pozwoliły na bardziej zintegrowane i inteligentne systemy, które mogły współpracować ze sobą w celu optymalizacji wszystkich aspektów zarządzania budynkiem. Prawdziwą zmianą było wprowadzenie protokołów komunikacyjnych takich jak BACnet (Building Automation and Control Networks) oraz LonWorks ułatwiło integrację różnych systemów od różnych producentów, co znacznie zwiększyło elastyczność i funkcjonalność systemów BMS. Standardy te pozwoliły na łatwiejszą integrację i komunikację między różnymi urządzeniami i systemami, co przyczyniło się do stworzenia bardziej kompleksowych i efektywnych rozwiązań w zarządzaniu budynkami. Dzięki tym

postępom, możliwe stało się zarządzanie budynkiem jako całością, co znacznie poprawiło efektywność energetyczną i komfort użytkowników.

Prawdziwy skok cywilizacyjny w zakresie automatyki budynków to XXI wiek i zastosowanie nowoczesnych technologii. W XXI wieku automatyka budynku osiągnęła nowy poziom dzięki rozwojowi technologii Internetu Rzeczy (IoT), sztucznej inteligencji (AI) oraz big data. Inteligentne budynki, wyposażone w zaawansowane systemy czujników i kontrolerów, mogą teraz samodzielnie uczyć się i optymalizować swoje działanie, aby maksymalizować efektywność energetyczną i komfort użytkowników. Nowoczesne technologie pozwalają na jeszcze bardziej precyzyjne i efektywne zarządzanie budynkami, a także na wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań, takich jak autonomiczne systemy zarządzania energią. Przykłady nowoczesnych systemów automatyki budynkowej obejmują inteligentne oświetlenie, zaawansowane systemy HVAC, systemy bezpieczeństwa oraz zarządzanie energią. Inteligentne oświetlenie dostosowuje jasność i kolor światła w zależności od pory dnia, obecności ludzi w pomieszczeniu oraz naturalnego światła zewnętrznego. Zaawansowane systemy HVAC mogą przewidywać zapotrzebowanie na ciepło lub chłód na podstawie prognoz pogody i nawyków użytkowników. Systemy bezpieczeństwa, wyposażone w kamery i czujniki ruchu zintegrowane z systemami AI, mogą wykrywać nieprawidłowe zachowania i automatycznie powiadamiać służby ochrony. Zarządzanie energią to systemy, które monitorują i optymalizują zużycie energii w budynku, redukując koszty i zmniejszając emisję CO<sub>2</sub>. Te nowoczesne rozwiązania sprawiają, że budynki są bardziej zrównoważone, bezpieczne i komfortowe dla użytkowników.

W przyszłości można się spodziewać dalszego rozwoju automatyki inteligentnego budynku, w tym wykorzystanie nowych technologii, takich jak blockchain czy sztuczna inteligencja, które mogą jeszcze bardziej usprawnić zarządzanie budynkiem i poprawić jakość życia jego użytkowników. W kolejnych latach wydaje się, że rozwój technologii w dziedzinie automatyki budynku będzie nadal postępował. Przyszłość to inteligentne budynki, które będą w pełni autonomiczne i samouczące się. Dzięki postępom w AI, IoT oraz technologii blockchain, systemy automatyki budynku staną się jeszcze bardziej zintegrowane, bezpieczne i efektywne. Możemy spodziewać się, że w przyszłości budynki będą nie tylko zarządzać energią, ale także produkować ją dzięki zintegrowanym systemom odnawialnych źródeł energii, takim jak panele słoneczne i turbiny wiatrowe. Dodatkowo, rozwój technologii 5G umożliwi jeszcze szybszą i bardziej niezawodną komunikację pomiędzy urządzeniami, co dodatkowo zwiększy możliwości automatyki budynku. Budynki przyszłości będą wyposażone w zaawansowane systemy zarządzania, które będą w stanie przewidywać i reagować na zmieniające się warunki w czasie rzeczywistym. Technologia blockchain może również odegrać ważną rolę w zabezpieczaniu danych i transakcji, co jest kluczowe w kontekście rosnącej liczby połączonych urządzeń i systemów.

Przyszłość automatyki budynku to również rozwój technologii związanych z zarządzaniem wodą i odpadami, co pozwoli na jeszcze bardziej zrównoważone i ekologiczne funkcjonowanie budynków. Możemy spodziewać się, że inteligentne budynki będą mogły samodzielnie zarządzać zużyciem wody, recyklingiem i gospodarką odpadami, co przyczyni się do zmniejszenia ich wpływu na środowisko. Dzięki tym innowacjom,

automatyka budynku będzie odgrywać kluczową rolę w tworzeniu bardziej zrównoważonych i przyjaznych środowisku miast przyszłości.

Automatyka budynku to także odpowiedź na rosnące wymagania dotyczące zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. Nowoczesne systemy umożliwiają optymalizację zużycia energii, redukcję emisji CO<sub>2</sub> oraz minimalizację kosztów eksploatacyjnych. To, co zaczynało się jako próba mechanizacji prostych funkcji budynkowych, dziś przekształciło się w kompleksowe rozwiązania technologiczne, które integrują różne aspekty zarządzania budynkiem, tworząc inteligentne i zrównoważone środowiska pracy oraz życia. Przyjrzyjmy się bliżej, jak ta ewolucja przebiegała na przestrzeni wieków.

## 2.2 Nowoczesne instalacje w budynkach

Nowoczesna instalacja elektryczna powinna spełniać wymogi techniczne, zapewniać pożądaną komfort użytkownika, dostarczać energię na określonym poziomie niezawodności, realizować funkcje sterowania i automatyki oraz być zintegrowana z innymi instalacjami w budynku (ogrzewanie, klimatyzacja, sieć strukturalna, telefoniczna i internetowa). Wymogi techniczne nowoczesnej instalacji obejmują właściwy dobór mocy zapotrzebowanej, zaplanowanie instalacji, dobór przewodów instalacyjnych, zabezpieczeń przetężeniowych, ochrony przeciwprzepięciowej oraz ochrony przeciwporażeniowej.

Różnica między konwencjonalnymi, a nowoczesnymi instalacjami polega na tym, że te pierwsze wykorzystują tradycyjne podejście do prowadzenia instalacji, głównie z wykorzystaniem standardowych przewodów i urządzeń. Natomiast nowoczesne, wykorzystują stosowanie systemy magistralowe, które pozwalają na lepszą integrację i sterowanie różnymi funkcjami budynku. Instalacje elektryczne w budynkach można klasyfikować według różnych kryteriów. Dwa najważniejsze kryteria to:

- Ze względu na rodzaj obiektu budowlanego:
  - obiekty użyteczności publicznej,
  - budownictwo przemysłowe,
  - budownictwo komunalne,
  - budownictwo ogólne,
  - budownictwo mieszkaniowe.
- Ze względu na przeznaczenie instalacji:
  - dostarczające energię (instalacje odbiorcze, oświetleniowe, grzewcze),
  - odprowadzające energię wyładowania atmosferycznego (odgromowe),
  - przekazujące informacje (telekomunikacyjne, teletechniczne).

Podstawowym pojęciem określającym nowoczesne instalacje to automatyka budynku. Pojęcie to można określić jako zastosowanie systemów sterowania do zarządzania funkcjami budynku. Natomiast systemy sterowania, w nowoczesnych instalacjach, obejmują zarządzanie oświetleniem, osłonami zewnętrznymi (żaluzje, rolety, markizy), systemami bezpieczeństwa oraz zarządzanie energią. Sterowanie to

może być realizowane za pomocą przełączników, paneli dotykowych, zdalnego sterowania oraz wizualizacji na PC. Kolejnym spotykanym w literaturze pojęciem jest instalacja inteligentna. Rozumiana jako system integrujący różne instalacje w budynku (elektryczne, HVAC, bezpieczeństwa). Ostatnim ważnym z punktu widzenia tematu pracy jest pojęcie Inteligentny dom/budynek. Rozumiemy przez to budynek, który jest wyposażony w zaawansowane systemy automatyki zapewniające komfort, bezpieczeństwo i efektywność energetyczną.

Nowoczesne instalacje, zwłaszcza instalacje niskoprądowe, odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa, komfortu oraz efektywności energetycznej współczesnych budynków. Instalacje te obejmują szeroki zakres technologii i systemów, które integrują różne funkcje budynków, takie jak automatyka budynkowa, systemy zarządzania energią, systemy bezpieczeństwa i komunikacji. Instalacje niskoprądowe (czasami nazywanymi instalacjami niskonapięciowymi), to systemy elektryczne działające na napięciu nieprzekraczającym 1 kV dla prądu zmiennego i 1,5 kV dla prądu stałego. Składają się z przewodów, zasilaczy, urządzeń zabezpieczających oraz aparatury rozdzielczej i sterowniczej. Celem tych instalacji jest dostarczenie energii elektrycznej do różnych odbiorników oraz zapewnienie bezpiecznego i efektywnego zarządzania systemami budynków [40, 41].

W literaturze znajdziemy wiele zastosowań Instalacji Niskoprądowych (IN). W budynkach pełnią one dwie najważniejsze funkcje: system bezpieczeństwa i kontroli dostępu – rozumiane jako zapewnienie bezpieczeństwa oraz kontroli dostępu w budynkach mieszkalnych, biurowych i przemysłowych. Systemy alarmowe, monitoring wizyjny (CCTV), systemy kontroli dostępu oraz czujniki dymu, gazu i tlenku węgla są kluczowymi elementami tych instalacji. Dzięki nim możliwe jest śledzenie ruchu osób w budynkach, zapobieganie włamaniom oraz szybkie reagowanie na zagrożenia [42, 41]. Automatyka budynkowa i zarządzanie energią umożliwiają zarządzanie systemami HVAC, oświetleniem i innymi systemami technicznymi budynku. Inteligentne systemy zarządzania energią monitorują i optymalizują zużycie energii, dostosowując działanie systemów do aktualnych warunków i potrzeb użytkowników. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie efektywności energetycznej i redukcja kosztów eksploatacyjnych [41].

Nie możemy jednak zapominać o tym, że wdrożenie nowoczesnych instalacji niskoprądowych czasami wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi, co może być barierą dla niektórych inwestorów i właścicieli budynków [43]. Ponadto instalacje niskoprądowe są narażone na zagrożenia związane z cyberbezpieczeństwem. Zapewnienie odpowiedniego poziomu zabezpieczeń i ochrony przed atakami cybernetycznymi jest kluczowym wyzwaniem ostatnich lat [40]. Pomimo tych zagrożeń to przyszłość instalacji niskoprądowych wiąże się z coraz większą integracją z technologiami Internetu Rzeczy (IoT), co pozwoli na jeszcze lepsze zarządzanie i monitorowanie systemów budynkowych w czasie rzeczywistym [42]. Natomiast sztuczna inteligencja (AI) będzie odgrywać coraz większą rolę w zarządzaniu instalacjami niskoprądowymi, umożliwiając bardziej zaawansowaną analizę danych i optymalizację działania systemów [43]. Nie ma co do tego wątpliwości, że zrównoważony rozwój spowoduje, że instalacje niskoprądowe w

nowoczesnych instalacjach w budynkach będą odgrywać kluczową rolę, umożliwiając efektywne zarządzanie energią i zasobami oraz redukcję emisji CO<sub>2</sub> [42, 43].

### 2.3 Pojęcie inteligencji w budynku

Inteligentne budynki to nowoczesne struktury, które wykorzystują zaawansowane technologie do zarządzania systemami wewnętrznymi i zewnętrznymi, aby zwiększyć komfort, efektywność energetyczną, bezpieczeństwo i zrównoważony rozwój. Pojęcie "inteligencji budynku" obejmuje szeroki zakres technologii, takich jak automatyka budynkowa, systemy zarządzania energią, internet rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja (AI) oraz analiza danych.

1. Internet rzeczy (IoT): IoT odgrywa kluczową rolę w inteligentnych budynkach, umożliwiając komunikację między różnymi urządzeniami i systemami. Czujniki IoT mogą monitorować i zbierać dane dotyczące temperatury, wilgotności, jakości powietrza, zużycia energii i innych parametrów, co pozwala na bardziej precyzyjne zarządzanie budynkiem.

2. Sztuczna inteligencja (AI): AI jest wykorzystywana do analizy danych zbieranych przez czujniki IoT i podejmowania decyzji dotyczących zarządzania budynkiem. Systemy AI mogą uczyć się na podstawie zebranych danych i optymalizować działanie budynku w czasie rzeczywistym, poprawiając efektywność energetyczną i komfort użytkowników.

3. Big Data: Analiza dużych zbiorów danych (big data) pozwala na identyfikację wzorców i trendów, które mogą być wykorzystane do optymalizacji zarządzania budynkiem. Big data umożliwia również przewidywanie przyszłych potrzeb i problemów, co pozwala na proaktywne zarządzanie budynkiem.

4. Systemy Automatyki Budynkowej: Są to centralne systemy zarządzania, które integrują i kontrolują różne systemy budynkowe, takie jak HVAC, oświetlenie, bezpieczeństwo i zarządzanie energią. BMS pozwala na centralne monitorowanie i kontrolowanie wszystkich aspektów działania budynku, co znacznie zwiększa jego efektywność.

5. Zarządzanie Energią: Systemy zarządzania energią monitorują i kontrolują zużycie energii w budynku, optymalizując jej wykorzystanie i minimalizując koszty. Technologie takie jak inteligentne liczniki, panele słoneczne i systemy magazynowania energii są często stosowane w inteligentnych budynkach, aby zwiększyć ich efektywność energetyczną.

Dzięki zaawansowanym systemom technicznym spełnia wymogi użytkownika, zapewniając komfort, rozwój i bezpieczeństwo przy minimalnych kosztach. Na tej podstawie inteligentny budynek to konstrukcja, która integruje technologie informacyjne i komunikacyjne (ICT) z systemami zarządzania budynkiem, aby optymalizować jego działanie. Jego celem, jest stworzenie środowiska, które jest bardziej komfortowe, bezpieczne, efektywne energetycznie i ekologiczne. Inteligentne budynki wykorzystują różnorodne technologie, w tym czujniki, systemy automatyki, sieci komunikacyjne, a także zaawansowane oprogramowanie do analizy i zarządzania danymi. Kluczowymi cechami Inteligentnego Budynku są:



1. **Efektywność Energetyczna:** budynki są zaprojektowane tak, aby minimalizować zużycie energii poprzez zastosowanie systemów zarządzania energią, które monitorują i kontrolują zużycie energii w czasie rzeczywistym. Systemy te mogą automatycznie dostosowywać oświetlenie, ogrzewanie, wentylację i klimatyzację w zależności od warunków pogodowych, pory dnia i obecności ludzi.

2. **Komfort i Zdrowie Użytkowników:** zapewniają wysoki poziom komfortu poprzez optymalne zarządzanie temperaturą, wilgotnością, jakością powietrza i oświetleniem. Systemy te mogą dostosowywać warunki w pomieszczeniach do indywidualnych preferencji użytkowników, co poprawia ich samopoczucie i produktywność.

3. **Bezpieczeństwo:** Systemy bezpieczeństwa w inteligentnych budynkach obejmują zaawansowane technologie monitorowania, takie jak kamery CCTV, czujniki ruchu, systemy kontroli dostępu i alarmy. Te systemy mogą być zintegrowane z centralnym systemem zarządzania budynkiem, co umożliwia szybką reakcję na zagrożenia.

4. **Zrównoważony Rozwój:** Inteligentne budynki przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju poprzez efektywne zarządzanie zasobami, takie jak woda i energia, oraz redukcję emisji dwutlenku węgla. Technologie te wspierają również recykling i zarządzanie odpadami.

5. **Integracja Systemów:** Kluczowym aspektem inteligentnych budynków jest integracja różnych systemów zarządzania budynkiem, takich jak HVAC, oświetlenie, bezpieczeństwo i zarządzanie energią, w jednym, zintegrowanym systemie. To pozwala na lepszą kontrolę i optymalizację wszystkich aspektów działania budynku.

W literaturze znajdziemy wiele przykładów Inteligentnych Budynków, obejmujących zarówno budownictwo użyteczności publicznej, biurowe jak i mieszkalne jednak trudno znaleźć budynki, w których dominującym zużyciem energii są CPD tzw. Big Data [44-48]. Poniżej wybrałem przykłady trzech budynków:

1. **The Edge, Amsterdam:** Jeden z najbardziej zaawansowanych technologicznie budynków na świecie, The Edge jest siedzibą firmy Deloitte w Amsterdamie. Budynek jest wyposażony w systemy IoT, które monitorują i zarządzają zużyciem energii, oświetleniem, klimatyzacją i innymi systemami. The Edge zdobył najwyższy możliwy wynik w ocenie zrównoważonego budownictwa BREEAM [49].

2. **Capital Tower, Singapur:** Capital Tower to inteligentny budynek biurowy w Singapurze, który wykorzystuje zaawansowane technologie do zarządzania energią, oświetleniem i bezpieczeństwem. Budynek jest wyposażony w systemy IoT i AI, które monitorują i optymalizują działanie różnych systemów, zwiększając efektywność energetyczną i komfort użytkowników [50].

3. **One Central Park, Sydney:** One Central Park to mieszkalny kompleks w Sydney, który łączy zrównoważone technologie z nowoczesnym designem. Budynek jest wyposażony w systemy zarządzania energią, które wykorzystują panele słoneczne, systemy recyklingu wody i inteligentne oświetlenie, aby minimalizować wpływ na środowisko i zapewniać wysoki poziom komfortu mieszkańcom [51].

Zastosowanie rozwiązań inteligentnego budynku pozwala na znaczne zmniejszenie zużycia energii poprzez optymalizację systemów HVAC, oświetlenia i innych systemów budynkowych. Dzięki zastosowaniu

zaawansowanych technologii, takich jak IoT i AI, inteligentne budynki mogą automatycznie dostosowywać swoje działanie do aktualnych warunków, co prowadzi do znacznych oszczędności energetycznych [52, 53]. Ponadto takie rozwiązania zapewniają wyższy poziom komfortu dzięki zaawansowanym systemom zarządzania klimatem, oświetleniem i jakością powietrza. Systemy te mogą dostosowywać warunki w pomieszczeniach do indywidualnych preferencji użytkowników, co poprawia ich samopoczucie i produktywność. Bardzo istotną cechą nowoczesnych rozwiązań są zintegrowane systemy bezpieczeństwa w inteligentnych budynkach, które obejmują zaawansowane technologie monitorowania, takie jak kamery CCTV, czujniki ruchu, systemy kontroli dostępu i alarmy. Dzięki centralnemu zarządzaniu i integracji różnych systemów, inteligentne budynki mogą szybciej i skuteczniej reagować na zagrożenia [54]. Przez to inteligentne budynki przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju poprzez efektywne zarządzanie zasobami, redukcję emisji dwutlenku węgla oraz minimalizację odpadów. Technologie te wspierają również recykling i zarządzanie odpadami, co przyczynia się do ochrony środowiska. Co bardzo istotne dzięki optymalizacji zużycia energii i innych zasobów, inteligentne budynki mogą znacznie obniżyć koszty eksploatacji. Systemy zarządzania energią, automatyka budynkowa i inne zaawansowane technologie pozwalają na bardziej efektywne zarządzanie budynkiem, co przekłada się na oszczędności finansowe [55].

Jednym z głównych wyzwań związanych z inteligentnymi budynkami są wysokie koszty inwestycyjne związane z wdrożeniem zaawansowanych technologii. Chociaż koszty te mogą być znaczące, oszczędności wynikające z optymalizacji zużycia energii i innych zasobów często przeważają początkowe wydatkami. Niezwykle ważnym wyzwaniem związanym z inteligentnymi budynkami jest zarządzanie danymi. Inteligentne budynki generują ogromne ilości danych, które muszą być skutecznie zarządzane i analizowane. Wyzwania związane z przetwarzaniem, przechowywaniem i ochroną danych wymagają zaawansowanych narzędzi i technologii, takich jak big data i AI. Pomimo tych wyzwań przyszłość inteligentnych budynków jest obiecująca, i jest związana z ciągłym rozwojem technologii i rosnącym zainteresowaniem zrównoważonym rozwojem. Oczekuje się, że w nadchodzących latach inteligentne budynki będą coraz bardziej zaawansowane i zintegrowane, z większym naciskiem na zrównoważony rozwój i efektywność energetyczną. Główną rolę będzie odgrywać rozwiązania sztucznej inteligencji (AI) oraz Internetu rzeczy (IoT).

## **2.4 Internet rzeczy (IoT)**

Internet rzeczy (IoT) to koncepcja rozwoju sieci komputerowych, która zakłada rozproszenie modułów sieciowych i włączenie ich do Internetu jako pełnoprawne węzły. IoT umożliwia komunikację i wymianę danych między urządzeniami oraz użytkownikami, wprowadzając nową jakość w struktury komunikacyjne sieci Internet.

Kluczowe założenia IoT:

1. Zdolność wzajemnej identyfikacji – każdy obiekt w sieci może odnaleźć i zidentyfikować inne obiekty,
2. Komunikacja P2P – ciągła wymiana danych między obiektami,
3. Interakcja i interoperacyjność – wszystkie obiekty mogą współpracować ze sobą.

Struktura sieci IoT jest dynamiczna i rozproszona. Inteligentne obiekty (Smart Obiekty) generują, odbierają i przetwarzają dane. Powinny one posiadać unikalny identyfikator, interfejs komunikacyjny, zdolność do akwizycji i przetwarzania danych oraz podejmowania autonomicznych decyzji. Kategorie aplikacji Smart Obiektów:

1. Aktywne Smart Obiekty – szybkie wykrywanie zdarzeń, analiza danych, autonomiczne działania,
2. Porównawcze Smart Obiekty – interpretacja i porównanie danych z predefiniowanymi parametrami,
3. Smart Obiekty zorientowane procesowo – sterowanie urządzeniami lub procesami z pełną interakcją z użytkownikiem.

IoT wspiera zarządzanie energią w budynkach, umożliwiając zdalne sterowanie popytem na energię oraz integrację odnawialnych źródeł energii. Inteligentne liczniki energii są kluczowym elementem systemów zarządzania energią. Systemy te umożliwiają zdalne zarządzanie popytem na energię, obsługę rozproszonych źródeł energii oraz monitoring zużycia energii. Protokół IP i rozwiązania IoT otwierają nowe możliwości w automatyce budynkowej, umożliwiając integrację i zarządzanie rozproszonymi systemami sterowania. IoT wprowadza nową jakość w funkcjonowaniu inteligentnych budynków i miast, pozwalając na lepszą kontrolę, zarządzanie i optymalizację zasobów oraz procesów w budynkach i ich otoczeniu [56].

## 2.5 Sztuczna inteligencja (AI)

Jako dziedzina informatyki, sztuczna inteligencja (Artificial Intelligence AI) ma na celu tworzenie systemów zdolnych do wykonywania zadań, które zwykle wymagają ludzkiej inteligencji. Zadania te obejmują rozumowanie, rozwiązywanie problemów, rozumienie języka, rozpoznawanie wzorców i podejmowanie decyzji. Systemy AI opierają się na algorytmach i modelach do przetwarzania danych i podejmowania decyzji. Te systemy mogą uczyć się z danych, dostosowywać do nowych wejść i wykonywać zadania z coraz większą dokładnością.

Jedną z podstawowych zdolności sztucznej inteligencji to przewidywanie danych. Umożliwia ona systemom prognozowanie przyszłych trendów na podstawie historycznych danych. Proces ten obejmuje kilka kroków, w tym zbieranie danych, czyszczenie danych, selekcję cech, trenowanie modelu i walidację.

1. Zbieranie Danych: Zebranie odpowiednich i dokładnych danych to pierwszy krok w przewidywaniu.
2. Czyszczenie Danych: Polega na usunięciu niespójności i błędów z danych w celu poprawy dokładności.
3. Selekcja Cech: Identyfikacja najbardziej istotnych cech, które wpływają na wynik.
4. Trenowanie Modelu: Wykorzystanie algorytmów do trenowania modelu na historycznych danych.
5. Walidacja: Testowanie modelu w celu zapewnienia jego dokładności i niezawodności.

Techniki AI, takie jak analiza regresji, analiza szeregów czasowych i głębokie uczenie są wykorzystywane do modelowania predykcyjnego. W literaturze można znaleźć różne metody uczenia maszynowego, które można wykorzystać do modelowania systemów energetycznych budynków [57]. Do najpopularniejszych należą:

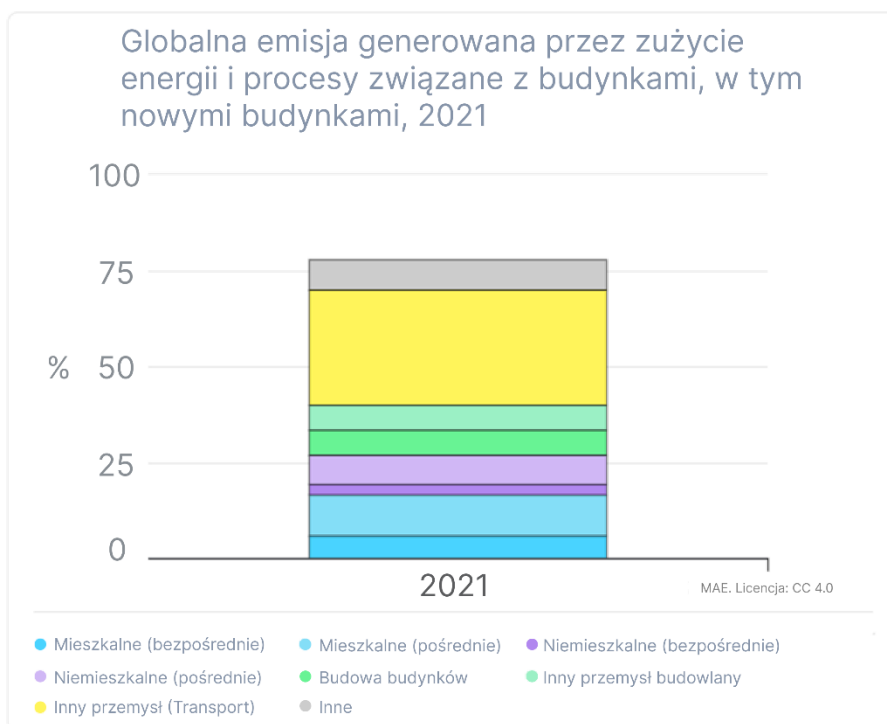
- Sztuczna sieć neuronowa (ANN),

- Metody zespołowe oparte na drzewach, takie jak losowy las lub drzewa wzmocnione gradientem,
- Maszyna wektorów nośnych (SVM),
- Metody oparte na odległości (kNN),
- Wieloczynnikowa regresja liniowa (MLR).

### 3 Technologie i Systemy Automatyki Budynku

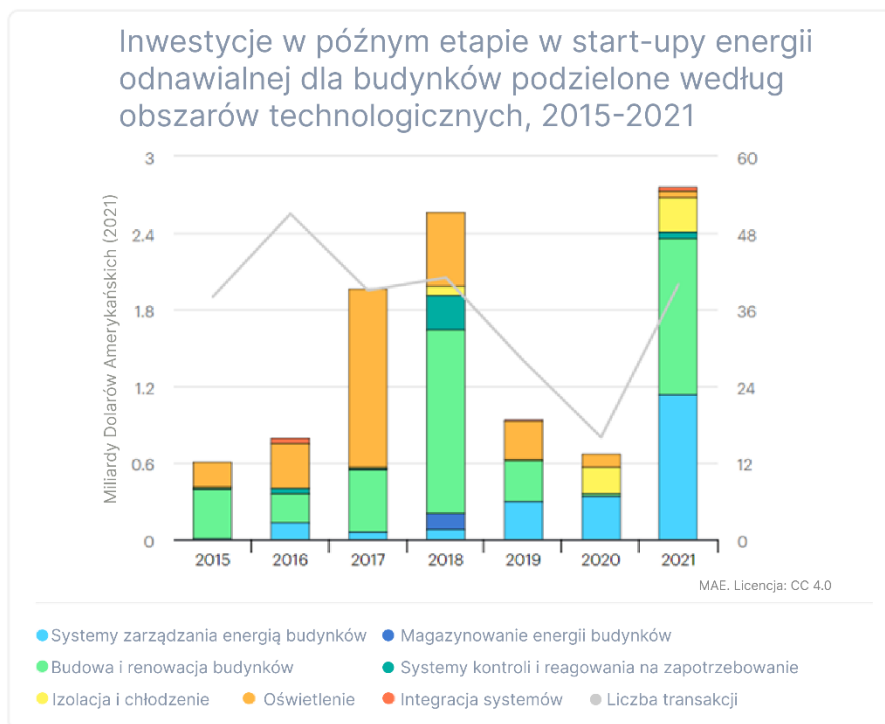
#### 3.1 Wprowadzenie

W 2021 roku eksploatacja budynków odpowiadała za 30% światowego końcowego zużycia energii i 27% całkowitej emisji z sektora energetycznego, z czego 8% stanowiły emisje bezpośrednie w budynkach, a 19% to emisje pośrednie powstałe w wyniku produkcji zużytej energii elektrycznej i ciepła w budynkach [58]. Dotyczy to zarówno budynków mieszkalnych, jak i niemieszkalnych (rys. 1). Dlatego też w ostatnich latach pojawia się coraz więcej publikacji na temat stosowania bardziej wydajnych technologii OZE w budynkach oraz wykorzystania sztucznej inteligencji do sterowania automatyką w inteligentnych budynkach. Część z nich dotyczy obiektów Data Center [59-61]. Trudniej jednak znaleźć informacje o obiektach użyteczności publicznej czy budynkach biurowych wyposażonych w Data Center.



Rysunek 1. Emisje energii z budynków w 2021 roku [58]

W latach 2015-2021 najczęstszymi rozwiązaniami ograniczającymi zużycie energii w budynkach były systemy zarządzania energią oraz modernizacja budynków. Choć wykorzystanie nowych technologii do predykcji sterowania systemami budynkowymi czy inwestycje w magazyny energii były mniej popularne (rys. 2).



Rysunek 2. Inwestycje w rozwiązania czystej energii dla start-upów budynków, lata 2015-2021 [58]

Od kilku lat obserwujemy rozwój modelowania energetycznego budynków. Znajduje zastosowanie w projektach energooszczędnych [62], eksploatacji [63] i modernizacji budynków [64]. Rozwój technologii modelowania i wizualizacji budynków przynosi ogromne korzyści w dziedzinie badań nad efektywnością energetyczną budynków [65]. Z drugiej jednak strony wyzwaniem jest złożona integracja wszystkich tych systemów [66]. Dobrym rozwiązaniem jest wykorzystanie technologii sztucznej inteligencji, która pozwala na samouczenie się, samodzielne podejmowanie decyzji i samoaktualizację [67].

Koncepcja budynków sztucznej inteligencji (Building Automation Systems - BAS) pojawiła się kilkanaście lat temu [68-70]. Umożliwiają optymalne zarządzanie energią przy wykorzystaniu nowo opracowanych technologii, takich jak algorytmy sztucznej inteligencji (AI), big data (BD), internet rzeczy (IoT) i inne powiązane udogodnienia [71, 72]. Najpopularniejszymi rozwiązaniami BAS są metody oparte na danych. W literaturze [73, 74] możemy znaleźć przykłady systemów zarządzania energią wspieranych przez big data (temperatura zewnętrzna, promieniowanie słoneczne, warunki otoczenia w sąsiedztwie i inne historyczne dane klimatyczne). Ma to na celu przewidywanie energii grzewczej przy jednoczesnym skróceniu czasu pracy systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC) w budynku. Kolejną ważną kwestią jest prognozowanie produkcji energii ze źródeł odnawialnych [75, 76], co pozwala na lepsze zarządzanie wytworzoną energią, np. poprzez akumulowanie wytworzonej energii poprzez dogrzewanie budynków.

### 3.2 Cechy Systemów Automatyki Budynkowej

W ciągu ostatnich kilkunastu lat automatyka budynkowa (BAS) stała się integralną częścią nowoczesnych budynków, zarówno komercyjnych, jak i mieszkalnych. Systemy te nie tylko zwiększają efektywność energetyczną i komfort użytkowników, ale także odgrywają kluczową rolę w zarządzaniu bezpieczeństwem i operacjami budynku.

Jedną z podstawowych cech systemów automatyki budynkowej jest zdolność do integracji różnorodnych systemów i urządzeń w jednym budynku. Systemy BAS łączą w sobie zarządzanie ogrzewaniem, wentylacją i klimatyzacją (HVAC), oświetleniem, bezpieczeństwem, systemami alarmowymi, monitoringiem wideo oraz kontrolą dostępu. Integracja ta pozwala na centralne zarządzanie i monitorowanie wszystkich aspektów operacyjnych budynku z jednej platformy, co znacząco zwiększa efektywność zarządzania oraz redukuje ryzyko awarii. Nowoczesne systemy BAS są projektowane w sposób modułowy, co umożliwia łatwe dodawanie, modyfikowanie lub usuwanie poszczególnych funkcji lub urządzeń bez zakłócania funkcjonowania całego systemu. Taka modularność jest kluczowa dla długoterminowego zarządzania budynkiem, ponieważ pozwala na stopniowe rozbudowywanie systemu w miarę pojawiania się nowych potrzeb lub technologii [77]. Kolejną ważną cechą systemów BAS jest interoperacyjność, czyli zdolność do współpracy z różnorodnymi urządzeniami i podsystemami pochodzącymi od różnych producentów. Dzięki zastosowaniu standardowych protokołów komunikacyjnych, takich jak BACnet, Modbus czy KNX, systemy BAS mogą integrować urządzenia od różnych dostawców, co pozwala na elastyczne zarządzanie infrastrukturą budynku.

Wraz z rozwojem technologii Internetu Rzeczy (IoT), systemy automatyki budynkowej stały się bardziej zaawansowane, umożliwiając zdalne sterowanie i monitorowanie za pomocą smartfonów, tabletów lub komputerów. IoT pozwala na ciągłe monitorowanie warunków wewnętrznych budynku oraz zdalne sterowanie różnymi urządzeniami. Zdalne sterowanie i monitorowanie systemów BAS wiąże się również z wyzwaniami związanymi z bezpieczeństwem. W miarę jak coraz więcej urządzeń jest podłączonych do Internetu, rośnie ryzyko cyberataków, które mogą zakłócić działanie systemu lub prowadzić do nieautoryzowanego dostępu. Dlatego też, systemy BAS muszą być wyposażone w zaawansowane środki zabezpieczające, takie jak szyfrowanie danych, firewalle oraz systemy autoryzacji wielopoziomowej [78]. W celu umożliwienia efektywnego zdalnego zarządzania, systemy BAS muszą być wyposażone w intuicyjne interfejsy użytkownika, które umożliwiają łatwe monitorowanie i sterowanie różnymi aspektami budynku. Nowoczesne interfejsy są często oparte na technologii przeglądarkowej, co pozwala na dostęp do systemu z dowolnego urządzenia z dostępem do Internetu.

Systemy BAS są w stanie automatycznie zarządzać systemami HVAC, dostosowując temperaturę, wilgotność oraz wentylację w budynku do aktualnych potrzeb użytkowników oraz warunków zewnętrznych. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych algorytmów i czujników, systemy te mogą na bieżąco monitorować warunki w pomieszczeniach i automatycznie dostosowywać działanie urządzeń w celu utrzymania

optymalnych warunków. Automatyzacja procesów obejmuje również zarządzanie oświetleniem w budynku. Systemy BAS mogą automatycznie dostosowywać intensywność oświetlenia w zależności od obecności ludzi w pomieszczeniu, pory dnia, a także warunków zewnętrznych, takich jak nasłonecznienie. Systemy BAS automatyzują również procesy związane z bezpieczeństwem i kontrolą dostępu. Systemy alarmowe, monitoring wizyjny oraz kontrola dostępu mogą być zintegrowane i zarządzane z jednego centralnego punktu, co umożliwia szybkie reagowanie na potencjalne zagrożenia.

Efektywność energetyczna jest jednym z najważniejszych celów systemów automatyki budynkowej. Dzięki zaawansowanym funkcjom monitoringu i sterowania, systemy BAS umożliwiają optymalizację zużycia energii w budynku poprzez automatyczne dostosowywanie pracy urządzeń do bieżących potrzeb. Systemy BAS mogą być również zintegrowane z odnawialnymi źródłami energii (OZE), takimi jak panele fotowoltaiczne czy systemy geotermalne. Integracja ta pozwala na optymalne zarządzanie produkcją i zużyciem energii w budynku, co zwiększa efektywność wykorzystania OZE oraz zmniejsza zależność od zewnętrznych źródeł energii [79]. Systemy BAS umożliwiają również dokładne monitorowanie zużycia energii w czasie rzeczywistym oraz generowanie raportów, które mogą być wykorzystane do analizy efektywności energetycznej budynku. Dane te mogą być wykorzystywane do identyfikacji obszarów, w których możliwe są dalsze oszczędności energii, a także do porównywania zużycia energii z innymi budynkami lub normami branżowymi.

Jedną z najważniejszych zalet systemów BAS jest ich zdolność do znaczącej redukcji zużycia energii, co prowadzi do obniżenia kosztów operacyjnych budynku. Systemy te automatycznie dostosowują działanie urządzeń do aktualnych potrzeb, minimalizując marnotrawstwo energii. Na przykład, systemy HVAC mogą być automatycznie wyłączane w pomieszczeniach, które nie są używane, a oświetlenie może być przyciemniane w zależności od nasłonecznienia. Tego rodzaju optymalizacje prowadzą do znacznych oszczędności, które w dłuższym okresie mogą przewyższać koszty wdrożenia systemu BAS [80]. Systemy BAS pozwalają na precyzyjne dostosowanie warunków środowiskowych w budynku do indywidualnych potrzeb użytkowników. Systemy BAS mogą również monitorować i zarządzać jakością powietrza w budynku, co również jest kluczowe dla zdrowia i komfortu użytkowników. W niektórych nowoczesnych systemach BAS, szczególnie w obiektach komercyjnych i użyteczności publicznej, można spotkać się również z funkcjami zarządzania hałasem i akustyką.

Systemy BAS pozwalają na pełną integrację różnych systemów bezpieczeństwa w budynku, takich jak monitoring wizyjny, systemy alarmowe, kontrola dostępu czy systemy przeciwpożarowe. W sytuacjach kryzysowych, takich jak pożar czy awaria, systemy BAS mogą automatycznie zarządzać procesem ewakuacji budynku. Systemy te mogą kontrolować otwieranie i zamykanie drzwi, uruchamiać sygnały alarmowe, a także kierować ludzi do najbezpieczniejszych wyjść. Systemy BAS mogą również automatycznie monitorować i zabezpieczać budynek przed włamaniem i kradzieżą [81].

Zintegrowane systemy BAS umożliwiają centralne zarządzanie wszystkimi instalacjami budynku z jednego miejsca, co znacząco upraszcza procesy operacyjne. Nowoczesne systemy BAS mogą być



wyposażone w funkcje automatycznego powiadamiania o awariach i diagnostyki, co pozwala na szybkie wykrywanie i naprawę problemów.

Jednym z głównych ograniczeń w stosowaniu systemów BAS jest ich wysoki koszt początkowy, związany zarówno z zakupem sprzętu, jak i z instalacją oraz integracją różnych systemów. Inwestycje w nowoczesne technologie, takie jak zaawansowane czujniki, systemy monitoringu i oprogramowanie zarządzające, mogą być znaczne, co może stanowić barierę dla mniejszych firm i właścicieli budynków mieszkalnych. Dodatkowo, w przypadku starszych budynków, konieczne może być przeprowadzenie prac modernizacyjnych, aby dostosować istniejące instalacje do wymagań systemów BAS, co jeszcze bardziej podnosi koszty inwestycji. Wysoki stopień złożoności systemów BAS może być również wyzwaniem, zwłaszcza podczas instalacji, konfiguracji oraz utrzymania. Systemy te często wymagają zaawansowanej wiedzy technicznej oraz doświadczenia, aby zapewnić ich prawidłowe działanie. W przypadku integracji systemów BAS z istniejącą infrastrukturą budynku, złożoność techniczna może prowadzić do komplikacji, które opóźniają proces wdrożenia lub zwiększają ryzyko błędów.

Aby systemy BAS działały optymalnie, konieczne jest ich regularne aktualizowanie oraz przeprowadzanie rutynowych prac konserwacyjnych. Aktualizacje oprogramowania są niezbędne, aby systemy mogły korzystać z najnowszych technologii i funkcji, a także aby zapewnić zgodność z przepisami i normami.

### **3.3 Porównanie wybranych systemów automatyki budynkowej**

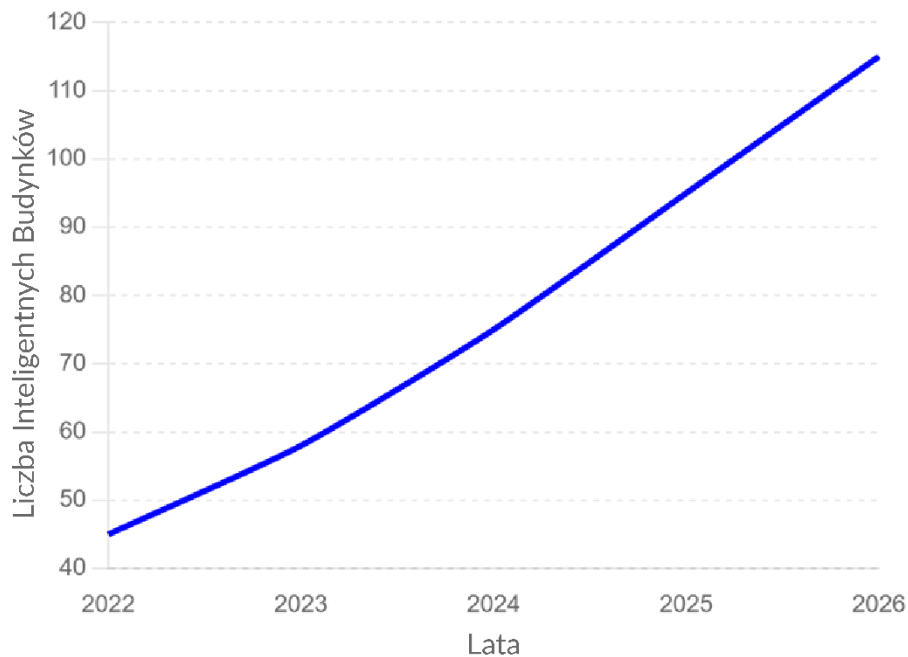
Obecnie wiele firm na rynkach światowych oferuje różne systemy automatyki Budynkowej [82, 83]. Do najbardziej popularnych należą: KNX [84], Honeywell International Inc. [85], Siemens AG [86], Schneider Electric [87], Fibaro [88], Crestron [89], Loxone [90], Trane Technologies [91], Lutron Electronics Co. Ltd [92] i ABB [93]. Przedstawione w tabeli 1 systemy zostały wybrane na podstawie ich obecności na rynku, popularności w różnych regionach oraz zakresu zastosowań.

Rozwój technologii IoT i AI: Integracja IoT i AI w systemach automatyki budynkowej przyspiesza rozwój inteligentnych budynków, umożliwiając zbieranie danych w czasie rzeczywistym, predykcje utrzymania oraz optymalizację zużycia energii. Wzrasta zapotrzebowanie na systemy zarządzania energią, szczególnie w regionach o surowych regulacjach dotyczących efektywności energetycznej, jak Europa i Ameryka Północna. W 2022 roku było uruchomionych około 45 milionów inteligentnych budynków na świecie, a liczba ta ma wzrosnąć do 115 milionów do 2026 roku [94]. Na rysunku 3 przedstawiono trend budowanych inteligentnych budynków (w milionach) na świecie w latach od 2022 do 2026 roku.

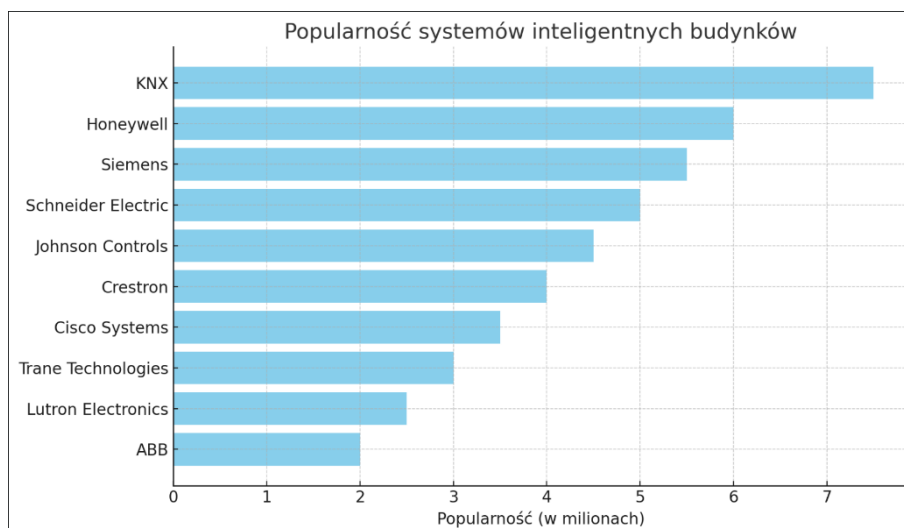
Na rysunku 4 przedstawiono wykres raportujący popularność systemów inteligentnych budynków (w milionach instalacji). Najbardziej popularnym systemem jest KNX, a następnie Honeywell, Siemens, Schneider Electric i inne. Systemy takie jak KNX, Honeywell i Siemens dominują rynek inteligentnych budynków, z tysiącami instalacji na całym świecie.

Tabela 1. Zestawienie wybranych producentów BAS

Nazwa	Cechy	Region	Zastosowanie
KNX,	Międzynarodowy standard automatyki budynkowej. Zapewnia integrację różnych systemów, takich jak oświetlenie, ogrzewanie, wentylacja, bezpieczeństwo i zarządzanie energią. Umożliwia stosowanie zarówno przewodowych, jak i bezprzewodowych mediów komunikacyjnych, a także technologii opartych na linii elektroenergetycznej.	Europa, rosnąca w Azji i Ameryce Północnej	Komercyjne budynki, luksusowe projekty mieszkaniowe
Honeywell International Inc.,	Honeywell Home oferuje szeroką gamę produktów do automatyki domowej, w tym systemy zarządzania ogrzewaniem, klimatyzacją, oświetleniem i bezpieczeństwem.	Ameryka Północna i Europa	Budynki komercyjne, obiekty przemysłowe
Siemens AG,	Siemens Synco Living to zaawansowany system automatyki budynkowej, oferujący zarządzanie oświetleniem, ogrzewaniem, klimatyzacją i bezpieczeństwem. System ten jest znany z niezawodności i skalowalności.	Europa, Ameryka Północna	Budynki komercyjne, szpitale, instytucje edukacyjne
Schneider Electric,	Schneider Electric Wiser to system automatyki domowej, który oferuje zarządzanie oświetleniem, ogrzewaniem, klimatyzacją i bezpieczeństwem. System ten jest zaprojektowany z myślą o łatwości instalacji i użytkowania.	Europa, Azja, Ameryka Północna	Budynki komercyjne, przemysłowe, mieszkalne
Fibaro,	Fibaro to system automatyki budynkowej, który specjalizuje się w bezprzewodowych rozwiązaniach. Umożliwia zarządzanie oświetleniem, ogrzewaniem, klimatyzacją, systemami bezpieczeństwa i multimediami	Europa	Przede wszystkim budynki mieszkalne
Crestron,	Oferuje zaawansowane rozwiązania automatyki budynkowej. Specjalizuje się w integracji systemów AV, oświetlenia, klimatyzacji, bezpieczeństwa i zarządzania energią.	Ameryka Północna, ekspansja globalna	Luksusowe domy, centra konferencyjne, instytucje edukacyjne
Loxone	Loxone to kompleksowy system automatyki budynkowej, obsługujący oświetlenie, ogrzewanie, klimatyzację, systemy bezpieczeństwa, multimedia i wiele innych. Modułowa budowa ułatwia instalację i rozbudowę.	Europa, Ameryka Północna	Budynki komercyjne
Trane Technologies,	RTI oferuje zaawansowane systemy sterowania, integrując oświetlenie, klimatyzację, bezpieczeństwo i multimedia. System jest znany z elastyczności i zaawansowanych funkcji.	Ameryka Północna	Budynki komercyjne, zastosowania przemysłowe
Lutron Electronics Co. Ltd	Rozwiązania Lutron dla całego budynku, takie jak Quantum, wygodnie zarządzać zarówno światłem elektrycznym, jak i światłem dziennym bezpośrednio z pulpitu.	Ameryka Północna	Budynki mieszkalne, komercyjne
ABB	ABB-free@home to system automatyki domowej, który oferuje zarządzanie oświetleniem, ogrzewaniem, klimatyzacją i bezpieczeństwem. System ten jest znany z elastyczności i łatwości instalacji.	Europa, Ameryka Północna	Kompleksowe rozwiązania automatyzacyjne



Rysunek 3. Trend prezentujący liczbę inteligentnych budynków (w milionach) na świecie w latach od 2022 do 2026 roku [95]



Rysunek 4. Wykres popularność systemów inteligentnych budynków [96]

### 3.4 Skalowalność Systemów Automatyki Budynkowej

Skalowalność systemów automatyki budynkowej (BAS) jest jednym z kluczowych aspektów, który determinuje ich zdolność do adaptacji i rozwoju w miarę zmieniających się wymagań użytkowników oraz dynamicznie ewoluujących technologii. W obliczu rosnącej złożoności nowoczesnych budynków, które łączą w sobie różnorodne technologie i systemy, skalowalność staje się fundamentalnym wymogiem, pozwalającym na utrzymanie wysokiej efektywności zarządzania budynkiem oraz maksymalizację zwrotu z inwestycji.

Architektura systemu automatyki budynkowej jest podstawowym czynnikiem determinującym jego skalowalność. Nowoczesne systemy BAS są projektowane w sposób modułowy, co oznacza, że ich elementy

składowe mogą być łatwo dodawane, usuwane lub modyfikowane bez zakłócania funkcjonowania całości. Modułowość zapewnia elastyczność, która jest kluczowa w przypadku rozbudowy budynku, zmiany jego przeznaczenia lub konieczności integracji nowych technologii. Kolejnym aspektem architektury systemu, który wpływa na jego skalowalność, jest wybór pomiędzy centralizacją, a decentralizacją zarządzania. W systemach scentralizowanych wszystkie dane i operacje są przetwarzane w jednym, centralnym punkcie kontrolnym, co ułatwia zarządzanie i monitorowanie, ale może prowadzić do „wąskich gardeł” w przypadku dużych systemów. Z kolei systemy zdecentralizowane, w których poszczególne moduły mogą działać autonomicznie, oferują większą elastyczność i skalowalność, umożliwiając rozproszone zarządzanie w dużych i złożonych budynkach. Takie podejście zmniejsza ryzyko związane z awariami centralnych komponentów systemu i pozwala na lepsze dostosowanie do specyficznych potrzeb różnych części budynku.

Skalowalność systemów automatyki budynkowej będzie odgrywać coraz większą rolę w przyszłości, w miarę jak technologie IoT, AI oraz inne nowoczesne rozwiązania będą się rozwijać i stawać coraz bardziej powszechne w zarządzaniu budynkami. Przewiduje się, że systemy te staną się standardem w nowoczesnym budownictwie, a ich zdolność do elastycznego dostosowywania się do zmieniających się potrzeb użytkowników i technologii będzie kluczowa dla ich długoterminowego sukcesu. W miarę jak koszty technologii będą spadać, a ich dostępność będzie rosła, skalowalne systemy BAS znajdą zastosowanie nie tylko w dużych obiektach komercyjnych, ale także w mniejszych budynkach mieszkalnych i obiektach użyteczności publicznej.

### **3.5 System KNX**

System KNX jest otwartym standardem z niezawodną architekturą rozproszoną z magistralą TP (dwuparowa skrętka), LAN (szyna sieci komputerowej), RF (transmisja radiowa bezprzewodowa), PL (transmisja po linii zasilającej) prowadzoną w dowolnej topologii z maksymalną długością magistrali dla jednej linii do 1km (maksymalne odległości pomiędzy elementami w linii nie powinny przekraczać 700m).

System jest skalowalny poprzez linie i obszary (14x15x256 urządzeń).

Dostępnych jest ponad 8000 urządzeń produkowanych przez około 500 producentów.

Standard KNX został zatwierdzony jako:

- Standard Europejski (CENELEC EN 50090 i CEN EN 13321-1),
- Standard Międzynarodowy (ISO/IEC 14543-3),
- Standard Chiński (GB/Z 20965),
- Standard Amerykański (ANSI/ASHRAE 135).

W świetle powyższego, KNX jest jedną ze światowych norm dla instalacji sterowniczych domów i budynków. KNX jest otwartym standardem dla sterowania instalacjami domów i budynków. Standard KONNEX / KNX (dawniej EIB) jest instalacją elektryczną nowej generacji – umożliwia wspólną komunikację pomiędzy wszystkimi odbiornikami energii elektrycznej w budynku. KNX opcjonalnie zapewnia zdalny dostęp do wszystkich instalacji budynkowych i umożliwia dowolne rozwijanie funkcjonalności automatyki

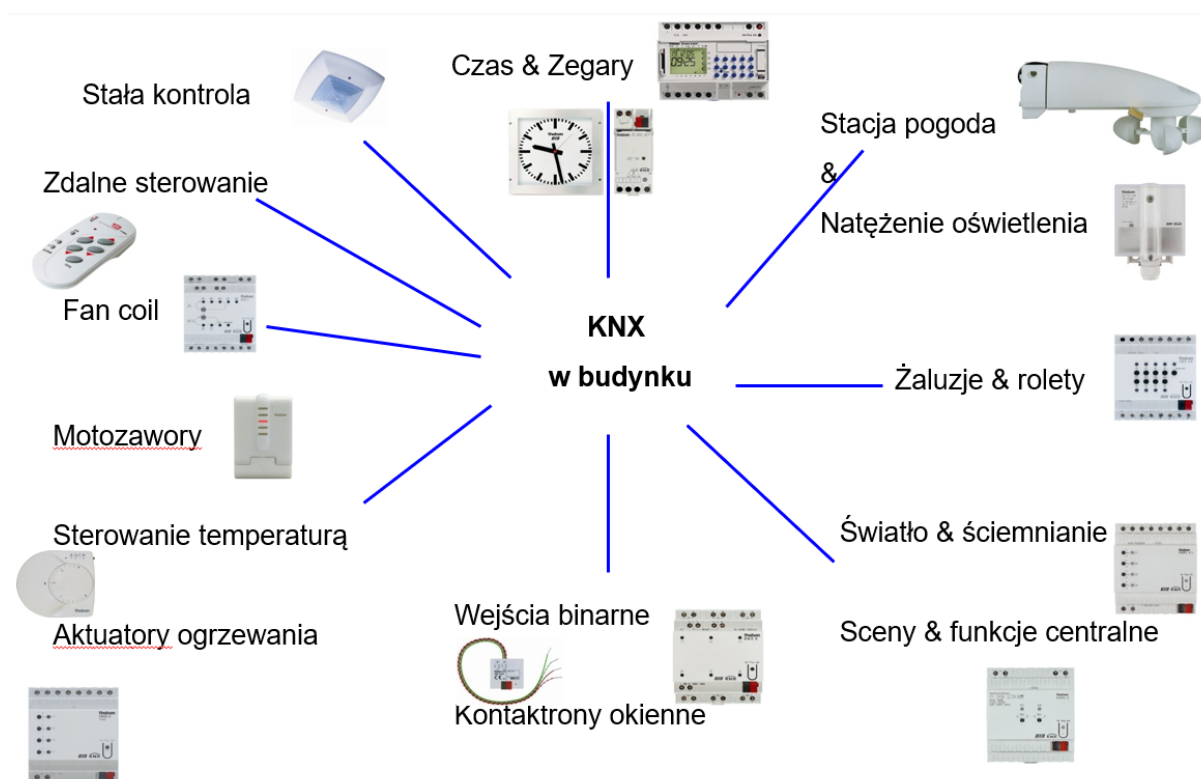
budynkowej przez dowolnych producentów z całego świata. Oczywiście niezbędnymi elementami potrzebnymi do sterowania wyposażeniem budynku są urządzenia magistralne, czujniki (sensory) i elementy wykonawcze (aktuatory - wyrobniki). Sterowanie, monitorowanie i sygnalizowanie odbywa się za pośrednictwem ujednoczonego systemu, bez potrzeby instalowania centrali sterowniczej.

Na rysunku 5 zostały przedstawione logotypy centrów normalizacyjnych.



Rysunek 5. Logotypy centrów normalizacyjnych

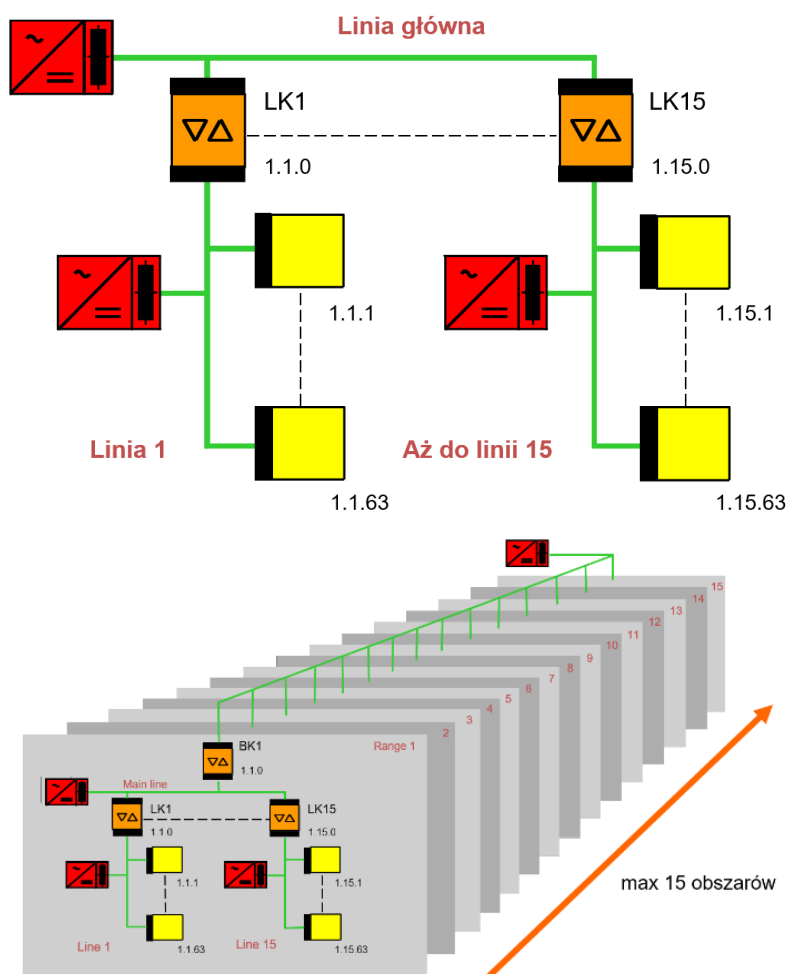
System KNX daje możliwość jego zastosowania w mieszkaniach, apartamentach, budynkach biurowych, hotelach, szkołach, szpitalach i przychodniach, kościołach, salach i centrach konferencyjnych, magazynach czy też portach lotniczych. Na rysunku 6 zostały pokazane możliwości połączeń współpracujących ze sobą urządzeń w systemie KNX.



Rysunek 6. Możliwości połączeń urządzeń w systemie KNX

W systemie KNX możliwe jest tworzenia sieci w postaci linii, gwiazdy lub struktury drzewa. Niedopuszczalne jest tylko struktura połączenia pierścieniowego. Do linii głównej można podłączyć maksymalnie 15 linii, na których może być zainstalowanych do 64 urządzeń. Taki układ stanowi jeden obszar połączeń. Maksymalnie można ze sobą łączyć 15 obszarów. Każda linia musi być wyposażona w zasilacz i

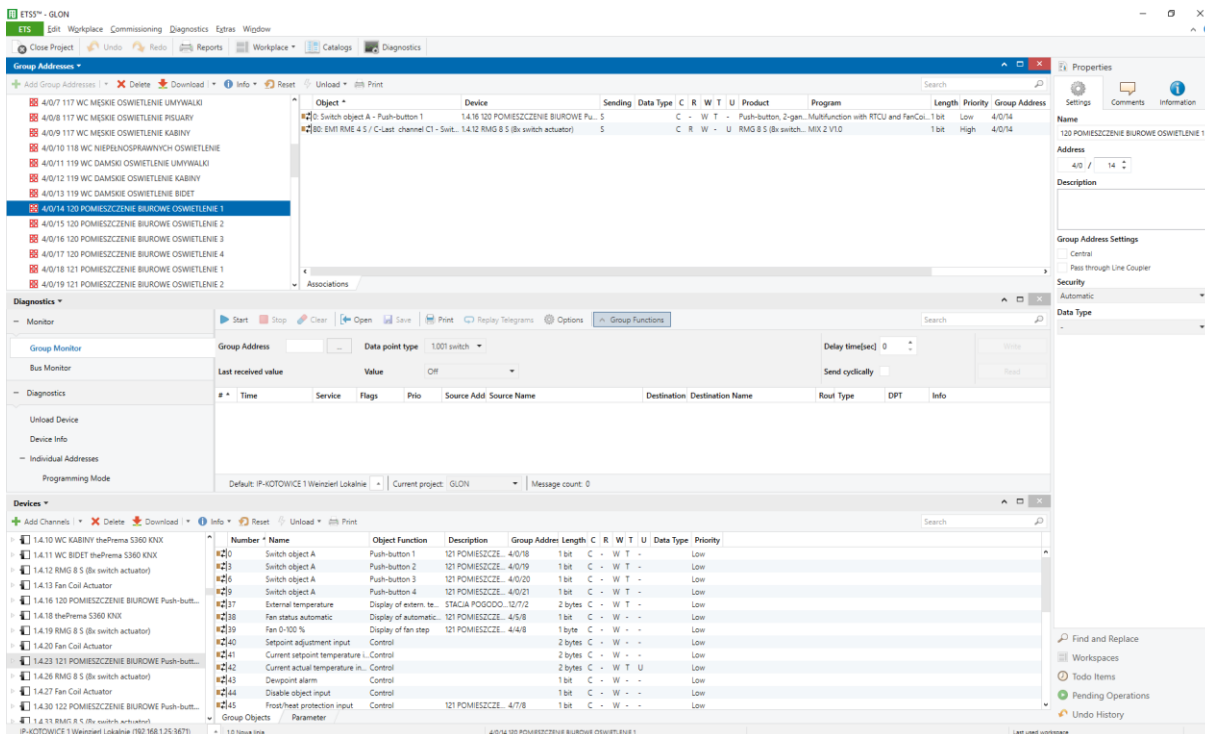
sprzęgło liniowe. Na linii głównej musi być zainstalowany zasilacz i sprzęgło obszarowe. Linia obszarowa musi być również zasilana poprzez zasilacz. Na rysunku 7 został pokazany schemat połączeń urządzeń KNX w liniach i obszarach.



Rysunek 7. Schemat połączeń urządzeń KNX w liniach i obszarach

Dla partnerów KNX dostępne są pełne specyfikacje KNX obejmujące wszystkie tematy techniczne Standardu KNX, od pierwszego kontaktu z technologią KNX, poprzez specyfikację, zasady certyfikacji i badań, aż po opisy zastosowań [97]. Poszczególne tomy i części są wyraźnie oddzielone. Dla profesjonalistów dostępny jest też zestaw narzędzi KNX dostępny na stronie [98].

Programowanie systemu KNX odbywa się za pomocą ETS (Engineering Tool Software), które jest unikalnym narzędziem softwarowym niezależnym od producentów urządzeń KNX służącym do projektowania i konfiguracji instalacji inteligentnych domów i budynków opartych o system KNX. Aktualna wersja to ETS 6.0. Na rysunku 8. przedstawiono zrzut z ekranu działającego programu ETS.



Rysunek 8. Zrzut z ekranu prezentującego działanie programu ETS

ETS6 to profesjonalne narzędzie programistyczne do projektów inteligentnych domów i budynków. Jest narzędziem intuicyjnym dzięki nowoczesnej nawigacji. Kontener „Grupy” znajdujący się na pasku bocznym zapewnia lepszy przegląd i ułatwia zarządzanie złożonymi projektami. Spersonalizowany stół warsztatowy umożliwia zaprojektowanie indywidualnie środowiska pracy za pomocą panelu wyboru. W oprogramowaniu KNX ETS6 zwiększono bezpieczeństwo systemu, obsługuje nowe rozszerzenia systemu, integruje poprzednie wersje i ułatwia dodawanie nowych bezpiecznych urządzeń i RF. Oprogramowanie ETS6 dostępne jest w trzech wersjach (ETS Lite – wersja edukacyjna, ETS Home – wersja dla właścicieli domów, ETS Professional – wersja dla profesjonalistów) dostosowanych do potrzeb użytkownika.

## 4 Hipoteza badawcza, cel i zakres pracy, struktura pracy

Rozwój nowych technologii powoduje nieustanne zwiększanie komfortu życia i pracy ludzi. Dzięki dynamicznemu rozwojowi techniki cyfrowej oraz sztucznej inteligencji, coraz więcej urządzeń jest wyposażonych w zaawansowane układy sterowania, a wiele dziedzin życia korzysta z technologii informatycznych, systemów komunikacji i automatyki [99, 100]. Tak się też dzieje w budynkach. Dzięki możliwościom funkcjonalnym zintegrowanych systemów sterowania i automatyzacji, możliwe jest efektywne zarządzanie energią, a także stworzenie ergonomicznych warunków pracy i życia ludzi. W niniejszej pracy przedstawiłem propozycję działań i zastosowane rozwiązania, które mają na celu, zmniejszenia kosztów utrzymania budynku biurowego wyposażonego w Centrum Przetwarzania Danych (CPD), poprawę funkcjonalności oraz zapewnienie bezpieczeństwa obsługi i ergonomii wyposażenia technicznego.

Dlatego też, sformułowano następującą tezę pracy: ***”Można opracować i wdrożyć system sterowania, który reaguje odpowiednio na potrzeby użytkownika budynku biurowego wyposażonego w Centrum Przetwarzania Danych (Data Center)”***.

W celu zweryfikowania tezy sformułowano główny cel rozprawy, którym jest: **Opracowanie i wdrożenie systemu sterowania w budynku biurowym wyposażonym w Data Center, który umożliwi współdziałanie znajdujących się w nim instalacji. Tak zaprojektowany system pozwoli ograniczyć zużycie energii, poprawić bezpieczeństwo oraz jakość ergonomiczną środowiska pracy.**

Dla zrealizowania postawionego celu pracy, przeprowadzono analizy i badania obejmujące następujący zakres:

- Studium literaturowe i na jego podstawie wskazanie rozwiązań możliwych do zastosowania w opracowywanym systemie,
- Przygotowanie założenia do opracowywanego systemu sterowania i automatyki w nowo budowanym budynku biurowym,
- Analizę możliwych funkcjonalności różnych systemów sterowania inteligentnym budynkiem, z uwzględnieniem podstawowego sterowania obwodami oświetlenia oraz sterowania komfortem środowiska otoczenia użytkownika: KNX, LonWorks, Loxone, Siemens AG, Schneider Electric, Nexwell, Honeywell, Crestron , Koher , ABB, Xcomfort, Dupline, LCN, EnOcean, Snghome, Apagroup, Zamel, F&F, Fibaro, oraz standardowe sterowanie poprzez termostaty,
- Opracowanie systemu do pomiaru i rejestracji danych obejmujących sterowanie i pracę urządzeniami elektrycznymi w istniejącym budynku biurowym KAMSOF S.A. Gliwickie Ogrody Nauki GLON,
- Przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników i przygotowanie wytycznych i optymalnych rozwiązań dla projektu wykonawczego dla nowego budynku biurowego CRON - Centrum Rozwoju Nauki,



- Przygotowanie koncepcji i projektów dla nowo powstałego budynku CRON firmy KAMSOFT S.A – uzyskanie pozwolenia na budowę,
- Przygotowanie koncepcji i wdrożenie systemów w nowo powstałym Centrum Przetwarzania Danych (CPD) firmy KAMSOFT S.A.,
- Przeprowadzenie pomiarów i analizy wpływu warunkami środowiskowymi panujących w Serwerowni (CPD) na zużycie energii elektrycznej oraz jej funkcjonowanie. Wprowadzenie rozwiązań ograniczających zużycie energii i poprawę bezpiecznej pracy urządzeń zainstalowanych w serwerowni,
- Przygotowanie modelu wykorzystującego narzędzia sztucznej inteligencji, pozwalającego na predykcję parametrów pracy urządzeń zapewniających odpowiednie warunki środowiskowe, w zależności od obciążenia serwerów i panujących warunków zewnętrznych. Weryfikacja działania systemu chłodzenia po wprowadzonych zmianach. Analiza zużycia energii przed i po wprowadzonych zmianach w serwerowni,
- Przygotowanie projektu rozbudowy i wdrożenie instalacji fotowoltaicznej dla budynku biurowego firmy KAMSOFT S.A. zlokalizowanego w Katowicach.

#### **4.1 Struktura pracy**

Praca składa się z 7 rozdziałów. W pracy zawarto opisy analiz, badań doświadczalnych prowadzonych dla budynków biurowych firmy KAMSOFT S.A. Badania wstępne przeprowadzono dla budynku biurowego GLON znajdującego się w Gliwicach. Wyniki badań były potrzebne do przygotowania wytycznych i projektu wdrożenia. Podstawowym elementem wdrożenia było przygotowanie projektu inwestycyjnego: Budowa budynku usługowo-biurowego CRON-Centrum Rozwoju Nauki KAMSOFT S.A., wyposażonego w Centrum Przetwarzania Danych. Zaproponowane rozwiązania miały być sprawdzone w zakresie zużycia energii elektrycznej oraz funkcjonalności. Projekt ten został przygotowany i uzyskał pozwolenie na budowę. Z uwagi jednak na sytuację pandemiczną jego realizacja została wstrzymana. Stad podjęta decyzja o przygotowaniu projektu inwestycyjnego i jego wdrożeniu w nowo powstałej serwerowni (Data Center) w istniejącym budynku firmy KAMSOFT S.A. KS-133. Zaprojektowano system do zbierania danych pomiarowych oraz całą infrastrukturę techniczną w zakresie pracy urządzeń IT i systemu chłodzenia pomieszczenia. Po uruchomieniu serwerowni (luty 2022 r.) przeprowadzono testy systemu oraz rejestracje danych pomiarowych. Analiza danych pozwoliła dokonać oceny zaproponowanych rozwiązań i wprowadzenie odpowiednich usprawnień. Zwieńczeniem prac wdrożeniowych było zaprojektowanie i wdrożenie instalacji fotowoltaicznej wraz z magazynem energii. W pracy dokonano ocenę obejmującą zużycie energii wykonanych działań. Szczegółowo poszczególne rozdziały zawierały następujące treści:

W rozdziale 2 przedstawiono zagadnienia teoretyczne związane z automatyką i sterowaniem budynku. W pierwszej części rozdziału pokazano historię automatyki budynku od jej początków, aż po współczesne rozwiązania. Pozwoliło to lepiej zrozumieć jakie zmiany zaszły w kwestii technologii zarządzania budynkami

oraz jakie to daje możliwości. Jednak przede wszystkim skupiono się na nowoczesnych technologiach wykorzystywanych w różnych instalacjach budynków. Zwrócono również uwagę, że nowoczesne instalacje, odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa, komfortu oraz efektywności energetycznej współczesnych budynków. Scharakteryzowano i omówiono pojęcie inteligencji w budynku w kontekście zastosowań nowoczesnych technologii tj. Internetu Rzeczy (IoT), Sztucznej Inteligencji (AI), Big Data, Systemu Automatyki Budynkowej oraz Zarządzania Energią. Określono, że kluczowymi cechami Inteligentnego Budynku są: efektywność energetyczna, komfort i zdrowie użytkowników, bezpieczeństwo, zrównoważony rozwój i integracja Systemów. Wszystkie te pojęcia zostały szerzej opisane w rozdziale 2.

W kolejnym rozdziale pracy doktorskiej, pokazano znaczący udział budynków w światowym zużyciu energii. Przedstawiono wyniki analizy literaturowej obejmującej dostępne technologie i systemy automatyki budynku. Omówiono cechy systemów automatyki budynkowej. Dokonano porównania wybranych systemów automatyki budynkowej wykorzystywanych na całym świecie. Efektem tej analizy literaturowej był wybór jednego systemu KNX, który w rozdziale 3 został szczegółowo opisany.

W dalszej części pracy (rozdział 4) przedstawiono hipotezę badawczą, cel i zakres pracy oraz strukturę pracy. Głównym celem pracy jest *Opracowanie i wdrożenie systemu sterowania w budynku biurowym wyposażonym w Data Center, który umożliwi współdziałanie znajdujących się w nim instalacji. Tak zaprojektowany system pozwoli ograniczyć zużycie energii, poprawić bezpieczeństwo oraz jakość ergonomiczną środowiska pracy.* Ponadto przedstawiono wdrożenia, które w ramach doktoratu wdrożeniowego zostały zrealizowane.

Kolejne dwa rozdziały są poświęcone prezentacji badań i analizie wyników. Podstawowym elementem przedstawionym w rozdziale 5 są założenia i koncepcja projektu budowlanego wraz z projektami wykonawczymi dla nowego budynku biurowego CRON. Wcześniej uzasadniono zaprojektowane rozwiązania. Przedstawiono wyniki wstępnych badań zrealizowanych dla istniejącego budynku biurowego GLON. Autor zaproponował koncepcje systemu pomiarowego umożliwiającego rejestrację danych obejmujących parametry elektryczne systemów grzewczych i chłodzenia dla wybranych pomieszczeń wraz z parametrami środowiskowymi. Pomieszczenia na czas trwania badań zostały wyłączone z użytkowania, ponadto zapewniono możliwość indywidualnego sterowania urządzeniami grzewczymi dla każdego pomieszczenia (regulacji indywidualna). Zwrócono także uwagę na znaczenie panujących warunków zewnętrznych. Stąd też szeroki dobór czasu analizy obejmujący 12 miesięcy, czyli wszystkie pory roku. Na podstawie przeprowadzonych badań autor zaproponował koncepcję i projekt instalacji dla nowego budynku wyposażonego w Centrum Przetwarzania Danych (Data Center).

W kolejnej części pracy – rozdział 6, zawarto najważniejsze wyniki badań. W pierwszej części rozdziału przedstawiono szczegółową koncepcję i wdrożenie projektu serwerowni dla istniejącego budynku KS-133. Szczegółowo opisano wdrożone rozwiązania obejmujące zaprojektowane instalacje oraz infrastrukturę techniczną serwerowni. Przede wszystkim opisano lokalizację wykorzystywanych urządzeń IT oraz system sterowania i pomiaru parametrów chłodzenia. W rozdziale 6.2.2 przedstawiono charakterystykę

energetyczną pracy serwerowni oraz zaproponowaną metodykę badań. Następnie szczegółowo opisano system zbierania danych pomiarowych. Kolejny rozdział 6.3 poświęcono opisowi modeli wykorzystujących narzędzia informatyczne. Na potrzeby określania istotności zmiennych pomiarowych przygotowano modele predykcyjne. Przedstawiono założenia procesu modelowania, obejmujące opis istotnych parametrów decydujących o zachowaniu instalacji chłodzenia. W rozdziale 6.3.3 przedstawiono charakterystykę czterech wybranych modeli predykcyjnych: metody minimalno-odległościowe (k-Nearest Neighbors - kNN), algorytmy bazujące na drzewach (RF (Random Forests) czy GBT (Gradient Boosting) oraz sieci neuronowe. W rozdziale 6.3.4 przedstawiono wyniki analizy i wybrano model, który wykorzystano w dalszych badaniach. Następnie zaproponowano drugą metodę oceny układu sterowania – model oparty o klasyczną analizę automatyki. Przedstawiono projekt, a następnie zbudowano model automatyki sterowania procesem chłodzenia jednostek serwerowych. Scharakteryzowano strukturę układu sterowania oraz opisano metody regulacji temperatury. W rozdziale 6.4.4 przedstawiono wyniki optymalizacji sterowania w oparciu o dostępne pomiary temperatury w serwerowni. Badania przeprowadzono o dane pomiarowe zbierane w okresie od 13 września 2022 r do 31 maja 2023 roku. Czas rejestracji danych podzielono na 4 okresy:

- O1 – uruchomienie serwerowni, praca niestabilna,
- O2 – praca właściwa – analiza wyników,
- O3 – wprowadzenie usprawnień, zmiana obciążenia serwerów,
- O4 – praca stabilna serwerowni.

Rezultatem tych badań było zaproponowanie i wprowadzenie usprawnień w systemie, tak aby uzyskać dodatkowe oszczędności energii. Ostatnim elementem zaprezentowanym w rozdziale 6 był projekt i wdrożenie rozwiązania instalacji PV i magazynu energii. Scharakteryzowano zużycie energii w budynku i na tej podstawie zaproponowano dwa rozwiązania instalacji PV z trzema wariantami magazynów energii. Przedstawiono wyniki analizy poszczególnych wariantów pod kątem wykorzystania energii elektrycznej ze słońca oraz opłacalności inwestycji.

W rozdziale 6 podsumowano rozważania przeprowadzone w rozprawie, uzasadniono znacznie przeprowadzonych badań oraz osiągnięcie założonych celów, a także wskazano kierunki dalszych badań.

## **4.2 Wdrożenia**

Celem praktycznym tego doktoratu było opracowanie projektu wykonawczego i jego wdrożenie w nowo powstałym budynku biurowym Centrum Rozwoju Nauki CRON w Katowicach. Realne problemy związane z oszczędnościami zużycia energii elektrycznej dla tego typu budynków dodatkowo wyposażonych w serwerownię (Data Center) znalazły swoje rozwiązania w niniejszym opracowaniu.

Wpływ funkcjonalności związanych z pracą tak wielu urządzeń IT na zużycie energii, przy zachowaniu niezawodności ich pracy, nie był dotychczas znany oraz rzucił nowe światło na możliwość wykorzystania systemu sterowania i automatyki różnych instalacji pracujących w obiekcie. Weryfikacja i analiza wyników

zużycia energii dla istniejącego budynku uwzględniająca różne czynniki została przedstawiona właścicielom firmy. A efekty tej analizy zostały uwzględnione w przygotowaniu projektów w nowo powstałym budynku.

Wszystkie prace projektowe zostały przeprowadzone. Efektem tego było uzyskanie pozwolenia na budowę w 2021 roku. Jednak ze względu na zmianę stanowiska właściciela firmy zawieszono budowę nowego budynku i nie zweryfikowano w praktyce zastosowanych rozwiązań. Stąd podjęto decyzję o przygotowaniu kolejnego projektu i wdrożeniu go. Jest to projekt nowo powstałej serwerowni (Data Center). Serwerownia została zbudowana w istniejącym budynku firmy KAMSOFT S.A. (KS-133). Dodatkowo przygotowane w pracy modele pozwoliły na dokonanie oceny zaproponowanych rozwiązań i wprowadzenie stosownych usprawnień. Analizy wyników pomiarowych umożliwiły weryfikację wdrożenia pod kątem uzyskanych oszczędności na zużyciu energii elektrycznej. Ostatni element wdrożenia było przygotowanie projektu i wykonanie instalacji fotowoltaicznej wraz z magazynem energii dla budynku KS-133 wyposażonym w nową serwerownię (CPD).

Ponadto w trakcie realizacji doktoratu wdrożeniowego zaprojektowałem i wdrożyłem (uruchomiłem) do realizacji następujące instalacje fotowoltaiczne:

- a. Gliwice\_KS\_GLON o mocy 49,8kWp.,
- b. Katowice\_KS\_łączna o mocy 34,88kWp.,
- c. Leszno\_KS o mocy 39,24kWp.,
- d. Jaworzno\_LP o mocy 4,98 kWp.,
- e. Gliwice\_KS\_GLON o mocy 249,27 kWp.

## 5 Projekt budowlany i projekty wykonawcze budynku biurowego Centrum Rozwoju Nauki

### 5.1 Badania wstępne

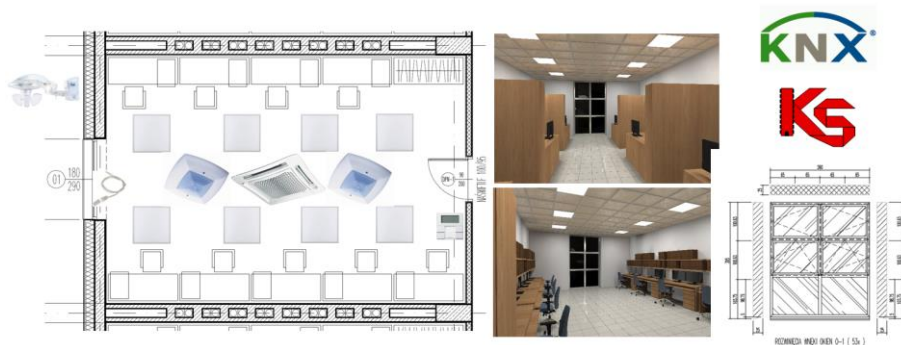
W celu przygotowania projektu wykonawczego dla nowo powstałego budynku biurowego Centrum Rozwoju Nauki (CRON) przeprowadzono wcześniej badania wstępne. Obejmowały one pomiary dla instalacji ogrzewania i chłodzenia w istniejący budynku firmy KAMSOFT S.A.– GLON oraz pomiary parametrów zewnętrznych. W ramach badań przeprowadzono analizę danych pomiarowych dotyczących zużycia energii w wybranych pomieszczeniach biurowych w odniesieniu do warunków meteorologicznych.

Analiza obejmowała proces sterowania temperaturą dla charakterystycznych pomieszczeń biurowych znajdujących się w budynku. Celem badań było określenie wpływu:

- parametrów zewnętrznych (temperatura, wilgotność, nasłonecznienie i in.),
  - usytuowania pomieszczeń w odniesieniu do stron świata,
  - parametrów sterowania instalacją ogrzewania / chłodzenia (czas pracy, temperatura regulacji),
- na zużycie energii elektrycznej.

Do badań wybrano 4 pomieszczenia. Wielkości pomieszczeń oraz ich funkcjonalności były takie same. Jedyne różnice wynikały z ich usytuowania. Na rysunku 9 przedstawiono wybrane pomieszczenie biurowe wyposażone w następujące systemy automatyki i czujniki:

- sterowanie oświetleniem,
- sterowanie zasilaniem elektrycznym dla 9 stanowisk pracy,
- sterowanie klimatyzacją - klimakonwektor,
- sterowanie ogrzewaniem - klimakonwektor,
- kontaktron okienny wyłączający klimatyzację lub ogrzewanie,
- czujnik ruchu (1 lub 2) z pomiarem natężenia oświetlenia sterujący kanałami oświetlenia (zgodne z normą [101] oraz klimatyzacją i ogrzewaniem,
- system współpracujący z zewnętrzną stacją pogodową.



Rysunek 9. Przykładowe pomieszczenie biurowe [opracowanie własne]

Badania przeprowadzono w okresie 1 roku między 15.08.2020 a 20.08.2021 r. W czasie prowadzenia badań pomieszczenia wyłączono z użytkowania. Miało to na celu ograniczenie wpływu innych czynników na wyniki pomiarowe. Badania prowadzono w budynku biurowym firmy KAMSOFT S.A. Gliwickie Ogrody Nauki (GLON). W wybranym do badań budynku znajdują się pomieszczenia o powierzchni (42,6m<sup>2</sup>), co jest wielkością zbliżoną do powierzchni pomieszczeń w nowym budynku CRON w Katowicach, dla którego przewidziano przygotowanie i wdrożenie jego projektu. W nowym budynku zaplanowano pomieszczenia biurowe o powierzchni 45,36m<sup>2</sup>. Różnica w powierzchniach pomiarowym i projektowanym wynosiła jedynie 6,5%. Budynek, dla którego wykonano pomiary był wyposażony w instalację KNX oraz stację pogody. Przygotowano stanowisko pomiarowe, w którym zintegrowano pomiary parametrów elektrycznych i cieplnych dla wybranych pomieszczeń oraz parametry środowiskowe panujące na zewnątrz budynku. W celu uzyskania wszystkich niezbędnych danych pomiarowych, wyodrębniono po jednym pomieszczeniu z oknami skierowanymi na wschód, zachód, północ i południe.

W pierwszym etapie badań przeprowadzono pomiary temperatury w wybranych pomieszczeniach oraz dokonano oceny szybkości reakcji układów chłodzenia i grzania w pomieszczeniach w zależności od zadanej temperatury. W wyniku czego określono maksymalny zakres regulacji temperatury oraz określono czas potrzebny na osiągnięcie warunków zadanych w pomieszczeniu. W ten sposób dokonano oceny inercji związanej z pojemnością cieplną pomieszczenia.

W drugim etapie badań przeprowadzono analizę wyników w zależności od panujących warunków zewnętrznych. Pomiary wykonano zarówno w porach nocnych jak i dziennych oraz w różnych porach roku. Warunkiem koniecznym było zapewnienie w pomieszczeniach minimalny komfort temperaturowy dla pracownika pojawiającego się rano na swoim stanowisku pracy, zgodny z minimalnymi wymogami BHP.

Szczegółowo w badaniach analizowano wpływ:

- a) Różnych nastaw wartości oczekiwanej temperatury w pomieszczeniach. Uzyskane wyniki pozwoliły ocenić jak usytuowanie pomieszczeń w odniesieniu do różnych stron świata wpływa na czas pracy instalacji chłodzenia w okresach ciepłych i ogrzewania w okresie zimnych,
- b) Różnych czasów wyłączania instalacji w porze nocnej oraz weekendowej. Analizowana była ocena bezwładności instalacji ogrzewania / chłodzenia tak aby zapewnić minimalny komfort pracy dla pracowników pojawiających się rano na swoim stanowisku.

Analiza uzyskanych wyników pozwoliła wybrać najbardziej optymalne rozwiązania, które zostały wykorzystane w przygotowywanym projekcie nowego budynku.

## **5.2 Opis i parametry budynku biurowego GLON**

Budynek biurowy Gliwickie Ogrody Nauki został wybudowany dla oddziału terenowego firmy KAMSOFT S.A. w Gliwicach, widok budynku przedstawiono na rysunku 10.



Rysunek 10. Widok budynku GLON

Budynek został zaprojektowany i wykonany zgodnie z [102, 103]. Jest to budynek dwukondygnacyjny podpiwniczony o całkowitej wysokości 12m i całkowitej powierzchni ok. 9500m<sup>2</sup>. Główne funkcje budynku to:

- budynek biurowy dla 328 pracowników biurowych (41 pomieszczeń),
- sala szkoleniowo-wykładowa dla 250 osób,
- serwerownia,
- pomieszczenia techniczne niezbędne dla funkcjonowania budynku,
- parking dla pracowników i innych użytkowników obiektu na 166 miejsc.

Wymiary zewnętrzne głównego budynku przedstawiają się następująco:

- |                                      |                  |
|--------------------------------------|------------------|
| • wymiary zewnętrzne budynku         | 58,32m x 58,32m, |
| • wymiary zewnętrzna dachu z okapem  | 61,20m x 61,20m, |
| • wysokość budynku z okapem          | 9,00m,           |
| • wysokość maksymalna ze świetlikami | 10,70m.          |

Budynek wyposażony jest w następujące instalacje elektryczne i niskoprądowe:

- SS6 Sieci strukturalnej kategorii 6,
- KD Kontroli dostępu,
- SAP Sygnalizacji pożaru,
- CCTV Telewizji dozorowej,
- ODM Oddymiania,
- IEL Elektrycznej,
- KNX Automatyki Inteligentnego Budynku,
- SUGG Stałe Urządzenie Gaśnicze System gaszenia gazem,
- DCR Data Center Centrum Przetwarzania Danych o mocy zasilania 500kW.

Budynek ma cechy proekologiczne tzn. dobre ocieplenie (EPS 70-040 o grubości od 14 do 16 cm) obejmujące wszystkie przegrody zewnętrzne, izolacje dźwiękochłonne oraz budynek jest wyposażony w układy odzysku ciepła w układach wentylacji mechanicznej. Wszystkie pomieszczenia biurowe są doświetlone równomiernie rozmieszczonymi oknami, każde o wymiarach 150x225cm, czyli o powierzchni

przeszklenia ok. 2,70m<sup>2</sup>. Okna wykonano z profili aluminiowych wypełnione płaskim szkłem zespolonym, przejrzystym, o współczynniku  $U=1,1\text{W/m}^2\text{K}$ . Instalację c.o. stanowi ogrzewanie wodne pompowe w systemie dwururowym trójnikowym o parametrach pracy 70/50°C. W pomieszczenia biurowych zastosowano ogrzewanie podłogowe (5 obiegów o parametry temperatury czynnika grzewczego  $t_z/t_p = 50/40^\circ\text{C}$ ). Całkowite zapotrzebowanie ciepła budynku wynosi  $Q = 410 \text{ kW}$ . Dla ogrzewania podłogowego przewidziano rozdzielacze z głowicami elektrotermicznymi (połączonymi z automatyką KNX) oraz przepływomierzami. Regulacja temperatury czynnika grzewczego w przewodach utrzymywana jest przez układ mieszający sterowany układem automatyki węzła cieplnego. Pomieszczenia biurowe wyposażone są w klimakonwektory wentylatorowe, które służą do chłodzenia powietrza w okresie letnim. Klimakonwektory mają za zadanie utrzymać parametry temperatury pomieszczeń na poziomie 23°C. Każdy klimakonwektor wyposażony jest w trójdrogowe zawory mieszające z siłownikami, równoważące zawory regulacyjne oraz zawory odcinające na zasilaniu i powrocie. Zasilanie w okresie letnim stanowi woda lodowa o parametrach 8/14°C. Źródłem chłodu instalacji klimakonwektorów jest agregat chłodniczy, o mocy chłodniczej  $Q_{\text{col}} = 172 \text{ kW}$ , usytuowany w pomieszczeniu podziemnym poza budynkiem. W tabeli 2 zestawiono najważniejsze parametry budynku biurowego.

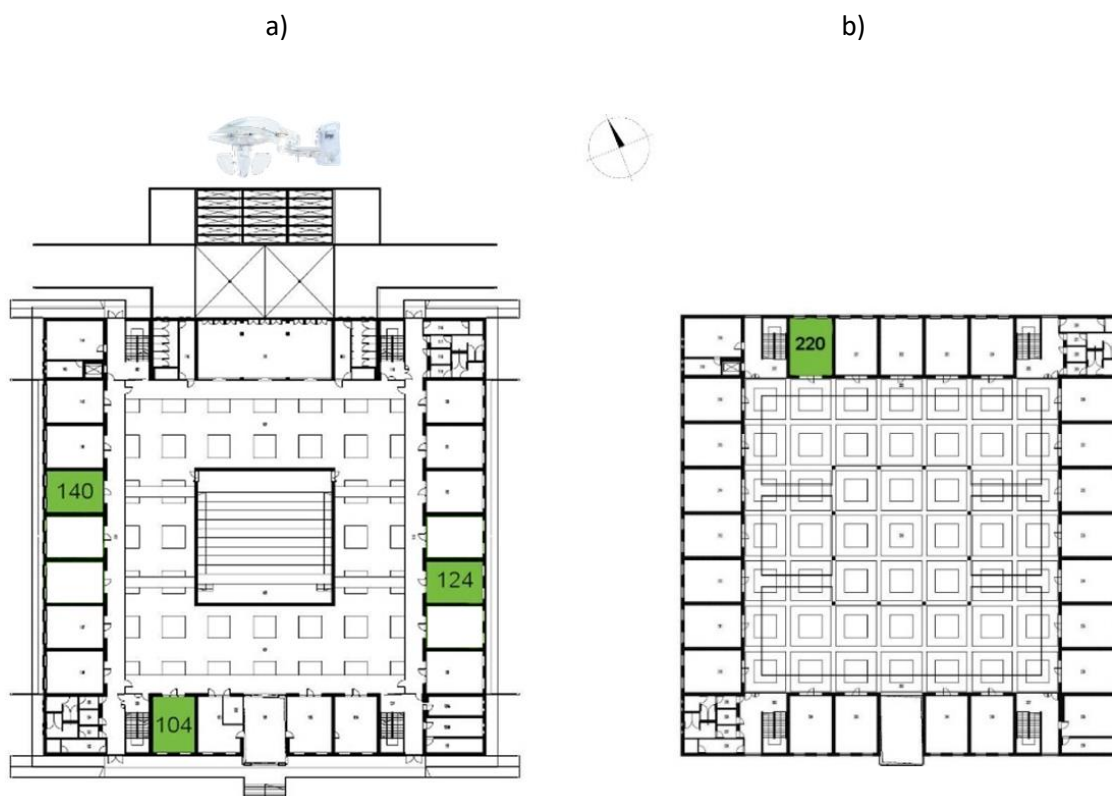
Tabela 2. Bilans cieplny budynku

Powierzchnia ogrzewana	$A_f$	8380,6	m <sup>2</sup>
Kubatura ogrzewana	$V_e$	29965,4	m <sup>3</sup>
Współczynnik kształtu	$A_f / V_e$	0,303	m <sup>-1</sup>
Pojemność cieplna	$C_m$	1996718	kJ/K
Współczynnik przenoszenia ciepła przez wentylację	$H_{ve}$	1511,84	W/K
Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię dla ogrzewania i wentylacji	$Q_H / A_f$	39,4	MJ/m <sup>2</sup>

W budynku wszystkie pomieszczenia biurowe zajmują zewnętrzną obwodową część 1 piętra i parteru. Wszystkie pomieszczenia biurowe zlokalizowane są w module konstrukcyjnym 6 x 6+2m. Typowy moduł biurowy to pomieszczenie o powierzchni 42,06m<sup>2</sup> i kubaturze 126,18m<sup>3</sup>.

Temperatury wewnętrzne pomieszczeń ogrzewanych przyjęto zgodnie z [102, 104]. Dla pomieszczeń biurowych wynosi +20°C. Na rysunku 11 przedstawiono przekrój budynku z zaznaczonymi pomieszczeniami.





Rysunek 11. Rozmieszczenie analizowanych pomieszczeń w budynku, a) parter, b) 1 piętro

W tabeli 3 zestawiono parametry wszystkich analizowanych pomieszczeń oraz ich usytuowanie w odniesieniu do kierunków świata.

Tabela 3. Oznaczenie i charakterystyka wybranych pomieszczeń

Nr pomieszczenia	Powierzchnia, m <sup>2</sup>	Kubatura, m <sup>3</sup>	Strona świata
<b>104</b>	42,06	126,8	Południe
<b>124</b>	42,06	126,8	Wschód
<b>140</b>	42,06	126,8	Zachód
<b>220</b>	42,06	126,8	Północ

Na podstawie informacji przedstawionych między innymi w literaturze [105-108], na zużycie energii w budynku największy wpływ ma: parametry konstrukcyjne przegród zewnętrznych budynku, ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja, liczba i zachowanie użytkowników oraz warunki zewnętrzne. Trudno jednak w literaturze znaleźć dane, na podstawie których można określić udział poszczególnych składników w zużyciu energii. Tym bardziej dla specyficznego budynku, w którym znajduje się duża serwerownia. Oczywiście w przepisach [109] znajdziemy metodykę postępowania i zależności dzięki którym jesteśmy w stanie

oszacować zużycie energii dla określonego budynku. Co więcej istnieją programy [110], dzięki którym w dość łatwy sposób możemy wyznaczyć zapotrzebowanie na moc dla poszczególnych składowych. Jednakże utrudnione jest uwzględnienie specyficznych rozwiązań tj. serwerownia (Data Center). W tabeli 4 zestawiono obliczeniowe zapotrzebowanie i straty ciepła dla analizowanych pomieszczeń biurowych.

Tabela 4. Zestawienie strat ciepła dla pomieszczeń badanych

Numer pomieszczenia	$\Phi_T$ [W]	$\Phi_{V,min}$ [W]	$\Phi_{V,inf}$ [W]	$\Phi$ [W]	$\Phi_{HL}$ [W]	$\Phi_{HLmax}$ [W]
Pomieszczenie biurowe 104	1077	2385	341	3462	3462	4154
Pomieszczenie biurowe 124	1213	2415	345	3628	3628	4354
Pomieszczenie biurowe 140	1213	2415	345	3628	3628	4354
Pomieszczenie biurowe 220	1303	2385	341	3689	3689	4427

Gdzie:

$\Phi_{V,min}$  - strata ciepła na wentylację minimalną,

$\Phi_{V,inf}$  - strata ciepła przez infiltracje,

$\Phi$  - całkowita projektowa strata ciepła,

$\Phi_{HL}$  - projektowe obciążenie cieplne,

$\Phi_{HLmax}$  - Maksymalna moc grzewcza.

Do pomiaru zewnętrznych parametrów środowiskowych wykorzystano stację pogody Meteodata 140 S KNX (rys. 12). Pozwala ona między innymi dokonać pomiaru prędkości wiatru, nasłonecznienia, temperatury oraz posiada możliwość wykrywania opadów deszczu. Stacja jest wyposażona w 4 dodatkowe kanały progowe dla podłączenia czujników zewnętrznych KNX oraz 6 kanałów logicznych.

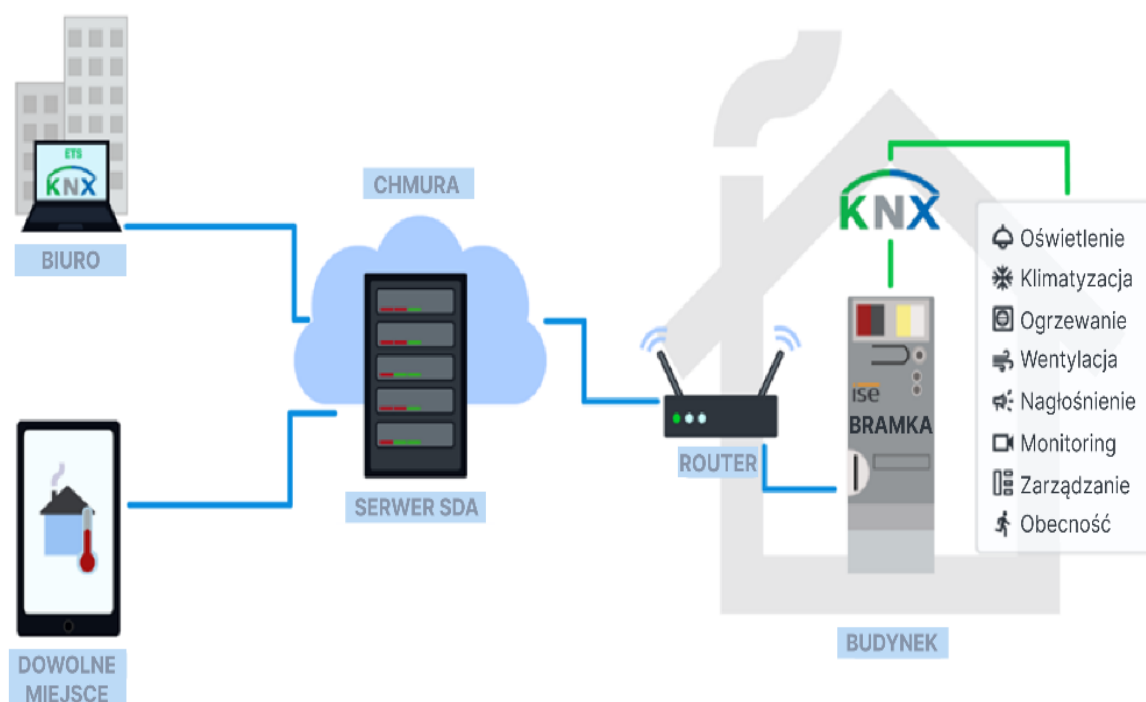


Rysunek 12. Usytuowanie stacji pogody

### 5.3 System pomiarowy

W celu przeprowadzenia szczegółowych analiz porównawczych parametrów opisanych powyżej, zaprojektowano i przygotowano stanowisko pomiarowe. Ideą przewodnią w trakcie projektowania stanowiska było stworzenie środowiska zapewniającego niezawodną komunikację pomiędzy elementami

magistralnymi, a monitoringiem stanu: energii i mocy w pomieszczeniach, temperatury w pomieszczeniach zadanej i uzyskanej oraz parametrów środowiskowych panujących na zewnątrz budynku. Wszystkie dane były zapisywane ze znacznikiem czasu. Sposób realizacji tego zadania przedstawiono na schemacie (rys. 13). Dane z instalacji automatyki budynku KNX zbierane były poprzez bramkę KNX ISE podłączoną do magistrali budynku i zapisywane w plikach dziennych na karcie pamięci SD w postaci plików YYYY\_MM\_DD\_TP1.xml. Bramkę podłączono do lokalnej sieci strukturalnej budynku. Dostęp do danych gromadzonych w pamięci SD odbywa się poprzez wewnętrzną sieć firmową albo poprzez zewnętrzne połączenie VPN z sieci publicznej. Wszystkie połączenia były szyfrowane. Dodatkową funkcjonalnością bramki jest zdalny serwis, diagnostyka i konfiguracja urządzeń KNX zainstalowanych w budynku. W tym celu wykorzystano oprogramowanie ETS [111]. Dzięki czemu jest możliwa zdalna konfiguracja stanów pracy obiektu i ustawień punktów pracy.



Rysunek 13. Procedura zbierania danych pomiarowych z budynku biurowego [opracowanie własne]

Na rysunku 14 przedstawiono przykładową strukturę (Data logger) pobranych w okresie jednego dnia plików danych.

## ise KNX Remote Access

Device status   Data logger   System   User

### Data logger

Note: You can configure the data logger with the ETS. Further information can be found in the manual.

SD card status: (using 927 of 29652 MB)

### Content

#### – 2021

– 2021-07	926.5 MB
2021_07_19_TP1.xml	18.5 MB
2021_07_18_TP1.xml	52.8 MB
2021_07_17_TP1.xml	51.8 MB
2021_07_16_TP1.xml	53.0 MB
2021_07_15_TP1.xml	53.2 MB
2021_07_14_TP1.xml	53.6 MB
2021_07_13_TP1.xml	53.3 MB
2021_07_12_TP1.xml	52.9 MB
2021_07_11_TP1.xml	51.9 MB
2021_07_10_TP1.xml	54.2 MB
2021_07_09_TP1.xml	53.0 MB
2021_07_08_TP1.xml	53.4 MB
2021_07_07_TP1.xml	53.2 MB
2021_07_06_TP1.xml	53.2 MB
2021_07_05_TP1.xml	53.5 MB
2021_07_04_TP1.xml	53.9 MB
2021_07_03_TP1.xml	55.4 MB
2021_07_02_TP1.xml	55.6 MB

© Copyright 2011-2019 ise Individuelle Software und Elektronik GmbH V5.0.2788.0

Rysunek 14. Widok ekranu do zarządzania danymi (Data logger) dla bramki ISE

Wszystkie dane są rejestrowane na komputerze o parametrach Intel i5-760CK CPU 3,9GHz 16 GB RAM z systemem Windows Serwer 2019 Standard wyposażonym w: dwa dyski SSD NVMe 250GB, dwa dyski SSD 120GB i 250GB oraz dysk Magnetyczny 1TB. Do importu danych do bazy MS SQL Server napisałem program w języku C# o nazwie Knx Data Extractor. Dzięki niemu następuje import, dekodowanie i zapis danych do bazy MS SQL Server. Na rysunku 15 został pokazany zrzut ekranu przedstawiający proces importu danych z zarejestrowanych plików dziennych do stworzonej bazy MS SQL Server.

File Name	Extension	File Path	Send	DataBase state	Percentage
2021_06_04_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_06_04_TP1.xml	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0%
2021_06_03_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_06_03_TP1.xml	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0%
2021_06_02_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_06_02_TP1.xml	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0%
2021_06_01_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_06_01_TP1.xml	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0%
2021_05_31_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_31_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_30_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_30_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_29_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_29_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_28_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_28_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_27_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_27_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_26_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_26_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_25_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_25_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_24_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_24_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_23_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_23_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_22_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_22_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%
2021_05_21_TP1.xml	.xml	C:\GLON\2021_05_21_TP1.xml	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	100%

Time	Log:	Leve	Message	Exceptic
06/05/2021 23:03	KnxDa	Info	Dir C:\GLON opened	
06/05/2021 23:03	KnxDa	Info	Directory, found 289 files	
06/05/2021 23:03	KnxDa	Info	List filtered with .xml extension	
06/05/2021 23:04	KnxDa	Info	Selected 4 files	

Rysunek 15. Zrzut ekranu prezentujący proces importu, dekodowania i zapisu danych w stworzonym programie Knx Data Extractor

Bazę umieszczono się na serwerze NAS QNAP TS-451+ wyposażonym w czterordzeniowy 64-bitowy procesor Intel z Systemem QTS 4.2, w dwa zestawy dysków po dwa:

- WD Red 3,5" 4TB SATA 600MB/s 64MB cache,
- WD Red 3,5" 2TB SATA 600MB/s 64MB cache

Wszystkie dyski pracują w RAID 1. Wolumeny w dyskach są szyfrowane i dodatkowo zapisywane są kopie migawkowe.

## 5.4 Wyniki badań

Pomiary były rejestrowane w okresie od 15.08.2020 do 20.08.2021 roku. Baza zebranych danych dla całego budynku obejmuje 72 863 330 (liczba wszystkich zdekodowanych telegramów linii - wierszy). Dzienna liczba zapisanych w bazie wierszy to ok. 190 000.

Wymogiem niezbędnym do przeprowadzenia analizy danych systemu KNX było odczytanie przesyłanych w nim informacji pod postacią telegramów. Bramka zbierająca dane w formacie heksadecymalnym zapisuje je w plikach XML. Dlatego dane te muszą być w odpowiedni sposób

przetworzone. W tym celu napisałem odpowiedni program. Aplikacja odczytuje pliki mapując ich strukturę z wykorzystaniem tagów XML. W celu przyspieszenia tego procesu jest on wykonywany wielowątkowo. Następnie z wybranych tagów odczytywane są wartości Daty i Czasu (Timestamp), Serwisu (Service), Typu Ramki Telegramu (FrameFormat) i Danych (RawData). Na podstawie długości danych heksadecymalnych dobierany jest sposób dekodowania ich, brane są pod uwagę tylko telegramy o ilości pól 24, 22 i 20 czyli odpowiednio 48, 44, 40 bajtów. Z odpowiednich pól zostają odczytane odpowiednie właściwości. W tabeli 5 przedstawiono przykładową strukturę danych.

Tabela 5. Przykładowa struktura danych

TID	Expr1	Group Address	DeviceName	Source Address	Length	Dzień
28075563	28075563	12/5/16	124 POMIESZCZENIE BIUROWE ODCZYT TEMPERATURY	1.4.44	2 bytes	18.02.2021
28074624	28074624	4/3/12	125 POMIESZCZENIE BIUROWE OGRZEWANIE	1.4.51	1 byte	18.02.2021

FileName	RawData	Raw Data Length	Expr2	TimestampS
2021_02_18_TP1.xml	2B090301070604B1DEFC21B C142C6510D300800C4716	44	12/5/16	2021-02-18 T00:09:09.108Z
2021_02_18_TP1.xml	2B090301030604AC69A620B C1433230CD20080041D	42	4/3/12	2021-02-18 T00:08:08.059Z

gdzie :

TID - Identyfikator zdekodowanego telegramu,

Expr1 – weryfikacja numeru TID i jego poprawności zapisu,

GroupAddress - Adres Grupowy,

DeviceName - Nazwa Urządzenia (źródła) - uzupełniana przy użyciu tabeli słownik z adresami i nazwami,

SourceAddress - Adres Źródłowy,

Length - Typ pola danych ramki telegramu,

Dzień - Data utworzenia telegramu,

FileName - Dzienny plik danych xml,

RawData - Telegram zapisany w formie szesnastkowej,

RawDataLength - Długość telegramu,

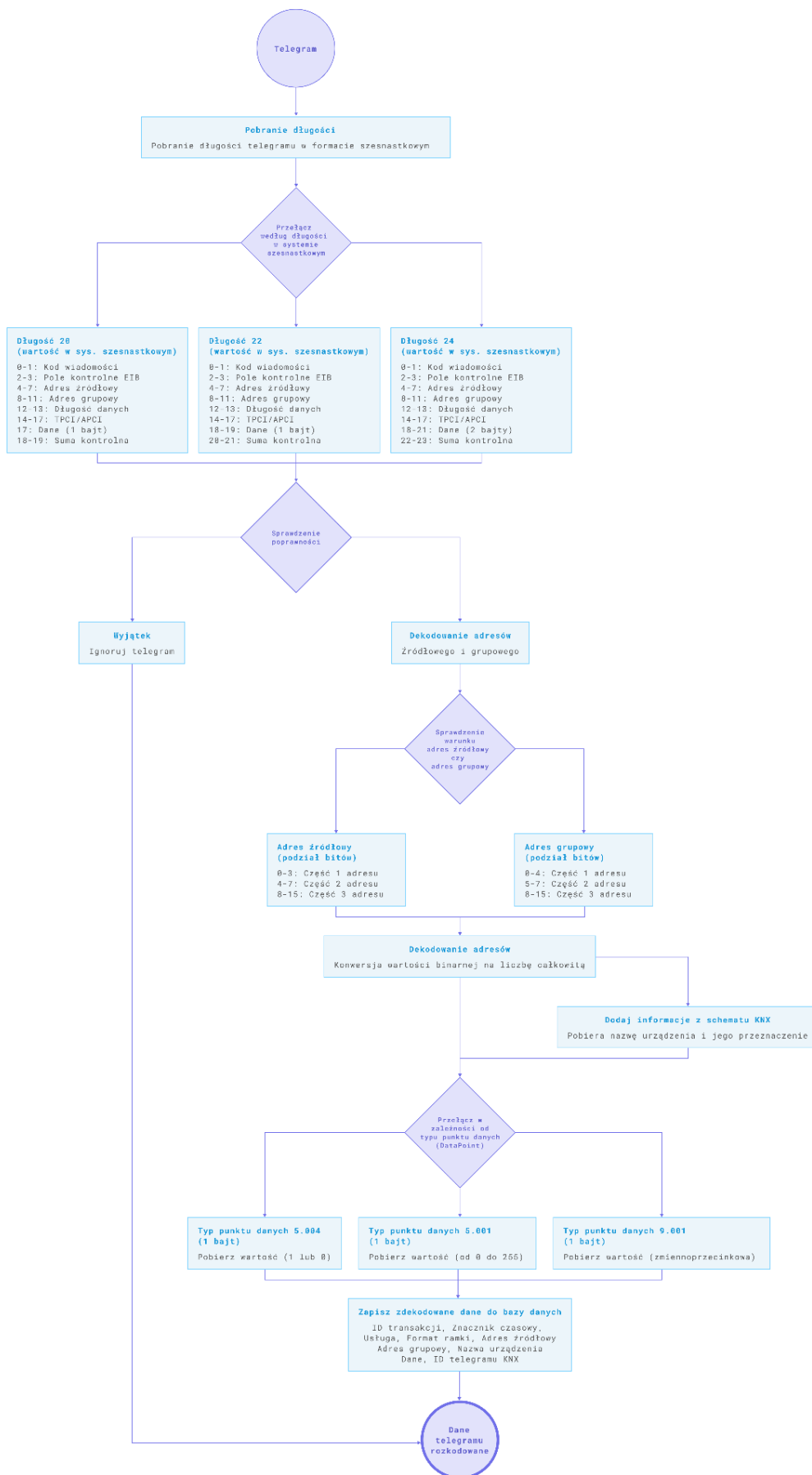
Expr2 - Zdublowane adres grupowy używany do rozpoznania typu danych wysyłanych przez sensor,

TimestampS - czas w formacie Rok-Miesiąc-DzieńTGodzina:Minuta:Sekunda.Tys.SekundyZ w formie tekstowej.

Trudnością w przygotowanej aplikacji było to, że poszczególne pola cechują się zmienną liczbą bitów, np.: adres grupowy o długości 2 bajtów dzieli się na 5 bitów dla pierwszej części adresu, 3 bity dla następnej oraz pozostałe 8 dla części najmniej znaczącej. Również pole danych cechuje się zmienną długością, która oznaczana jest w ostatnich bitach pola `DataLength` i ma długość od 1 bitu do 2 bajtów. Odczytane adresy służą do rozpoznania typu urządzenia w celu poprawnego odczytania wartości danych, przypisania jednostki oraz określenia typu/nazwy urządzenia. Dane są dekodowane względem charakterystyki danych (`DataPoint`), do wartości typu binarnego (`Boolean`), całkowitego (`Integer`) lub zmiennoprzecinkowego (`Float`).

Kończącym etapem jest zapis rekordów w bazie danych oraz oznaczenie pliku jako wczytany i zdekodowany. Na rysunku 16 przedstawiono schemat blokowy przedstawiający całą procedurę odczytu przetwarzania i zapisu danych.

Natomiast na rysunku 17 przedstawiono fragment kodu napisanego w programie `Knx Data Extractor`, realizujący dekodowanie danych. Kod został napisany w języku `C#` przedstawia klasę `AddressDecoder`, która jest częścią przestrzeni nazw `KnxDataExtractor.Services`. Klasa ta odpowiada za dekodowanie adresów z danych protokołu `KNX`.



Rysunek 16. Schemat blokowy przedstawiający sposób działania stworzonego programu Knx Data Extractor [opracowanie własne]



```

1 public static EmiFields ExtractImportantFields(string rawData)
2 {
3     if (!string.IsNullOrEmpty(rawData)) //Sprawdzenie czy pole danych ma
        wartość
4     {
5         var emi = new EmiFields(); //nowy
6         emi.importantData = rawData.Substring(0, 2) + rawData.Substring(22,
            (rawData.Length - 22));
7         emi.MessageCode = emi.importantData.Substring(0, 2);
8         if (rawData.Length == (int)EmiLen.Emi24Len) //Wybranie kolejnych
            bajtów dla długości 24
9         {
10            emi.telegramType = (int)EmiLen.Emi24Len; //Długość ramki
                telegramu
11            emi.MessageCode = emi.importantData.Substring(0, 2); //Typ
                telegramu
12            emi.EibControlField = emi.importantData.Substring(2, 2); //Pole
                kontrolne
13            emi.SourceAddress = emi.importantData.Substring(4, 4); //Adres
                źródłowy
14            emi.GroupAddress = emi.importantData.Substring(8, 4); //Adres
                grupowy
15            emi.DataLength = emi.importantData.Substring(12, 2); //Długość
                pola danych
16            emi.TpciApci = emi.importantData.Substring(14, 4); //Pola TPCI i
                APCI
17            emi.Data = emi.importantData.Substring(18, 4); //Pole danych
18            emi.Checksum = emi.importantData.Substring(22, 2); //Sum
                kontrolna
19        }
20    else if (rawData.Length == (int)EmiLen.Emi22Len) //Wybranie
        kolejnych bajtów dla długości 22
21    {
22        emi.telegramType = (int)EmiLen.Emi22Len;
23        emi.MessageCode = emi.importantData.Substring(0, 2);
24        emi.EibControlField = emi.importantData.Substring(2, 2);
25        emi.SourceAddress = emi.importantData.Substring(4, 4);
26        emi.GroupAddress = emi.importantData.Substring(8, 4);
27        emi.DataLength = emi.importantData.Substring(12, 2);
28        emi.TpciApci = emi.importantData.Substring(14, 4);
29        emi.Data = emi.importantData.Substring(18, 2);
30        emi.Checksum = emi.importantData.Substring(20, 2);
31    }
32    else if (rawData.Length == (int)EmiLen.Emi20Len) //Wybranie
        kolejnych bajtów dla długości 20
33    {
34        emi.telegramType = (int)EmiLen.Emi20Len;
35        emi.MessageCode = emi.importantData.Substring(0, 2);
36        emi.EibControlField = emi.importantData.Substring(2, 2);
37        emi.SourceAddress = emi.importantData.Substring(4, 4);
38        emi.GroupAddress = emi.importantData.Substring(8, 4);
39        emi.DataLength = emi.importantData.Substring(12, 2);
40        emi.TpciApci = emi.importantData.Substring(14, 4);

```

```

41         emi.Data = "0" + emi.importantData.Substring(17, 1);
42         emi.Checksum = emi.importantData.Substring(18, 2);
43     }
44     else if (rawData.Length == (int)EmiLen.Emi14Len) //Pomijanie
45         telegramów o długości 14
46     {
47     }
48     return emi;
49 }
50 else
51 {
52     throw new ArgumentNullException("Data string was empty or NULL");
53 }
54 }
55
56 public static DecodedTelegram DecodeEmiFields(EmiFields rawData)
57 {
58     var decoder = new AddressDecoder();
59     if (rawData != null && rawData.telegramType != 0)
60     {
61         rawData.SourceAddressDeco = decoder.GetSourceAddress(GetBytes
62             (rawData.SourceAddress)); //Odczytanie wartości adresu źródłowego
63         rawData.GroupAddressDeco = decoder.GetGroupAddress(GetBytes
64             (rawData.GroupAddress)); //Odczytanie wartości adresu grupowego
65         rawData.DataLengthDeco = GetLengthFromLengthFields
66             (rawData.DataLength); //Odczytanie długości pola danych
67         var decoded = new DecodedTelegram();
68         decoded.SourceAddress = rawData.SourceAddressDeco;
69         decoded.GroupAddress = rawData.GroupAddressDeco;
70
71         if (rawData.telegramType == (int)EmiLen.Emi24Len &&
72             rawData.DataLengthDeco == 3) // Długość telegramu 24 oraz długość
73             pola danych 3 - liczba zmiennoprzecinkowa
74         {
75             if (5 * 2 == (rawData.TpciApci + rawData.Data +
76                 rawData.Checksum).Length)//Sprawdzanie poprawności długości
77                 pól
78             {
79                 var temp = DataPoint.GetData(GetBytes(rawData.Data),
80                     rawData.DataLengthDeco); //Odczytanie wartości danych
81                 decoded.Data = temp.Data;
82                 decoded.DataFloat = temp.DataFloat;
83             }
84             else
85             {
86                 throw new ArgumentException("Some data is missing");
87             }
88         }
89         else if (rawData.telegramType == (int)EmiLen.Emi22Len &&
90             rawData.DataLengthDeco == 2) // Długość telegramu 22 oraz długość
91             pola danych 2 - np. liczba całkowita
92         {

```

```

83
84     if (4 * 2 == (rawData.TpciApci + rawData.Data +           ↗
      rawData.Checksum).Length)//Sprawdzanie poprawności długości ↗
      pól
85     {
86         var temp = DataPoint.GetData(GetBytes(rawData.Data), ↗
      rawData.DataLengthDeco);//Odczytanie wartości danych ↗
87         decodeded.Data = temp.Data;
88         decodeded.DataFloat = temp.DataFloat;
89     }
90     else
91     {
92         throw new ArgumentException("Some data is missing");
93     }
94 }
95 else if (rawData.telegramType == (int)EmiLen.Emi20Len &&     ↗
      rawData.DataLengthDeco == 1) // Długość telegramu 20 oraz długość ↗
      pola danych 1 - włącz/wyłącz
96 {
97
98     if (3 * 2 == (rawData.TpciApci + rawData.Checksum).Length) // ↗
      Sprawdzanie poprawności długości pól ↗
99     {
100         var temp = DataPoint.GetData(GetBytes(rawData.Data), ↗
      rawData.DataLengthDeco);//Odczytanie wartości danych ↗
101         decodeded.Data = temp.Data;
102         decodeded.DataFloat = temp.DataFloat;
103     }
104     else
105     {
106         throw new ArgumentException("Some data is missing");
107     }
108 }
109 else if (rawData.telegramType == (int)EmiLen.Emi14Len)
110 {
111     //do nothing
112 }
113 return decodeded;
114 }
115 else
116 {
117     throw new ArgumentNullException("Data string was empty or NULL");
118 }
119 }
120
121 public string GetSourceAddress(byte[] data) //Odczytywanie adresu grupowego
122 {
123     var connection = new KnxConnectionRouting();
124     var tempBytes = GetSource1(data); //Odczytanie bitów 0-3
125     var first = connection.FromDataPoint("5.010", tempBytes);
126     tempBytes = GetSource2(data);//Odczytanie bitów 4-7
127     var second = connection.FromDataPoint("5.010", tempBytes);
128     tempBytes = GetAdres3(data);//Odczytanie bitów 8-15

```

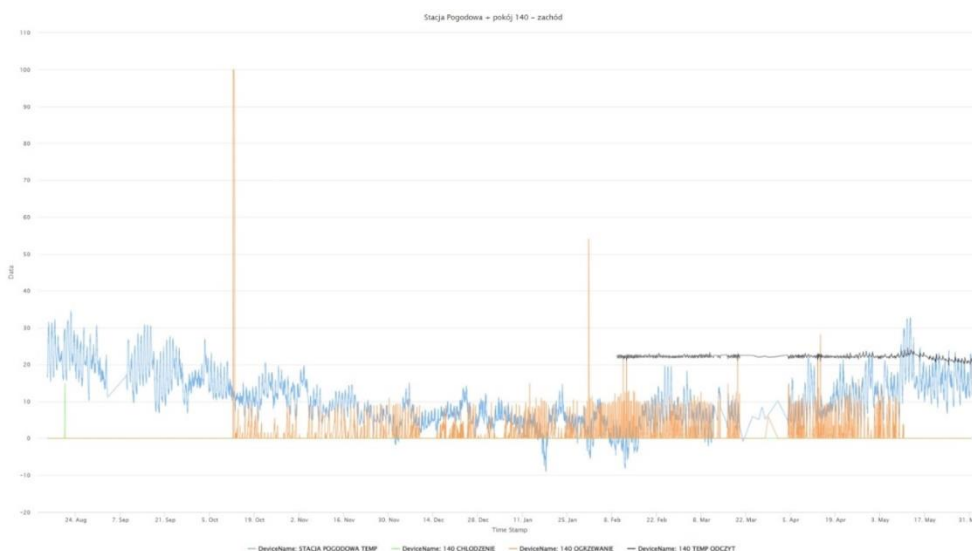
```

129     var third = connection.FromDataPoint("5.010", tempBytes);
130
131     var returnVal = first + "." + second + "." + third;
132     return returnVal;
133 }
134
135 public string GetGroupAddress(byte[] data) //Odczytywanie adresu źródłowego
136 {
137     var connection = new KnxConnectionRouting();
138     var tempBytes = GetAdres1(data); //Odczytanie bitów 0-4
139     var first = connection.FromDataPoint("5.010", tempBytes);
140     tempBytes = GetAdres2(data); //Odczytanie bitów 5-7
141     var second = connection.FromDataPoint("5.010", tempBytes);
142     tempBytes = GetAdres3(data); //Odczytanie bitów 8-15
143     var third = connection.FromDataPoint("5.010", tempBytes);
144
145     var returnVal = first + "/" + second + "/" + third;
146     return returnVal;
147 }

```

Rysunek 17. Kod programu realizujący funkcję dekodowania danych [opracowanie własne]

Dzięki stworzonej aplikacji rejestrowane parametry można było przedstawić w postaci graficznej. Na rysunku 18 przedstawiono wykres wybranych parametrów dla pomieszczenia 140. Kolorem niebieskim oznaczono wartość temperatury zewnętrznej, kolorem czarnym odczyt temperatury w pomieszczeniu, kolorem pomarańczowym wartość ogrzewania, kolorem zielonym wartość chłodzenia odnoszące się do temperatury zewnętrznej i wewnętrznej.



Rysunek 18. Wykres wybranych parametrów dla pomieszczenia 140

Dla określenia wpływu warunków zewnętrznych na temperaturę panującą w pomieszczeniach oraz zużycie energii, zawężono okres analizy wyników. Wybrano okres 1 miesiąca od 08.02.2021 r. do 08.03.2021 r. W analizowanym okresie warunki zewnętrzne były najbardziej zróżnicowane, temperatura osiągała

zarówno wartości ujemne jak i dodatnie. Z założenia przyjęto dwa źródła energii cieplnej w analizowanych pomieszczeniach:

- główne źródło energii to sterowane ogrzewanie,
- ciepło wynikające z panujących warunków zewnętrznych, nasłonecznienia i temperatury.

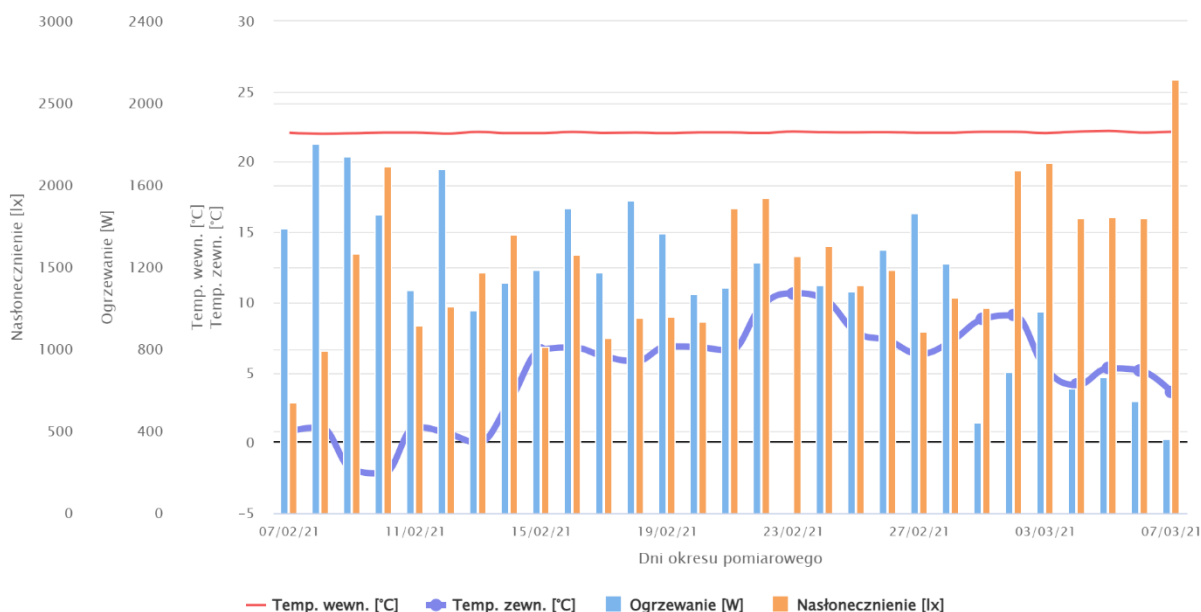
Celem analizy uzyskanych wyników było znalezienie związku między temperaturą wewnętrzną pomieszczenia, a nasłonecznieniem budynku. Wartość mocy grzewczej była rejestrowana oddzielnie dla każdego pomieszczenia. Natomiast nasłonecznienie i temperatura zewnętrzna były parametrami wspólnymi dla wszystkich pomieszczeń i były one rejestrowane przez stację pogodową. Analizę danych przeprowadzono w dwóch etapach.

W pierwszym etapie wyznaczono średnie dobowe dla całego okresu pomiarowego obejmującego cztery parametry:

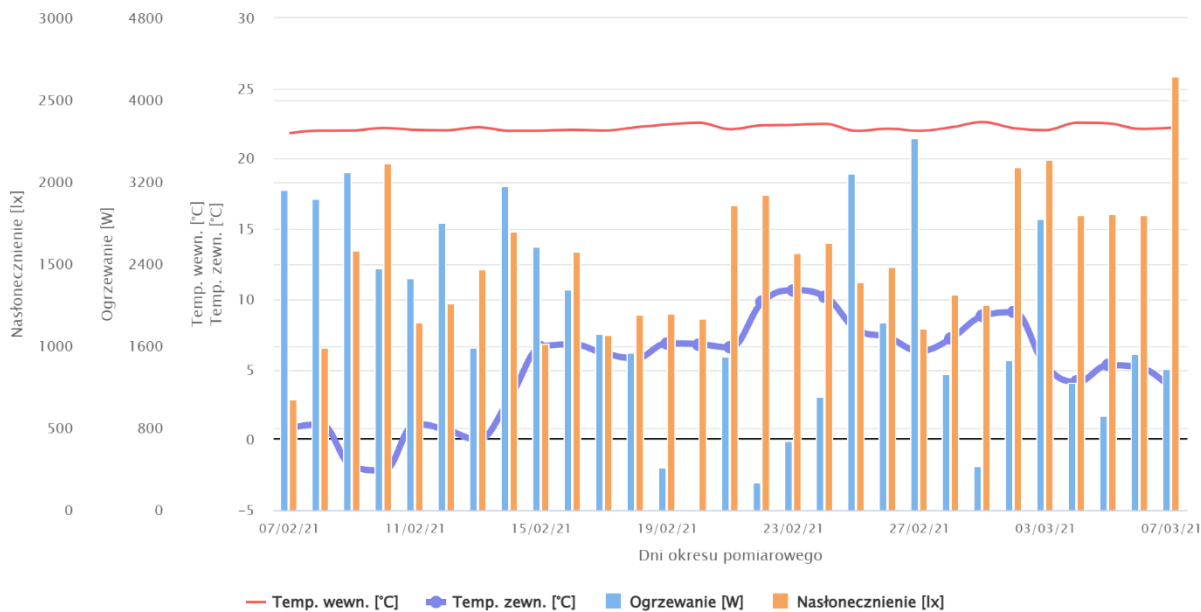
- temperatura zewnętrzna,
- nasłonecznienie,
- temperatura wewnętrzna,
- moc ogrzewania.

Wyniki przedstawiono w postaci graficznej na rysunkach 19-22.

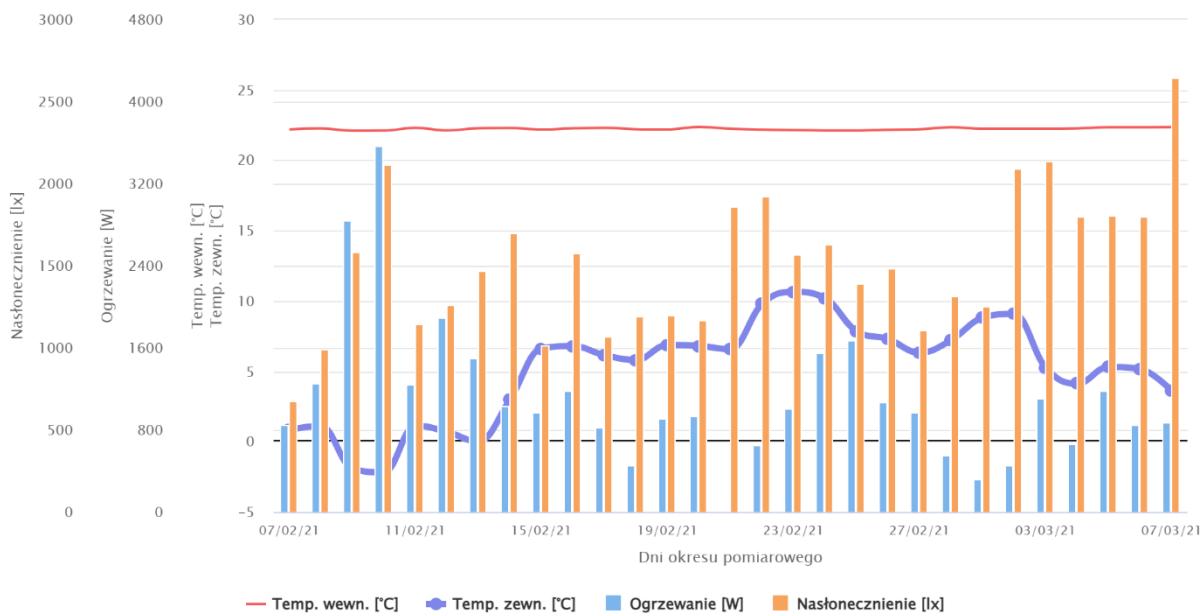
W drugim etapie porównano korelacje pomiędzy mocą ogrzewania, a zmianami temperatury wewnętrznej w godzinach nocnych oraz w ciągu doby (24 godziny). Powyższe wyniki dla poszczególnych pomieszczeń przedstawiono odpowiednio na rysunkach 23 – 26.



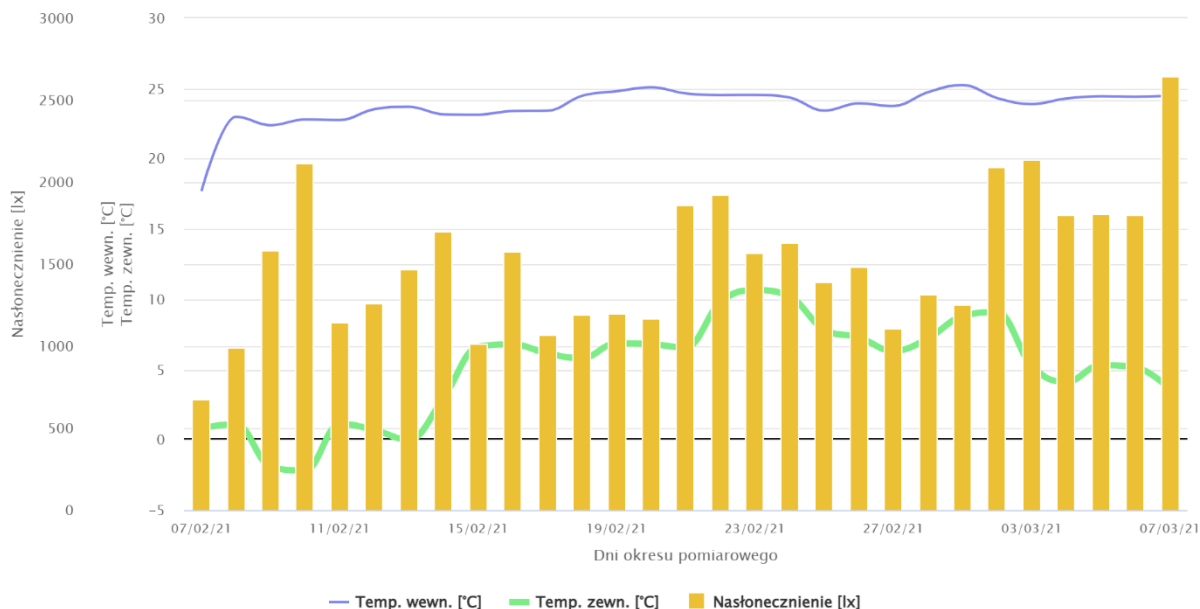
Rysunek 19. Średnie dzienne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 220 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej



Rysunek 20. Średnie dzienne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 124 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej



Rysunek 21. Średnie dzienne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 140 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej



Rysunek 22. Średnie dzienne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 104 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej

Na rysunku 22 (pomieszczenie nr 104) nie pokazano wartości mocy grzewczej. Wynikało to z faktu, że w analizowanym okresie nie włączono ogrzewania tego pomieszczenia. Temperatura w pomieszczeniu była wyższa od nastawy temperatury żądanej (oczekiwanej). Dla dokładniejszego zobrazowania różnic pomiędzy pomieszczeniami wyznaczono miesięczne i średnio-dzienne zużycie energii na ogrzewanie oraz średnią wartość temperatury panującą w pomieszczeniach oraz ich odchylenie standardowe. Wyniki przedstawiono w tabeli 6.

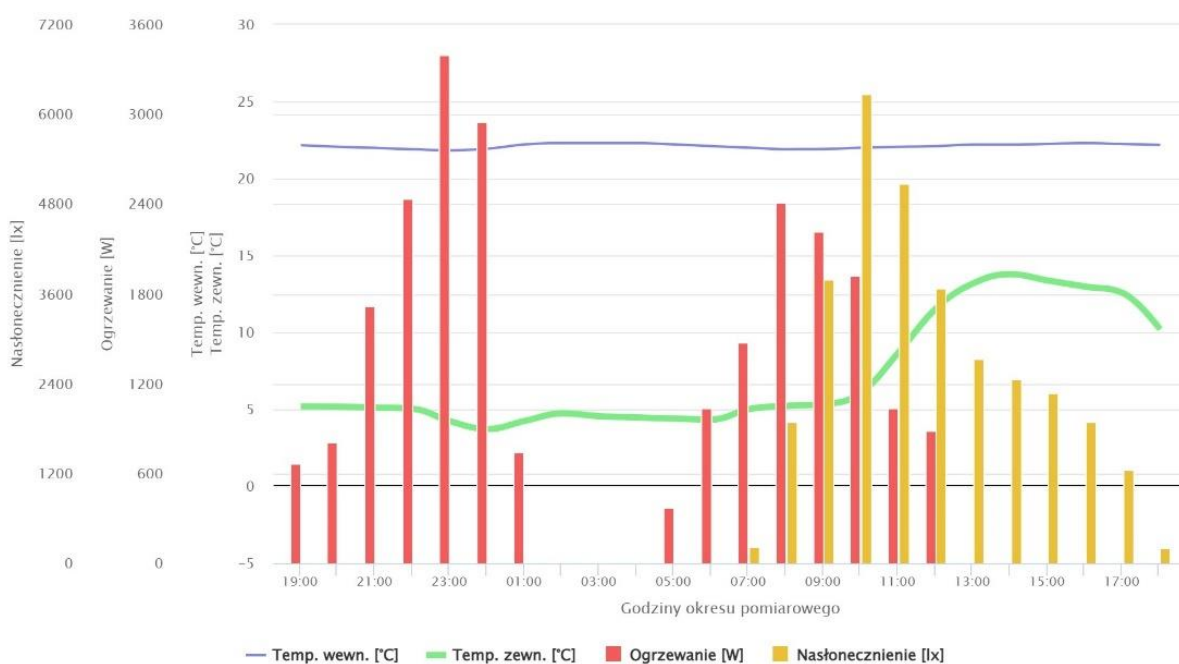
Tabela 6. Parametry statystyki grzewczej w pomieszczeniach

Nr pomieszczenia	Miesięczne zużycie energii na ogrzewanie pomieszczeń, kWh	Średnie zużycie dzienne energii na ogrzewanie, Wh	Zużycie energii odchylenie standardowe, Wh	Średnia temperatura °C	Temperatura odchylenie standardowe
<b>220 (Północ)</b>	78,9	2720,80	619,75	22,09	0,05
<b>124 (Wschód)</b>	85,6	2952,29	1098,32	21,82	0,22
<b>140 (Zachód)</b>	70,9	2444,92	670,45	22,23	0,08
<b>104 (Południe)</b>	0	0,00	0,00	23,74	1,38

Jak wynika z zebranych danych zużycie energii grzewczej dla pomieszczenia 104, znajdującego się na południu, wynosi 0. Dowodzi, że w badanym okresie, w pomieszczeniu skierowanym na południe, jest wystarczająca ilość energii cieplnej pochodzącej z działania promieni słonecznych. Oczywiście należy pamiętać, że ma to miejsce przy całkowicie zamkniętym pomieszczeniu. Natomiast z pozostałych analizowanych pomieszczeń, najniższe zużycie energii na ogrzewanie występuje dla pomieszczenia zachodniego (nr 140). Ponadto średnia temperatura w tym pomieszczeniu, w badanym okresie jest wyższa

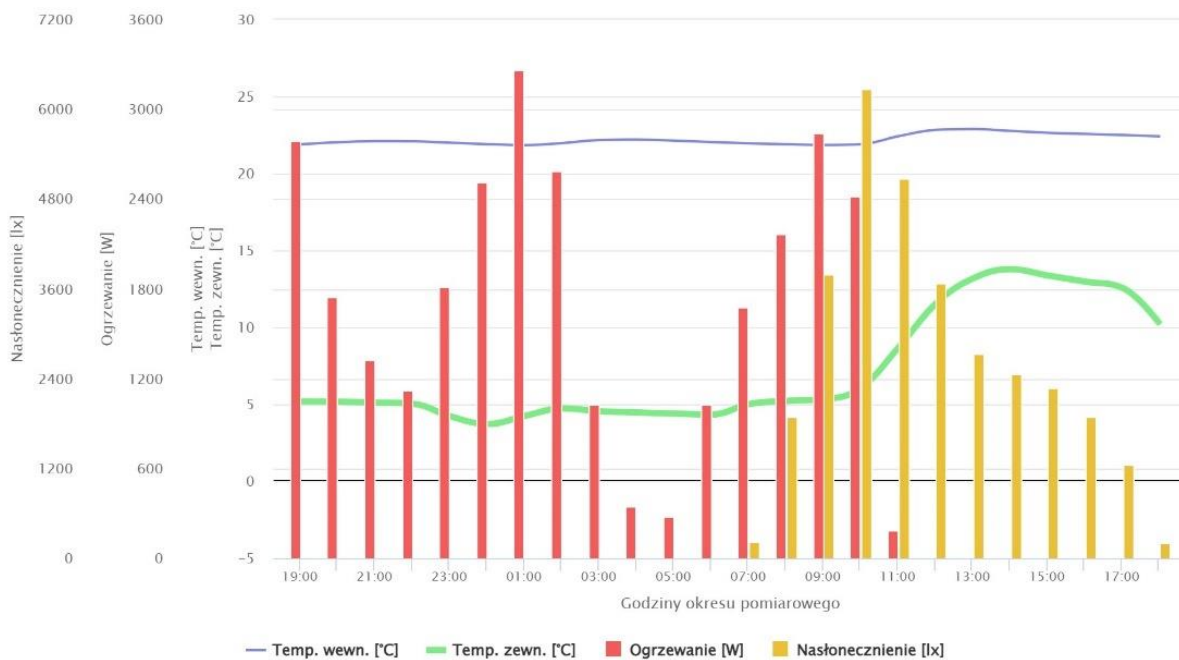
od temperatury zadanej (22°C) jedynie o 0,23°C. Jednocześnie na podstawie wartości odchylenia standardowego można stwierdzić, że największe wahania temperatury, a co za tym idzie najczęściej załączało / wyłączało się ogrzewanie dla pomieszczenia nr 124.

Dla znalezienia bardziej szczegółowej odpowiedzi na pytanie jaki jest wpływ promieniowania słonecznego na temperaturę wewnętrzną panującą w pomieszczeniach w zależności od ich usytuowanie względem kierunków kardynalnych, przeprowadzono dodatkową analizę. Wybrano dwudziestoczerogodzinny okres pomiarowy (01-02.03.2021). Wyliczono średnie godzinowe wszystkich analizowanych parametrów. Wyniki przedstawiono odpowiednio na rysunkach nr 23 – 26.

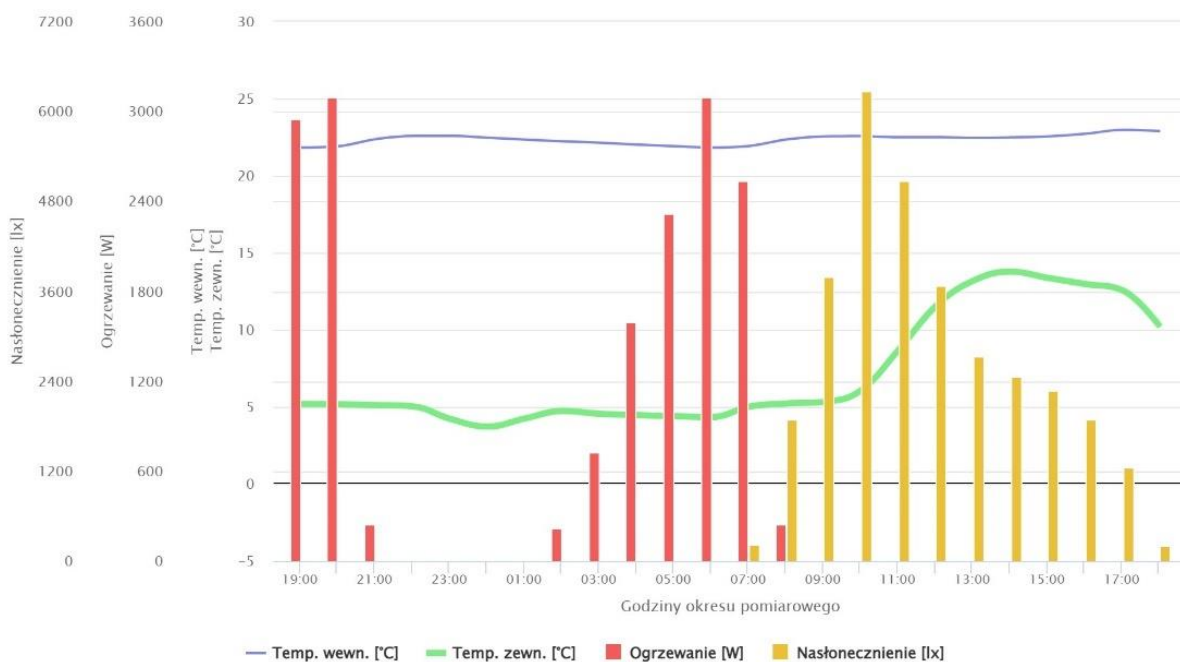


Rysunek 23. Dwudziestoczerogodzinne średnie godzinowe średnie temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 220 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej

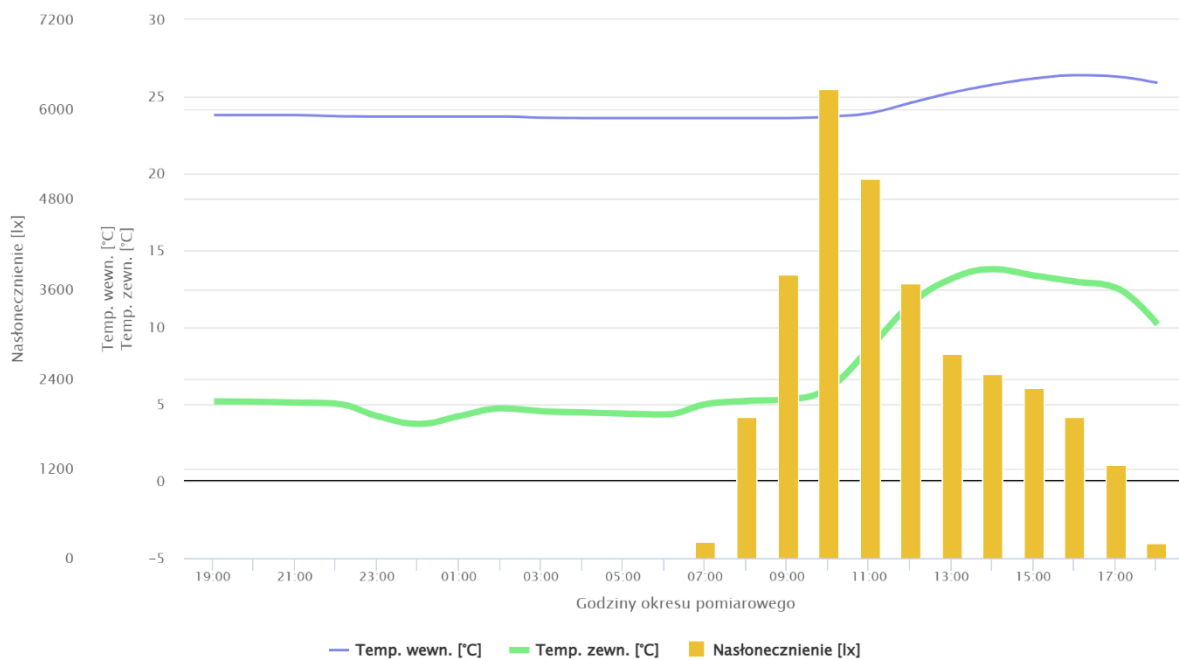




Rysunek 24. Dwudziestoczterogodzinne średnie godzinne średnie temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 124 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej



Rysunek 25. Dwudziestoczterogodzinne średnie godzinne średnie temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 140 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej

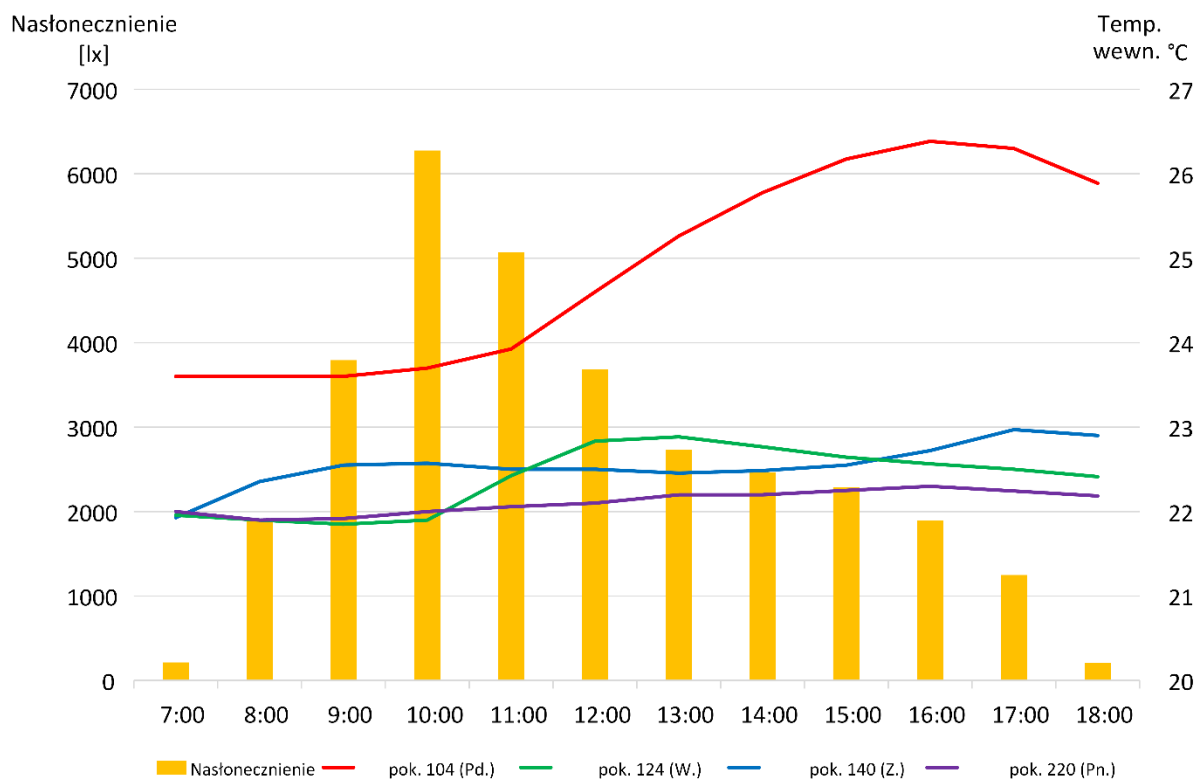


Rysunek 26. Dwudziestoczerogodzinne średnie godzinne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 104 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej

Analizując uzyskane dla poszczególnych pomieszczeń wyniki można zauważyć związek między nasłonecznieniem, a zmianą temperatury w pomieszczeniu. Jest to szczególnie wyraźnie widoczne dla pomieszczenia 104, którego okno jest skierowane na południe. Widać, że między godziną 11-tą, a 15-tą kilkustopniowy wzrost temperatury panującej w pomieszczeniu (rys. 26). W tym czasie jedynymi źródłami ciepła były: temperatura zewnętrzna i słońce. Z uwagi że temperatura na zewnątrz nie przekraczała 14 stopni, to za ten wzrost temperatury jedynie są odpowiedzialne promienie słoneczne. W przypadku pomieszczeń, których okna były skierowane na wschód i na zachód, wzrost temperatury jest również zauważalny, lecz nie przekracza on 1°C (rys. 24 i 25). Dla tak dobranego okresu analizy wyników (1 dzień), jest możliwe określenie wpływu ogrzewania na zmianę temperatury w pomieszczeniu (pomiar w godzinach nocnych). Jednak w takim przypadku należy uwzględnić wpływ temperatury zewnętrznej na zapotrzebowanie na energię. Należy również pamiętać, że każde pomieszczenie charakteryzuje się pewną bezwładnością cieplną. Na podstawie wyników przedstawionych na wykresach rysunki 23-25, można zauważyć, że inercja układu grzewczego wynosi ok. 1g. Znaczy to, że dopiero po ok. 60 minutach od momentu załączenia systemu grzewczego następuję widoczny wzrost temperatury w pomieszczeniu.

Na rysunku 27 przedstawiono zbiorcze zestawienie temperatur panujących w pomieszczeniach 104, 124, 140 i 220 w zależności od nasłonecznienia podczas ekspozycji na promieniowanie słoneczne. Największy wpływ promieni słonecznych jest widoczny dla pomieszczenia 104, które jest skierowane na południe. Dla pozostałych ten wpływ jest zdecydowanie mniejszy. Wzrost temperatury w pomieszczeniach występuje w różnych porach dnia w zależności od kierunku usytuowania pomieszczenia np. dla pomieszczenia 104 wzrost

nastąpił od godziny 11 – tej, dla pomieszczenia 124 od godziny 10 - tej, a dla pomieszczenia 140 od godziny 15 - tej.



Rysunek 27. Zależność temperatury wewnętrznej dla pomieszczeń 104, 124, 140 i 220 od nasłonecznienia

Uzupełnieniem powyższej analizy są obliczenia statystyczne, których celem było określenie korelacji między ogrzewaniem, a temperaturą panującą w pomieszczeniu. Korelację obliczono dla dwóch okresów:

- nocnego (między godz. 19 a 7), - jedynym źródłem ciepła w pomieszczeniach było ogrzewanie,
- całodobowego (obejmował 24 godziny) – źródłem ciepła było ogrzewanie i promienie słoneczne.

Obliczenia te wykonano dla 3 pomieszczeń, z wyłączeniem pomieszczenia 104, w którym ogrzewanie nie było włączane. Osiągnięte współczynniki korelacji przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Współczynniki korelacji między ogrzewaniem, a aktualną wartością temperatury w pomieszczeniach

Pomieszczenie	Korelacja pomiędzy ogrzewaniem a temperaturą (noc)	Korelacja pomiędzy ogrzewaniem a temperaturą (noc i dzień)
220 (Północ)	-0.96	-0.95
124 (Wschód)	-0.92	-0.87
140 (Zachód)	-0.94	-0.86

Wysokie wartości bezwzględne współczynników korelacji wskazują na istnienie zależności między analizowanymi wielkościami, natomiast ujemna wartość każdego z tych współczynników wskazuje, że

zależność jest odwrotnie proporcjonalna. Jest to zgodne z typowym algorytmem kontroli temperatury w pomieszczeniu. Gdy temperatura w pomieszczeniu osiągnie nastawę, ogrzewanie jest wyłączane, a jeśli temperatura spadnie poniżej wartości minimalnej, ogrzewanie jest włączane. Na podstawie uzyskanych wartości współczynników korelacji zauważono, że dla pomieszczenia 220, znajdującego się w północnej części budynku, wpływ ogrzewania na temperaturę pomieszczenia utrzymuje się na tym samym poziomie, w obu analizowanych okresach. W przypadku innych pomieszczeń (124 i 140) istnieje mniejsza korelacja między ogrzewaniem, a temperaturą w pomieszczeniu dla okresu dwudziestoczterogodzinnego. Świadczy to o tym że mniejszy jest wpływ ogrzewania na temperaturę panującą w pomieszczeniu w ciągu doby.

## 5.5 Podsumowanie badań i analizy wyników

W rozdziale 5.4 zaprezentowano analizę wyników badań przeprowadzonych dla istniejącego budynku biurowego firmy KAMSOFT S.A. (GLON). Badania te pozwoliły uświadomić jak ważne jest odpowiednie usytuowanie pomieszczeń i wykorzystanie zewnętrznych warunków środowiskowych oraz odpowiedni wybór instalacji grzewczej (chłodzenia) dla zapewnienia odpowiedniego komfortu cieplnego i obniżenia zużycia energii.

Na podstawie przedstawionych wyników można wyciągnąć wniosek, że dla pomieszczenia, w którym okno jest skierowane na południe działanie promieniowania słonecznego pozwala znacznie ograniczyć zapotrzebowania na energię, ale bezpośrednie promieniowanie słoneczne jest przyczyną wzrostu temperatury w pomieszczeniu ponad wartości przekraczające temperatury maksymalne wynikające z komfortu cieplnego.

Ponadto na podstawie wyników stwierdzono, że najbardziej energochłonnym pomieszczeniem było to, w którym okno były skierowane na wschód. Wynikało to z faktu największego narażenia na wiatr, co było powodem szybszego ochłodzenia tej strony budynku. Promienie słoneczne padające w porannych godzinach dnia nie były w stanie odpowiednio dogrzać pomieszczenia.

Na podstawie analizowanych danych stwierdzono, że nie ma bezpośredniego ani pośredniego wpływu nasłonecznienia na temperaturę panującą w pomieszczeniach zlokalizowanych po północnej stronie budynku, natomiast wpływ nasłonecznienia na południowe pomieszczenia budynku jest znaczący. Na podstawie zarejestrowanej temperatury dla pomieszczenia 104, którego okno jest odsłonięte od południa stwierdzono, że średnia temperatura tego pomieszczenia jest o ponad 1,5°C wyższa niż w pomieszczeniach znajdujących się w północnej, wschodniej i zachodniej części budynku, pomimo braku ogrzewania tego pomieszczenia. Powierzchnia, objętość i rozmiar okna dla wszystkich analizowanych pomieszczeń były takie same.

Obecnie czynnik ustawienia okna na działanie promieniowania słonecznego nie jest brany pod uwagę w systemie ogrzewania budynku, a jego udział jest przypadkowy. Ponadto zauważono, że zebrane dane pozwalają również na opracowanie dokładnych modeli termicznych dla poszczególnych pomieszczeń. Modele te mogą również uwzględniać wpływ głównego źródła ciepła oraz wpływ dodatkowej energii

pochodzącej z zewnętrznego okna wystawionego na działanie promieniowania słonecznego. Stosując dokładne modele termiczne pomieszczeń, można uniknąć przekroczenia nastawionej temperatury w pomieszczeniu, a także na podstawie prognozy temperatury zewnętrznej i nasłonecznienia można podjąć próbę obniżenia kosztów energii poprzez zmniejszenie dopływu ciepła z systemu grzewczego podczas ekspozycji słonecznej przez okno znajdujące się w pomieszczeniu.

Na podstawie wykonanych badań oszacowano, że czas odpowiedzi ogrzewania podłogowego wynosi od 5 do 7 h, co powoduje bardzo ograniczone możliwości szybkiego sterownia i reagowania na zmiany temperatury zewnętrznej i zapotrzebowania na ciepło wewnątrz pomieszczeń budynku. Dlatego też w nowo projektowanym budynku biurowym CRON zostało wybrane i zaprojektowane ogrzewanie i klimatyzacja oparte tylko na klimakonwektorach z układem zasilania czterorurowym. Dzięki temu czas odpowiedzi pomieszczenia na działanie ogrzewania lub klimatyzacji skróci się do szybkiej odpowiedzi w zakresie od kilku do kilkunastu minut w porównaniu do 1,5-5 h dla ogrzewania podłogowego [12]. Taka szybka odpowiedź pozwoli na konkretne oszczędności finansowe kosztów utrzymania budynku przez ograniczanie ogrzewania i klimatyzacji poza godzinami pracy i w okresie weekendów i dni ustawowo wolnych od pracy.

## **5.6 Założenia projektowe nowego budynku biurowego**

Zgodnie z założeniem doktoratu wdrożeniowego i Indywidualnym Planem Badawczym wdrożeniem miała być inwestycja Budowa Budynek Biurowego CRON - Centrum Rozwoju Nauki. Do jej zrealizowania przygotowano projekt budowlany i projekty wykonawcze. Brałem czynny udział w tworzeniu programu użytkowego dla planowanej inwestycji CRON, który polegał na przekazywaniu informacji o potrzebach i strukturze organizacyjnej firmy KAMSOFT S.A. oraz na konsultowaniu przyjmowanych założeń, proponowanych koncepcji i rozwiązań projektowych. Docelowa koncepcji obejmowała obszar o następujących powierzchniach:

- terenu zagospodarowanego - 2,2ha,
- całkowitą - 14 999,42m<sup>2</sup>,
- użytkową - 12 842,76m<sup>2</sup>,

Przewidywana liczba miejsc pracy w budynku mieściła się w zakresie 674 ÷ 865 osób. Bezpośrednio uczestniczyłem w opracowaniu:

- koncepcji wstępnych i pośrednich - 2020 rok,
- docelowej koncepcji programowo-przestrzennej dla inwestycji CRON - 2020-2021 rok,
- projektu budowlanego i wykonawczego zagospodarowania terenu - 2021 rok,
- projektu budowlanego i wykonawczego architektonicznego - 2021 rok.

Brałem udział w tworzeniu założeń technicznych, materiałowych i systemowych dla wszystkich sieci zewnętrznych i instalacji wewnętrznych wymagających sterowania i automatyki. Dzięki temu powstały projekty branżowe odpowiednie do objęcia ich spójnym systemem sterowania i automatyki KNX. Zakres ten obejmował całą inwestycję w szczególności przygotowanie:

- Projektu Budowlanego i Wykonawczego Sieci Wodno-Kanalizacyjnych,
- Projektu Budowlanego i Wykonawczego przekładki Sieci Ciepłej (ciepłociąg 2 x DN125~DN200),
- Projektu Budowlanego i Wykonawczego Sieci Elektrycznych (dla całej inwestycji teren 2,2ha),
- Projektu Budowlanego i Wykonawczego Sieci Energetycznej SN i NN,
- Projektu Budowlanego i Wykonawczego Sieci Oświetleniowej,
- Projektu Budowlanego i Wykonawczego Instalacji Wodno-Kanalizacyjnych,
- Projektu Budowlanego i Wykonawczego Instalacji Ciepłych, Chłodniczych i Wentylacyjnych,
- Projektu Budowlanego i Wykonawczego Instalacji Elektrycznych,
- Projektu Sygnalizacji Pożaru,
- Projektu Systemu Gaszenia Gazem - dla serwerowni o łącznej powierzchni użytkowej ok. 411m<sup>2</sup>, w której zaplanowano umieszczenie łącznie 96 szaf serwerowych.

Brałem czynny udział w optymalizacji instalacji wewnętrznych i wyposażenia budynku obejmującą:

- Optymalizację układów klimatyzacji (2MW) i ogrzewania (1,6MW) pod kątem ekonomii użytkownika,
- Optymalizację układów chłodzenia serwerowni (1MW) pod kątem bezpieczeństwa i ekonomii użytkownika serwerowni oraz wtórnego zagospodarowania ciepła z chłodzenia serwerowni do ogrzewania budynku w okresie zimowym,
- Wyposażenia serwerowni i dobór jej zasilania (1MW+1MW ),
- Optymalizacja układów podstawowego i rezerwowego zasilania elektrycznego obiektu (3,0MW+2,25MW),
- Układ stanowisk pracy - w zakresie wyposażenia biurowego komputerowego i oświetlenia oraz ogólnego „systemu pracy” odpowiedniego dla struktury organizacyjnej firmy KAMSOFT S.A.,
- Optymalizację struktury obiektu, pod względem koniecznych układów kontroli dostępu,
- Optymalizację układu dźwigów osobowych, pod kątem potrzeb użytkownika,
- Optymalizację wielkości i wyposażenia wydzielonej strefy produkcyjnej, pod kątem realnych potrzeb użytkownika.

Weryfikowałem wszystkie przyjęte rozwiązania projektowe pod kątem optymalnej współpracy z Systemami Sterownia i Automatyką Budynku opartą o system KNX.

W ramach przygotowania dokumentacji opracowałem następujące projekty:

- Projekt Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego;
- Projekt Sterownia i Automatyki Budynku KNX,
- Projekt Systemu Kontroli Dostępu,
- Projekt Monitoringu Wizyjnego,
- Projekt Sieci Strukturalnej,
- Projekty instalacji OZE.

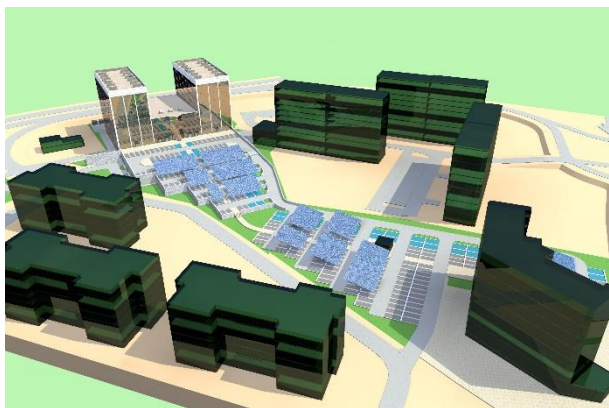
Szczegółowy zakres projektów opisano w kolejnym rozdziale 5.7.

## 5.7 Projekt budowlany i projekty wykonawcze budynku biurowego Centrum Rozwoju Nauki

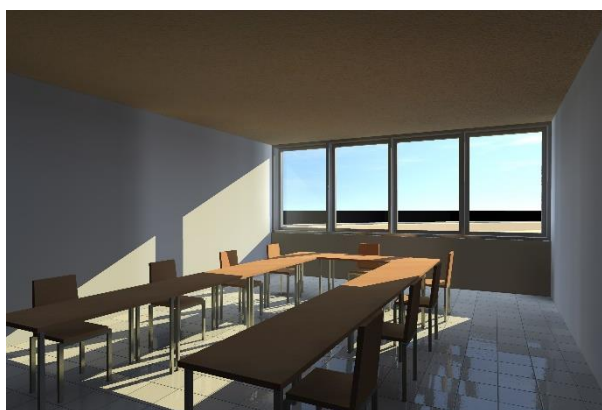
Badania przeprowadzone dla budynku GLON i wyciągnięte wnioski, opisane w rozdziałach 5.1-5.5 uzupełniły moją wiedzę w zakresie doboru instalacji oraz sposobu sterowania nimi. Przyczyniło się to do przygotowania projektu dla nowo budowanego budynku CRON firmy KAMSOFT S.A. Na rysunku 28 przedstawiono zdjęcie dokumentacji projektowej budynku CRON, a na rysunku 29 wizualizacje otoczenia i samego budynku. Natomiast na rysunku 30 przykładowe wizualizacje pomieszczeń. Projekt obejmował budowę budynku usługowo-biurowego CRON wraz z serwerownią oraz z uzupełniającymi częściami: konferencyjną, handlową, produkcyjną, magazynową, socjalną, rekreacyjno-sportową, gastronomiczną, garażową, techniczną. W ramach prac przygotowano projekty instalacji wewnętrznych: wodno-kanalizacyjną, centralnego ogrzewania, elektryczną i fotowoltaiczną, niskoprądowymi, wentylacją grawitacyjną, mechaniczną i upustową, gaszenia gazem. Ponadto przygotowano koncepcję zagospodarowania terenu obejmującym wewnętrzny układ drogowy, miejsca parkingowe, chodniki, place gospodarcze, zieleń urządzoną, nasypy ziemne z murami oporowymi, ogrodzenia. Dodatkowo opracowano projekty instalacji zewnętrznych obejmujące: przekładkę sieci ciepłej, przekładkę sieci elektroenergetycznej, sieć elektroenergetyczną wewnętrzną, stację transformatorów z rozdzielnią elektroenergetyczną, agregaty prądotwórcze, elektryczną sieć terenową w tym oświetlenia terenu wraz z przekładkami, sieci niskoprądowe, światłowód, kanalizację deszczową z separatorami, kanalizację sanitarną, wodociąg oraz instalację odzysku i zagospodarowania wody deszczowej.



Rysunek 28. Dokumentacja projektowa Budynku CRON Centrum Rozwoju Nauki



*Rysunek 29. Wizualizacje otoczenia i Budyńku CRON Centrum Rozwoju Nauki*



*Rysunek 30. Wizualizacje pomieszczeń Budyńku CRON Centrum Rozwoju Nauki*

Zaprojektowano ośmiokondygnacyjny budynek usługowo-biurowy, składający się z następujących poziomów:

- Przyziemia gdzie zlokalizowano:
  - garaż słuźbowy,
  - słuź rozładunkową z biurem magazynierów,
  - pomieszczenie warsztatowe serwisu sprzętu elektronicznego,
  - biura przedstawicieli handlowych,
  - magazyny i archiwa,
  - wydzielony zespół pomieszczeń serwerowni,



- pomieszczenie produkcyjne (prototypowa i małoseryjna produkcja urządzeń elektronicznych),
- salę sportowo rekreacyjną,
- szatnie oraz pomieszczenia socjalne i sanitarne,
- niezbędną komunikację.
- parteru gdzie zlokalizowano:
  - wiatrołap i hol główny,
  - portiernię, biuro podawcze i pomieszczenia obsługi klienta,
  - amfiteatralną salę konferencyjną,
  - sześć małych salek konferencyjnych,
  - aneks gastronomiczny z zapleczem bufetu,
  - mały zespół pomieszczeń biurowych,
  - pomieszczenia socjalne i sanitarne z sanitariatami dla niepełnosprawnych oraz pomieszczenia porządkowe,
  - niezbędną komunikację.
- piętro 1 - na poziomie pierwszego piętra zlokalizowano:
  - zespół pomieszczeń zarządu firmy - sekretariat i pięć gabinetów z salkami konferencyjnymi i innymi pomieszczeniami pomocniczymi - po stronie zachodniej,
  - zespół pomieszczeń administracji firmy - sekretariat, pięć pokoi biurowych z archiwami, salkami konferencyjnymi - po stronie wschodniej,
  - galerię łączącą część wschodnią i zachodnią - otwartą na przestrzeń holu głównego,
  - pomieszczenia socjalne i sanitarne z sanitariatami dla niepełnosprawnych oraz pomieszczenia porządkowe,
  - niezbędną komunikację.
- piętro 2 - gdzie w bocznych skrzydłach budynku zlokalizowano:
  - zespół pomieszczeń biurowych składający się z: sześciu pokoi biurowych, sekretariatu i dwóch gabinetów oraz salki szkoleniowej,
  - w skrzydle zachodnim zlokalizowano salę prezentacji multimedialnych, a w skrzydle wschodnim zlokalizowano studio nagrań,
  - w każdym skrzydle zlokalizowano pomieszczenia socjalne i sanitarne (w tym dla niepełnosprawnych) oraz pomieszczenia porządkowe,
  - niezbędną komunikację (korytarz, klatka schodowa, dwa dźwigi w tym dźwigi dla ekip ratowniczych).
- piętro 3; 4; 5 i 6 gdzie w bocznych skrzydłach budynku zlokalizowano na każdej kondygnacji:
  - osiem pokoi biurowych, sekretariat i dwa gabinety oraz salkę szkoleniową,

- pomieszczenia socjalne i sanitarne z sanitariatami dla niepełnosprawnych oraz pomieszczenia porządkowe,
- niezbędną komunikację (korytarz, klatka schodowa, dwa dźwigi w tym dźwigi dla ekip ratowniczych).

Oprócz działań doradczych, konsultacyjnych, współuczestniczyłem w opracowaniu koncepcji powstania budynku CRON i przygotowaniu projektu budowlanego oraz projektów wykonawczych. Jednak głównym moim zadaniem w przygotowywanej dokumentacji było opracowanie następujących projektów:

1. Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego,
2. Sterownia i Automatyki Budynku KNX,
3. Systemu Kontroli Dostępu,
4. Instalacji Niskoprądowych,
5. Sieci Strukturalnej,
6. Instalacji OZE.

#### **Ad. 1. Projekt Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego.**

Projekt wykonawczego Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego (DSO) został oparty o urządzenia systemu MultiVES firmy Ambient System. Projekt wykonawczy DSO swoim opracowaniem obejmuje:

- Określenie wymagań dla systemu,
- Dobór i instalację urządzeń centralnych,
- Dobór zasilania awaryjnego,
- Dobór i instalację paneli mikrofonowych,
- Dobór i instalację głośników pożarowych,
- Określenie wymagań dla tras kablowych,
- Połączenie z centralą systemu sygnalizacji pożarowej,
- Zalecenia i wytyczne dla Inwestora i Wykonawcy.

Podstawą techniczną opracowania projektu są obowiązujące w Polsce przepisy i normy [102, 112-120] oraz wiedza techniczna. Obiekt podzielony jest na 16 stref pożarowych, każda o powierzchni poniżej 2500 m<sup>2</sup>.

Strefy pożarowe oddzielono od siebie elementami przeciwpożarowymi o wymaganych klasach odporności ogniowej. Poszczególne kondygnacje stanowią odrębne strefy pożarowe, wydzielone pomiędzy sobą stropami o klasie REI 60 odporności ogniowej na konstrukcji nośnej o klasie R 120. Odrębne strefy pożarowe wydzielone ścianami o klasie REI 120 odporności ogniowej i zamknięte drzwiami o klasie EI 60 stanowią pomieszczenia, których funkcjonowanie jest niezbędne podczas pożaru (pompownia hydrantowa,

rozdzielnia elektryczna dla celów ppoż.). Klatki schodowe w budynku zostały wydzielone pożarowo ścianami o klasie REI 60 odporności ogniowej, w tym ścianami przedsiionków i zamknięto obustronnie drzwiami ppoż. o klasie EI 30, z samozamykaczami. Wszystkie drzwi przeciwpożarowe w budynku wyposażono w samozamykacze lub inne urządzenia samozamykające. Drzwi dwuskrzydłowe posiadają regulatory kolejności zamykania skrzydeł (RKZ). Piony instalacyjne prowadzone przez poszczególne kondygnacje są obudowane na danej kondygnacji ściankami (przegrodami) klasy EI 30 oraz wydzielone na poziomie stropów między kondygnacyjnych zabezpieczeniami ppoż. co najmniej klasy EI 60. Przewody, rury i kable zabezpieczono w miejscach przejść przez przegrody przeciwpożarowe przepustami o klasie EI 60 odporności ogniowej, a w ścianach oddzielen przeciwpożarowych o klasie EI 120 odporności ogniowej. Przewody wentylacyjne w miejscach przejść przez elementy oddzielen przeciwpożarowych są wyposażone w certyfikowane klapy lub zawory odcinające, o klasie EIS odporności oddzielenia, sterowane przez system sygnalizacji pożaru.

W przypadku powstania pożaru w budynku usługowo-biurowym, najważniejsze jest szybkie wykrycie pożaru przez instalację sygnalizacji pożaru (ISAP) i przekazanie informacji o nim do Stanowiska Kierowania Komendy Miejskiej PSP w Katowicach. Jednocześnie z uwagi na fakt, że pożar powstający w tego typu obiektach charakteryzuje się szybkim rozwojem, niezmiernie istotne jest zadziałanie wszystkich urządzeń instalacji wykrywających pożar, co przekłada się na szybkość organizacji ewakuacji osób ze strefy pożarowej zagrożonej pożarem. Ważne jest także, aby dzięki podawanemu komunikatowi głosowemu przez system DSO do osób przebywających w strefie zagrożonej pożarem dotarła jasna i zrozumiała informacja o konieczności rozpoczęcia ewakuacji. Dzięki mikrofonowi ewakuacją tą będzie można zarządzać dynamicznie w zależności od potrzeb, kierując osoby ewakuujące do wyjść, bądź narzucić im sposób odpowiedniego zachowania się w danej sytuacji. Ważne jest także, aby sygnał alarmu pożarowego generowany przez sygnalizatory akustyczne usytuowane w strefie pożarowej, dotarł do osób przebywających w strefie zagrożonej pożarem, a użytkownicy tej strefy pożarowej (personel/pracownicy) przystąpili szybko do działań gaśniczo-ewakuacyjnych.

Głównym zadaniem dźwiękowego systemu ostrzegawczego (DSO) jest realizacja zasadniczych funkcji ewakuacji i informowania osób przebywających w obiekcie o zagrożeniu, w sposób automatyczny po otrzymaniu sygnałów z systemu sygnalizacji pożarowej (SSP) lub w sposób ręczny przy użyciu mikrofon strażaka.

Centrala DSO po przejściu w stan alarmowy staje się niezdolna do wykonywania funkcji niezwiązanych z ostrzeganiem o niebezpieczeństwie. W stanie normalnym centrala DSO umożliwia realizację fakultatywnych funkcji nagłośnienia obiektu i rozgłaszanie komunikatów informacyjnych za pośrednictwem mikrofonu strefowego lub innych podłączonych do systemu zewnętrznych źródeł dźwięku. Zaprojektowany system DSO w trybie nie alarmowym będzie wykorzystywany jako system nagłośnienia. W przypadku wystawienia centrali DSO w stan alarmowy, system rozpoczyna zaprogramowaną procedurę ewakuacji osób przebywających w budynku poprzez automatyczne uruchomienie rozgłaszania odpowiednich

komunikatów w poszczególnych strefach głośnikowych. Ponadto projektowany system umożliwia przejęcie kontroli przez funkcjonariusza PSP i nadawania komunikatów słownych przy pomocy mikrofonu strażaka do wszystkich lub do dowolnej strefy głośnikowej.

Celem nadawanych przez system DSO komunikatów jest wymuszenie na osobach przebywających w obiekcie podjęcia działań związanych z ewakuacją, w związku z zaistniałym zagrożeniem. Bardzo istotne jest, aby działania związane z ewakuacją zostały rozpoczęte jak najwcześniej. Komunikaty powinny być zrozumiałe i słyszalne. Treść komunikatów wskazuje jakie działania niezwłocznie należy podjąć, w którym kierunku należy się ewakuować.

W skład dźwiękowego systemu ostrzegawczego wchodzi urządzenia takie jak: jednostki kontroli, mikrofony systemowe, wzmacniacze, urządzenia zasilające oraz głośniki ppoż. Podstawowym elementem systemu DSO, odpowiedzialnym za zarządzanie systemem oraz kontrolę poszczególnych elementów systemu, wraz z liniami głośnikowymi jest jednostka kontroli ABT-CU-11LCD, wyposażona w wyświetlacz dotykowy LCD. Urządzenie to zostało wyposażone w procesor DSP i łączy w sobie funkcje wejść / wyjść audio jak również matrycowania i obróbki sygnałów. ABT-CU-11LCD zarządza pracą wzmacniaczy i urządzeń zasilania jak również przyjmuje sygnały alarmowe i cyfrowe od zewnętrznych systemów oraz przesyła je do innych urządzeń w systemie. Każda z jednostek kontroli ma możliwość zapisu konfiguracji i komunikatów. Dzięki temu w przypadku utraty połączenia pomiędzy jednostkami, każda z jednostek będzie w stanie samodzielnie realizować scenariusze akcji pożarowej. Jednostka kontroli odpowiedzialna jest za dystrybucję sygnałów audio ze wzmacniaczy do linii głośnikowych oraz nadzorowanie prawidłowego ich działania. Każda z jednostek kontroli ma wbudowane 4 wejścia audio, dzięki czemu w łatwy sposób umożliwia przyjęcie sygnałów audio z systemów zewnętrznych.

Mikrofon strażaka ABT-DFMS systemu DSO posiada programowalne przyciski funkcyjne, którym w dowolny sposób można przypisać wybrane funkcje. Posiada również możliwość dołączenia kolejnych rozszerzeń mikrofonu z dodatkowymi przyciskami funkcyjnymi. Komunikacja wewnętrzna w systemie DSO z mikrofonami strażaka odbywa się po sieci Ethernet.

Mikrofon strefowy ABT-DMS systemu DSO przeznaczony jest do wywoływania komunikatów ogólnego przeznaczenia, wybierania poszczególnych stref czy nadawania komunikatów głosowych „na żywo”. Jest używany wyłącznie do celów niezwiązanych z alarmowaniem pożarowym. Mikrofon strefowy umożliwia realizację funkcji intercomu (komunikacja dwukierunkowa pomiędzy mikrofonami systemowymi). Mikrofon posiada 4 zewnętrzne wejścia audio (jednoczesna obsługa 4 kanałów) oraz wbudowany głośnik odsłuchowy, umożliwiający m.in. podsłuchanie wybranej strefy. Komunikacja wewnętrzna w systemie DSO z mikrofonami strefowymi odbywa się po sieci Ethernet.

Wzmacniacz mocy ABT-PA8080B jest 8 kanałowym wzmacniaczem, a ABT-PA2650B jest 2 kanałowym wzmacniaczem klasy D, przeznaczonymi do zasilania systemów głośnikowych, wyposażonymi w transformatory separujące, umożliwiające podłączenie linii głośnikowych o napięciu 100V i 50V. Każdy

kanał wzmacniacza może dostarczyć do 80 W (8 kanałowy) i do 650 W (2 kanałowy) mocy, gdy używane są oddzielnie.

Menadżer zasilania ABT-PSM48 jest urządzeniem przeznaczonym do dystrybucji zasilania z głównego i rezerwowego źródła zasilania, jak również do zarządzania pracą baterii akumulatorów. Jednostka dostarcza napięcie stałe z modułów zasilaczy impulsowych do urządzeń systemu. Zapewnia również bezpieczną pracę modułów pracujących w połączeniu równoległym (blokowym) i monitoruje parametry wyjściowe każdego modułu. Po zaniku napięcia podstawowego doprowadzonego do zasilaczy, menadżer zasilania automatycznie przełącza zasilanie urządzeń systemu na zasilanie rezerwowe z baterii akumulatorów. Utrzymuje baterie w stanie naładowanym, zapewnia kompensację temperatury parametrów ładowania i monitoruje rezystancję szeregową akumulatorów z okablowaniem zgodnie z całościowymi wymaganiami normy.

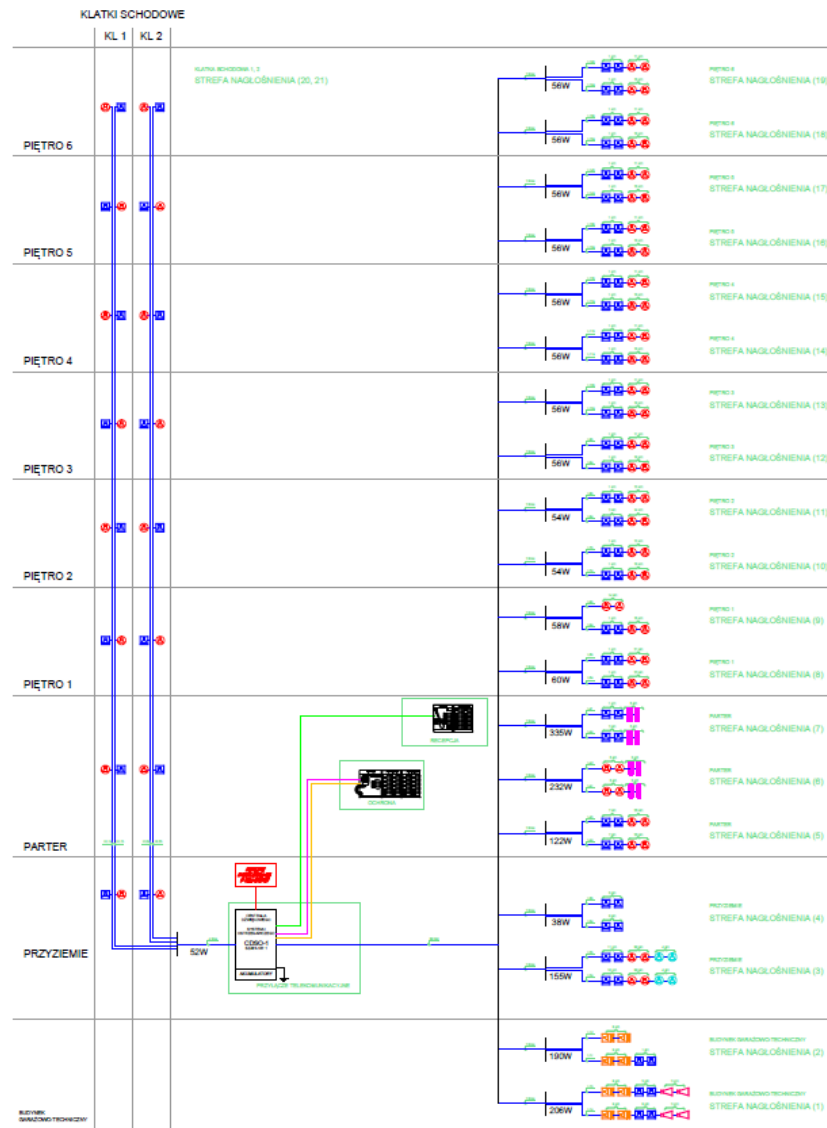
Zasilacze impulsowe ABT-PS48800 wykorzystywane są przez menadżer zasilania, jako źródło dostarczanej do Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego energii elektrycznej. Zasilacze impulsowe przeznaczone są do montażu w dedykowanej ramie zasilaczy ABT-PF4.

Głośniki sufitowe serii ABT-S są głośnikami zaprojektowanymi pod kątem zapewnienia najwyższych parametrów akustycznych. Głośniki ABT-P20, ABT-W6, ABT-T1510 i ABT-SW176 są głośnikami emitującymi dźwięk o charakterystyce kierunkowej i wysokiej skuteczności. Znakomicie spełniają swoją rolę zarówno przy emisji mowy, jak i innych dźwięków. Głośniki posiadają możliwość stopniowej regulacji mocy, poprzez przyłączenie do właściwego odczepu transformatora, dzięki czemu możliwe będzie właściwe dopasowanie poziomu ciśnienia akustycznego (stopnia nagłośnienia) w nagłaśnianym obszarze czy pomieszczeniu, odpowiednio do charakteru i warunków akustycznych panujących w nagłaśnianej strefie.

Kolumna głośnikowa ABT-LA60 to głośnik pożarowy wysokiej jakości, wyrównany liniowo. Zapewnia znacznie dalszy zasięg przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej równomierności poziomu dźwięku w nagłaśnianym obszarze. Kolumna ABT-LA60 jest źródłem dźwięku generującym płaskie czoło fali akustycznej w pionie, charakteryzuje się niezwykle wysoką kierunkowością w tej płaszczyźnie. Powyższe zapewnia, że dźwięk emitowany przez kolumnę jest kierowany precyzyjnie w obszar odsłuchu, a nie w obszary niepożądane, takie jak sufit lub podłoga. Kolumny ABT-LA są dedykowane przede wszystkim do pomieszczeń o długim czasie pogłosu oraz o niekorzystnych warunkach akustycznych dla zrozumiałości mowy. W sumie w obiekcie zaprojektowano 613 głośników o mocy 1823 W.

Zgodnie z [102], przewody i kable wraz z ich zamocowaniami, stosowane w systemach zasilania i sterowania urządzeniami służącymi ochronie przeciwpożarowej (DSO), powinny zapewniać ciągłość dostawy energii elektrycznej lub przekazu sygnału przez czas wymagany do uruchomienia i działania urządzenia. Czas zapewnienia ciągłości dostawy energii elektrycznej lub sygnału do urządzeń DSO może być ograniczony do 30 minut, o ile zespoły kablowe znajdują się w obrębie przestrzeni chronionych stałymi samoczynnymi urządzeniami gaśniczymi wodnymi.

Połączenie pomiędzy centralą SSP a centralą DSO (sygnały sterujące z SSP do DSO) będą kontrolowane przez układ kontroli centrali DSO, natomiast połączenie pomiędzy centralą DSO, a centralą SSP (sygnały informacyjne z DSO do SSP) będą kontrolowane przez układ kontroli centrali SSP. Z systemu sygnalizacji pożarowej do DSO w zależności od przebiegu zdarzeń będą przekazywane sygnały sterujące z podaniem numeru strefy, w której wystąpił pożar. Na rysunku 31 przedstawiono schemat ideowy Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego DSO Ambient System.

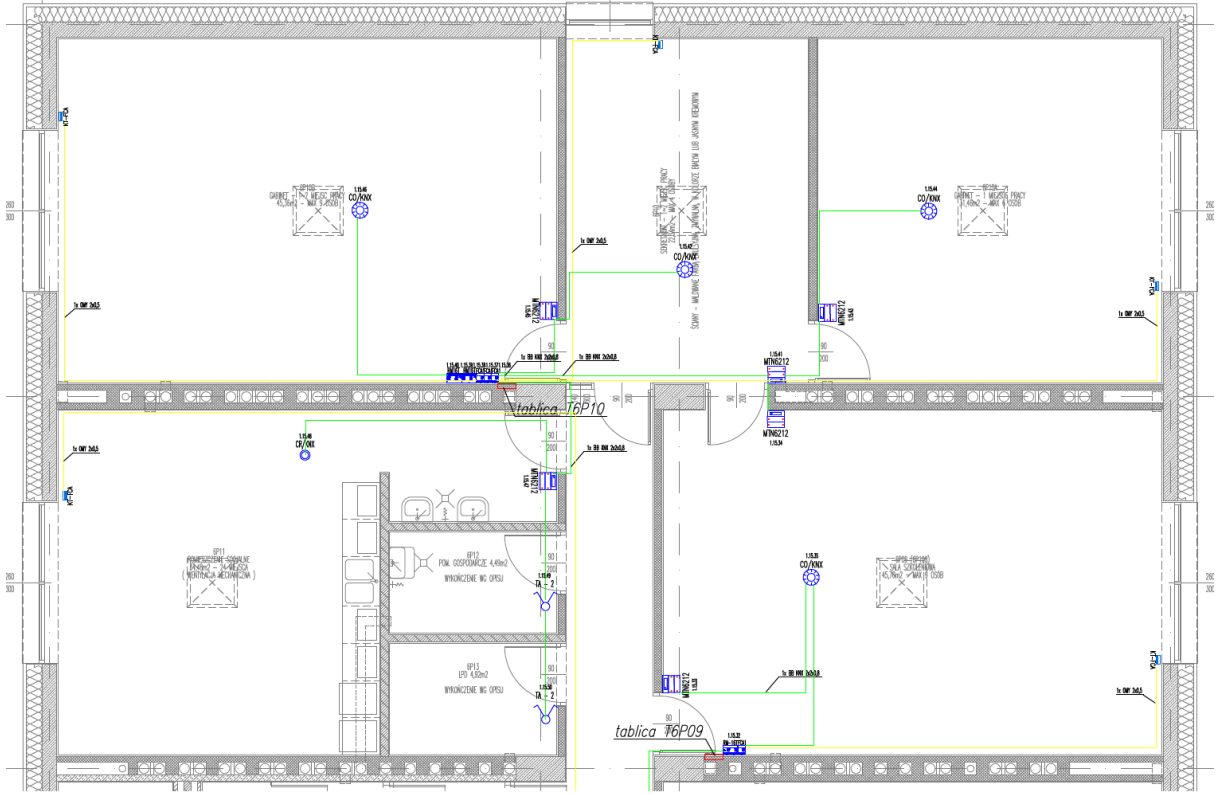


Rysunek 31. Schemat ideowy Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego DSO Ambient System

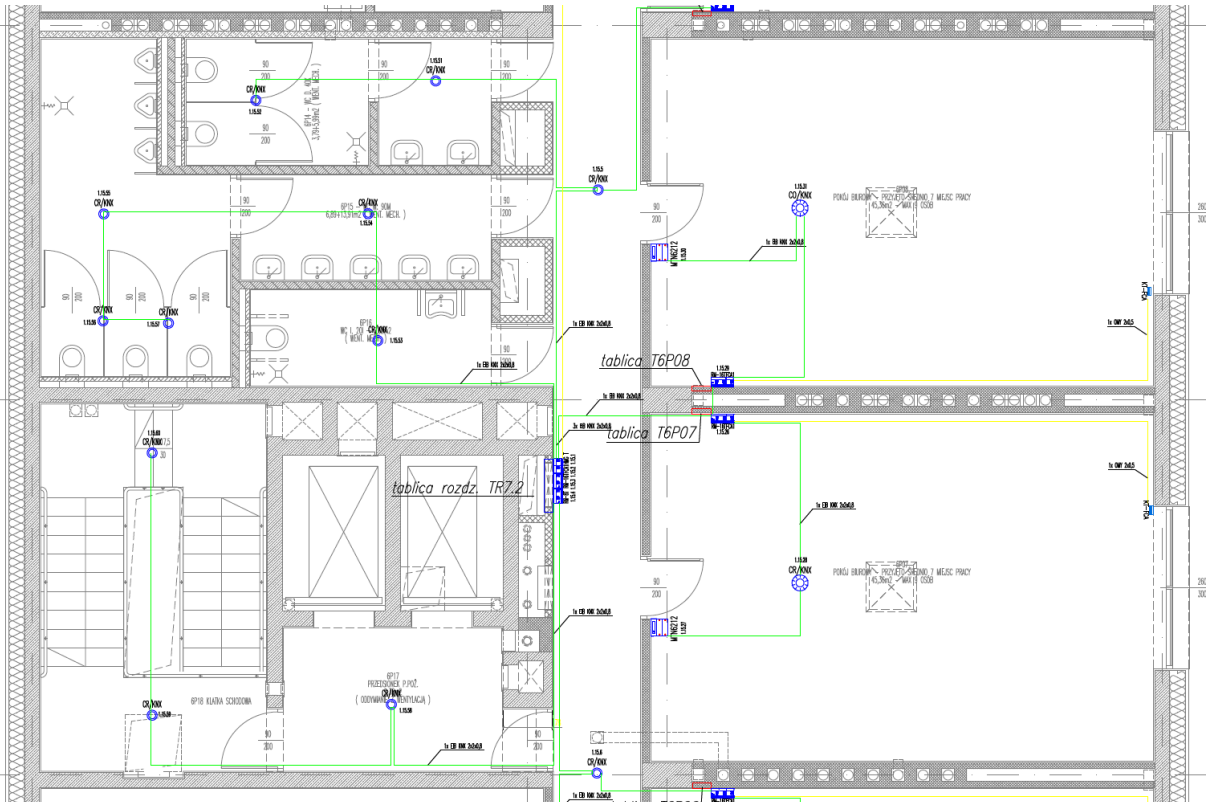
## Ad. 2. Projekt Sterowania i Automatyki Budynku KNX

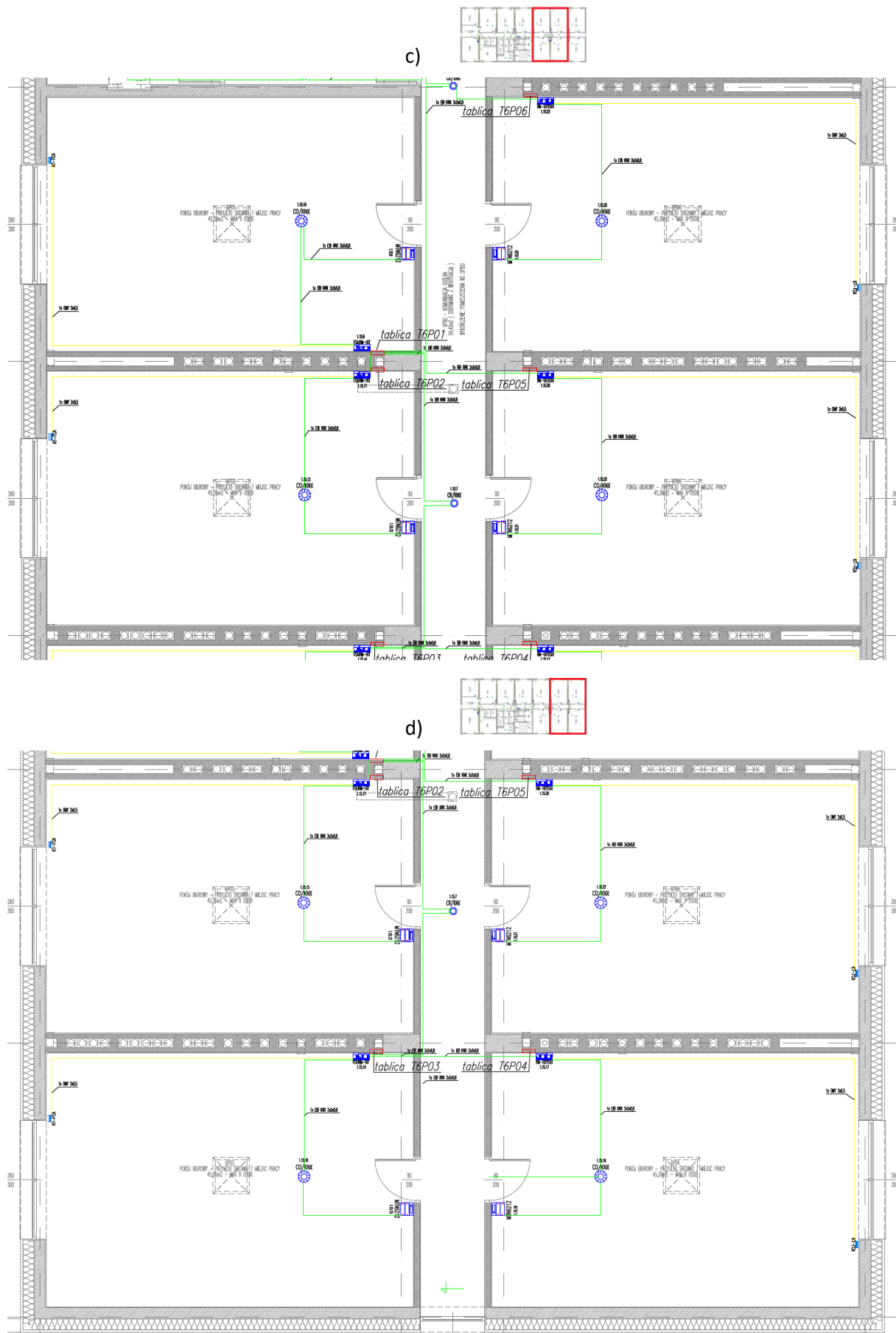
Przygotowany przeze mnie Projekt Sterownia i Automatyki Budynku KNX, został wykorzystany w projektach instalacji elektrycznych pomieszczeń wewnętrznych budynku biurowego CRON oraz jego serwerowni. Dobrałem urządzenia KNX sensory i akulatory oraz zaprojektowałem ich trasy połączeń. Na rysunku 32 przedstawiłem fragment instalacji KNX dla przykładowego 6 prawego piętra Budynku CRON.

a)



b)





Rysunek 32. Instalacja KNX dla przykładowego 6 piętra Budynku CRON a) pomieszczenia 6P09-6P13, b) pomieszczenia 6P07-6P18, c) pomieszczenia 6P00-6P06, d) pomieszczenia 6P02-6P05



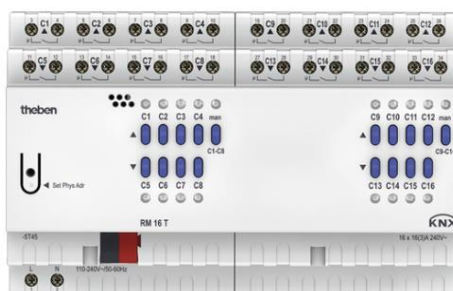
W pomieszczeniach biurowych zaprojektowałem między innymi mniejsze tablice T6P01-T6P10, które będą wyposażone w następujące akтуatory:

- zał./wył. KNX RM-16 T odpowiedzialne za uruchomienie obwodów oświetlenia w danym pomieszczeniu,

- FCA 1 który jest odpowiedzialny za sterowanie klimatyzacji w danym pomieszczeniu, do którego będzie doprowadzony sygnał z kontaktronu okna, które znajduje się w kontrolowanym pomieszczeniu. Kontaktron będzie również połączony z akтуatorem FCA 1 za pomocą przewodu OMY 2x0,5mm<sup>2</sup>.

W każdym pomieszczeniu wymagającym pomiaru temperatury jest zaprojektowany sensor wielofunkcyjny MTN 6212 odpowiedzialny za regulowanie temperatury w danym pomieszczeniu oraz umożliwiający sterowanie poszczególnymi obwodami oświetleniowymi. Dodatkowo w pomieszczeniach biurowych zaprojektowałem czujniki obecności CO/KNX, odpowiedzialne za kontrolę obecności osób, co pozwoli uruchamiać oświetlenie w zależności od wykrytego ruchu i ilości światła. Natomiast w pomieszczeniach: socjalnym, toaletach i klatkach schodowych zaprojektowałem czujniki ruchu CR/KNX, które tylko wykrywają ruch. Pomieszczenie gospodarcze i Lokalny Punkt Dystrybucyjny zostały wyposażone w sensor KNX TA-8 połączony z łącznikami zwiernymi, a który będzie sterował akтуatorem wykonawczym odpowiedzialnym za załączanie i wyłączenie oświetlenia w danym pomieszczeniu. Wszystkie sterowniki KNX będą połączone przewodem magistralnym EIB KNX 2x2x0,8mm<sup>2</sup>, służącym do zasilania innych urządzeń oraz przesyłania danych pomiędzy nimi. Napięcie na magistrali wynosi 30V (napięcia stałego DC). Elementy magistralne mogą być maksymalnie oddalone o 350 m od zasilacza, natomiast odległość pomiędzy najdalszymi elementami nie powinna być większa niż 700 m.

Sterowanie oświetleniem jest standardem, który pozwala użytkownikowi na załączanie, wyłączenie, ściemnianie i rozjaśnianie oświetlenia w każdej części budynku. Możliwe są do wykorzystania funkcje centralne pozwalają przełączać użytkownikowi wszystkie wybrane obwody za pomocą wybranego przycisku np. opuszczamy pomieszczenie lub dowolny sektor pomieszczenia to wtedy istnieje możliwość wyłączenia całego światła jednym przyciskiem. Dodatkowo można tworzyć sceny świetlne, dzięki której użytkownik ma możliwość wywołania wcześniej zapisanej sceny świetlnej. W sterowaniu oświetleniem i budowaniu scen świetlnych mogą brać udział żaluzje okienne. Na rysunku 33 został pokazany zaprojektowany akтуator przełączający 16 wyjściowy RM 16T produkcji Theben.



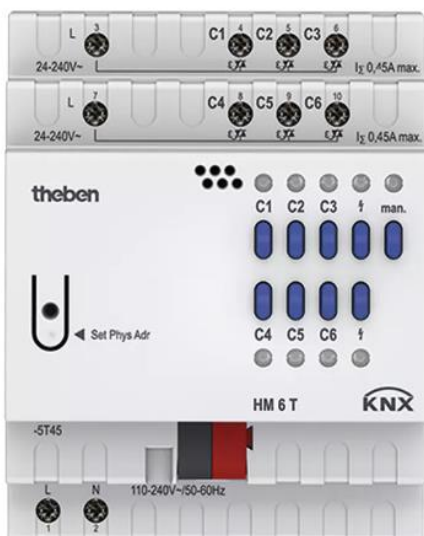
Rysunek 33. Akтуator RM16T produkcji Theben

Sensory wejść binarnych mogą być wykorzystywane do sterowania oświetleniem załącz/wyłącz, ściemnij/rozjaśnij, roletami oraz mogą pracować również jako wejścia licznikowe zliczające impulsy. Sensory do wykrywania obecności zaprojektowano jako czujniki obecności i czujniki ruchu. Umożliwiają automatyczną ciągłą kontrolę, wykrywanie obecności i dokonywanie przełączeń. Czujniki te umożliwiają również stałą kontrolę oświetlenia urządzeń inteligentnych w sposób manualny, w pełni lub pół automatyczny, co pozwala efektywnie wykorzystywać energię, np. jeżeli światło dzienne będzie stosunkowo niskie, światło sztuczne zostanie rozjaśnione i na odwrót. Na rysunku 34 został pokazany zaprojektowany sensor firmy Schneider Electric MTN 6212-0325. Przycisk jest podłączany bezpośrednio do magistrali KNX i konfigurowany przez instalatora za pośrednictwem oprogramowania ETS.



*Rysunek 34. Sensor MTN 6212-0325 produkcji Schneider Electric*

Sterowanie temperaturą odbywa się poprzez aktuatory ogrzewania. W oparciu o wartość temperatury w pomieszczeniach następuje odpowiednie ustawienie napędów zaworów ogrzewania. W przypadku ogrzewania podłogowego, napędy są zamontowane na zawory ciepła dystrybutora - rozdzielacza. Sterowanie temperaturą odbywa się poprzez motozawory, które uruchamiane są z niezależnego czujnika i regulatora temperatury. Istnieje też możliwość manualnej regulacji temperatury. W budynku CRON zostały zastosowane dwa rozwiązania ogrzewania. W pomieszczeniach biurowych wymagających klimatyzacji zostały zaprojektowane klimakonwektory z układem zasilania czterorurowym pozwalającym na ogrzewanie i klimatyzację, natomiast w pomieszczeniach sanitarnych, technicznych, komunikacyjnych wymagających ogrzewania zostało zaprojektowane ogrzewanie podłogowe. Na rysunku 35 został pokazany akuator ogrzewania podłogowego HM 6T produkcji Theben.



Rysunek 35. Aktuator ogrzewania HM 6T produkcji Theben

Na rysunku 36 został pokazany zaprojektowany aktuator klimakonwektora FCA 2 produkcji Theben. Aktuator ten umożliwia dodatkowe sterowanie zaworami ogrzewania. W budynku CRON zaplanowano wykorzystanie obu typów aktuatorów ogrzewania.



Rysunek 36. Aktuator klimakonwektora FCA 2 produkcji Theben

Sterowanie Wentylacją odbywa się poprzez aktulatory wykonawcze i sensory sprawdzające jakość powietrza poprzez pomiar parametrów takich jak stężenie koncentracja CO<sub>2</sub>, temperatura oraz wilgotności względna powietrza. Na rysunku 37 został pokazany wybrany w projekcie sensor jakości powietrza AMUN 716 S produkcji Theben.



*Rysunek 37. Czujnik CO2 AMUN 716 S produkcji Theben*

Do sterowania i pomiarów parametrów zewnętrznych przydatne są sensory zewnętrzne. Należą do nich czujnik temperatury i jasności oraz stacje pogodowe. Na rysunku 38 została pokazana wybrana zewnętrzna Stacja pogodowa Meteodata 140 S GPS produkcji Theben. Wielofunkcyjność stacji pogodowej umożliwia pomiary natężenia oświetlenia, temperatury, posiada czujniki wiatru i deszczu. Możliwość ustalenia różnych progów dla prędkości wiatru i natężenia oświetlenia. Stacja pogodowa posiada zintegrowany odbiornik GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, QZSS), z sygnałem czasu, automatycznie oblicza wysokość i azymut, a do wyświetlania danych pogodowych wykorzystuje wyświetlacz VARIA 826 KNX.



*Rysunek 38. Zewnętrzna Stacja pogodowa Meteodata 140 S GPS produkcji Theben*

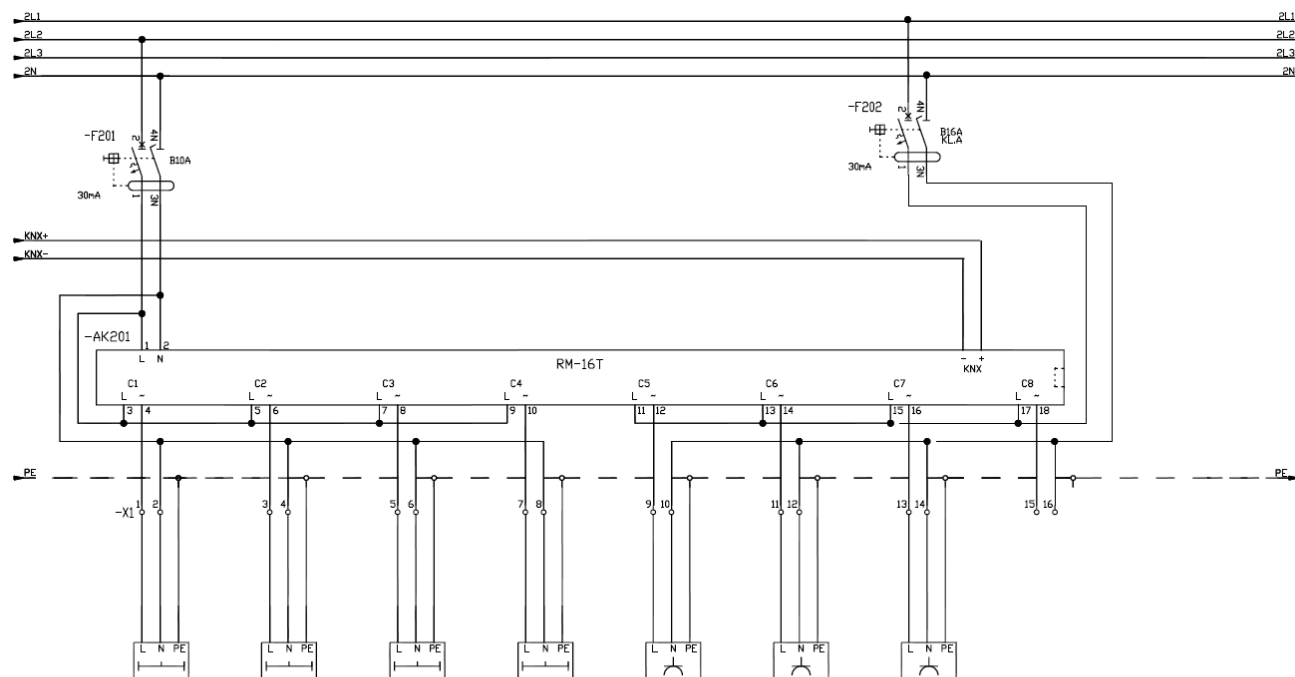
Do Kontroli czasu wykorzystano serwery KNX. Jest to idealne rozwiązanie gdyż konieczny jest dokładny czas przełączeń w zaprojektowanym budynku biurowym, w których wymagane są kompleksowe funkcje czasu. Do kontroli czasu, dodatkowych funkcji logicznych, zdalnego zarządzania i wizualizacji stanów wybrałem serwer produkcji Comfortclick. Wszystkie serwery ComfortClick są wyposażone w system bOS. Jest to oprogramowanie do integracji urządzeń w nowoczesnym biurze i domu. Dzięki bardzo rozbudowanej bibliotece sterowników, oprogramowanie umożliwia integrację ogromnej ilości urządzeń i połączenia ich w jeden spójny organizm. Serwery zostały zbudowane w różnych konfiguracjach sprzętowych, aby lepiej dopasować urządzenia do instalacji w której mają się znaleźć. Niezależnie od rodzaju serwera system bOS daje takie same możliwości programowe. Na rysunku 39 został pokazany serwer SLEDGEHAMMER CC-SH-1 produkcji ComfortClick. Jest on wyposażony w procesor Single Socket LGA1150, Intel Xeon E3-1200V3. Posiada 16GB DDR3 PC1600 CL11 ECC pamięci RAM oraz 2 dyski: SSD – Samsung SM863a SSD 2.5" 240GB SATA 6Gb / s 3.6 DWPD i HDD – WD RED WD7500BFCX 2.5" SATA 6Gb / s 7500B 16MB 24x7



Rysunek 39. Serwer SLEDGEHAMMER CC-SH-1 produkcji ComfortClick

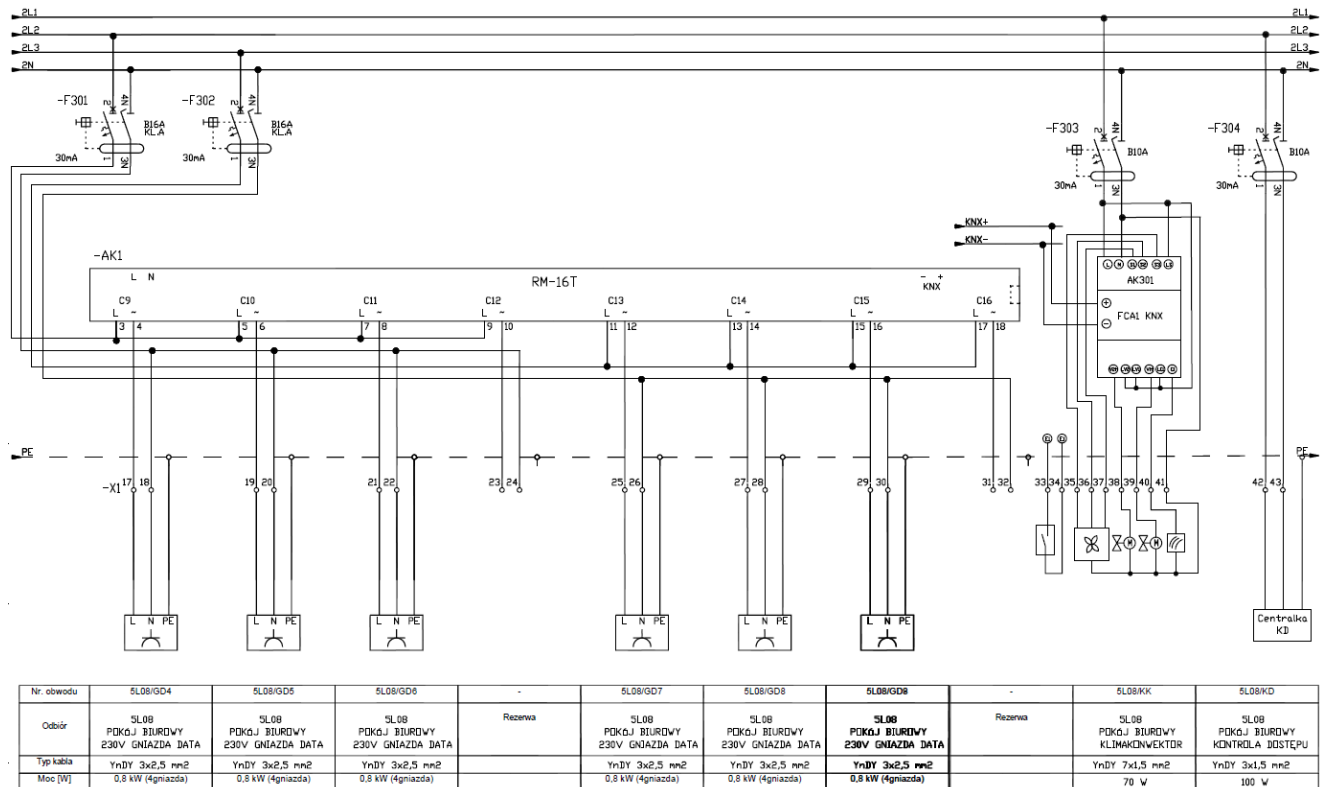
Na rysunku 40 został przedstawiony przykładowy schemat ideowy tablicy rozdzielczej pomieszczenia biurowego T5L08. Został tutaj pokazany dla pomieszczenia 5L08 układ zabezpieczeń elektrycznych obwodów oświetlenia (F201, F202) i sterowania obwodami oświetlenia ogólnego pokoju biurowego poprzez aktuator KNX RM-16T (kanały C1-C8) oraz układ zabezpieczeń elektrycznych obwodów zasilania (F301, F302) i sterowania gniazdami komputerowymi typu Data poprzez aktuator KNX RM-16T (kanały C9-C16). Dodatkowo pokazano układ zabezpieczeń elektrycznych zasilania (F303) i sterowanie klimakonwektorem przez aktuator KNX FCA. W rozdzielni T3P07 jest układ zabezpieczeń elektrycznych zasilania (F304) Centraliki Kontroli Dostępu dwustronnego przejścia dla tego pomieszczenia.

a)



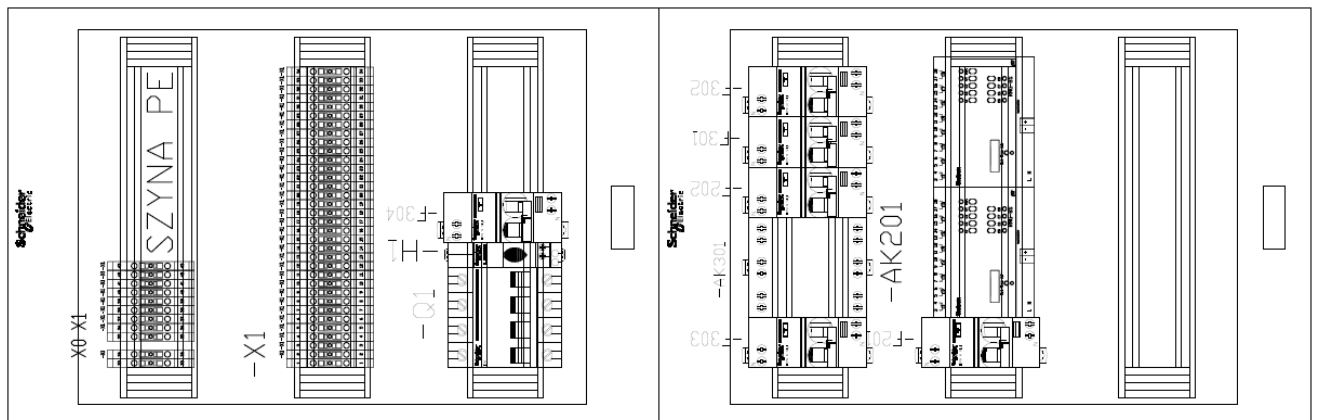
Nr. obwodu	5L08/1	5L08/2	5L08/3	5L08/4	5L08/G01	5L08/G02	5L08/G03	-
Odbiór	5L08 POKÓJ BIUROWY OŚWIETLENIE OGÓLNE	5L08 POKÓJ BIUROWY OŚWIETLENIE OGÓLNE	5L08 POKÓJ BIUROWY OŚWIETLENIE OGÓLNE	5L08 POKÓJ BIUROWY OŚWIETLENIE OGÓLNE	5L08 POKÓJ BIUROWY 230V GNIAZDA DATA	5L08 POKÓJ BIUROWY 230V GNIAZDA DATA	5L08 POKÓJ BIUROWY 230V GNIAZDA DATA	Rezerwa
Typ kabla	YDY 3x1,5 mm <sup>2</sup>	YDY 3x1,5 mm <sup>2</sup>	YDY 3x1,5 mm <sup>2</sup>	YDY 3x1,5 mm <sup>2</sup>	YnDY 3x2,5 mm <sup>2</sup>	YnDY 3x2,5 mm <sup>2</sup>	YnDY 3x2,5 mm <sup>2</sup>	
Moc [W]	2x45W=90W	2x45W=90W	2x45W=90W	2x45W=90W	0,8 kW (4gniazda)	0,8 kW (4gniazda)	0,8 kW (4gniazda)	

b)



Rysunek 40. Przykładowy schemat ideowy instalacji elektrycznej i automatyki pomieszczenia biurowego 5L08 a) oświetlenie, b) gniazda zasilające Data, klimakonwektor i kontrola dostępu

Na rysunku 41 został pokazany schemat montażowy podwójnej tablicy rozdzielczej T5L08 opartej na elementach Schneider Electric, w skład której wchodzi układ zabezpieczeń (Q, F), złączek przewodów (X) i aktorów wykonawczych automatyki budynkowej KNX (AK).



Rysunek 41. Przykładowy rysunek montażowy rozdzielnicy w przykładowym pomieszczeniu biurowym 5L08

Na rysunku 42 przedstawiono przykładowe rozmieszczenie dla piętra biurowego (6L): gniazd zasilających 230V zwykłych oraz komputerowych typu Data, opraw LED standardowego oświetlenia sufitowego kasetonowego i punktowego, opraw Led oświetlenia awaryjnego (AW) i ewakuacyjnego (EW), rozdzielni elektrycznych.



Rysunek 42. Przykładowe rozmieszczenie gniazd i oświetlenia standardowego piętra biurowego

Na rysunku 43 został przedstawiony zrzut z ekranu programu ETS na którym pokazana jest struktura adresacji grupowej i numeracja urządzeń KNX. Natomiast w tabeli 8 przedstawiono wykaz dla przykładowego pomieszczenia.

ETS™ - CRON

Edycja Obszar roboczy Uruchomienie Diagnostyka Aplikacje Okno

Zamknij projekt Cołki Wykonaj pomiar Raporty Przestrzeń robocza Katalogi Diagnostyka

Urządzenia

Ustawienia

Ustawienia	Adres	Pokój	Opis	Program aplikacyjny *	Adi Prg Par Grp Ctg	Producent	Numer zam	Produkt
1.15.10 PIĘTRO 6P Line Coupler 5	115.38	6P09	POMIESZCZENIE BIUROWE	Coupler11	- - - -	Theben AG	927080	Line Coupl
1.15.14 6P01 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.30	6P07	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.24 6P02 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.26	6P08	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.34 6P03 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.6	6P01	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.44 6P04 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.10	6P02	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.54 6P05 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.18	6P04	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.64 6P06 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.1	6P00	POMIESZCZENIE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.74 6P07 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.22	6P05	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.84 6P08 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.34	6P08	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.94 6P09 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.42	6P10	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.104 6P10 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.44	6P10	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.114 6P11 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.43	6P10A	POMIESZCZENIE BIUROWE	Fan Coil actuator with controller V1.1	- - - -	Theben AG	4920200	Fan Coil Ai
1.15.124 6P12 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.39	6P09	POMIESZCZENIE BIUROWE	FKZ RM 16 T	- - - -	Theben AG	4942025	RM 16 T (I)
1.15.134 6P13 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.45	6P10A	POMIESZCZENIE BIUROWE	FKZ RM 16 T	- - - -	Theben AG	4942025	RM 16 T (I)
1.15.144 6P14 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.19	6P14	POMIESZCZENIE BIUROWE	FKZ RM 16 T	- - - -	Theben AG	4942025	RM 16 T (I)
1.15.154 6P15 POMIESZCZENIE BIUROWE Fan Coil Actuator	115.13	6P14	POMIESZCZENIE BIUROWE	FKZ RM 16 T	- - - -	Theben AG	4942025	RM 16 T (I)

Adresy grupowe

Adresy grupowe	Grupa główna	Nazwa	Opis	Przepuszczaj przez sprzęt biurowe
0 PIWNICA + OTOCZENIE	0	PIWNICA + OTOCZENIE		Nie
1 PARTER	1	PARTER		Nie
2 PIĘTRO 1L	2	PIĘTRO 1L		Nie
3 PIĘTRO 1P	3	PIĘTRO 1P		Nie
4 PIĘTRO 2L	4	PIĘTRO 2L		Nie
5 PIĘTRO 2P	5	PIĘTRO 2P		Nie
6 PIĘTRO 3L	6	PIĘTRO 3L		Nie
7 PIĘTRO 3P	7	PIĘTRO 3P		Nie
8 PIĘTRO 4L	8	PIĘTRO 4L		Nie
9 PIĘTRO 4P	9	PIĘTRO 4P		Nie
10 PIĘTRO 5L	10	PIĘTRO 5L		Nie
11 PIĘTRO 5P	11	PIĘTRO 5P		Nie
12 PIĘTRO 6 + DACH L	12	PIĘTRO 6 + DACH L		Nie
13 PIĘTRO 6 + DACH P	13	PIĘTRO 6 + DACH P		Nie
14 FUNKCJE CENTRALNE	14	FUNKCJE CENTRALNE		Nie

Rysunek 43. Program ETS Struktura adresacji grupowej i numeracja urządzeń

*Tabela 8. Przykładowy wykaz urządzeń KNX dla wybranego pomieszczenia znajdującego się na 6 piętrze zaprojektowanego budynku biurowego*

Lp.	Pomieszczenie	Urządzenie	Adres grupowy
1	6P00	HMG – T	1.15.01
2	6P00	FCA 1	1.15.02
3	6P00	RM-16T	1.15.03
4	6P00	RM-8T	1.15.04
5	6P00	Prema P360	1.15.05
6	6P00	Prema P360	1.15.06
7	6P00	Prema P360	1.15.07

### **Ad. 3. Projekt Systemu Kontroli Dostępu**

Przedmiotem projektu było wykonanie systemu kontroli dostępu (KD) w budynku biurowym CRON w Katowicach. System składa się z 434 przejść jedno lub dwustronnie kontrolowanych. Każdy kontroler podłączony jest do czytnika z klawiaturą, przycisku wyjścia, elektrozaczełu i kontaktronu. Zarządzanie systemem odbywa się poprzez działający w budynku K-133 od 2014 roku serwer KSROGER1. Na potrzeby nowego systemu KD do oprogramowania zarządzającego PRMASTER dodano kolejne podsystemy CRON. Zadaniem rozbudowanego serwera jest integracja i zarządzanie kontrolą dostępu z jednego miejsca, co znacznie ułatwia i przyspiesza administrowanie systemem. Połączenia pomiędzy centralami KD, a serwerem KSROGER1 realizowane są poprzez wydzieloną sieć LAN. Dostęp do bazy danych, dokonywanie zmian, weryfikację pracy systemu, mają wyłącznie administratorzy systemu KD.

Celem projektu było zapewnienie ochrony przed nieautoryzowanym dostępem fizycznym, uszkodzeniami lub zakłóceniami w bezpieczeństwie informacji oraz zapobieganie kradzieży informacji i środków przetwarzania informacji w budynku biurowym.

Organizacja stref bezpieczeństwa została zaprojektowana zgodnie z normą ISO 27000 oraz ISO 9000 „Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia” wyspecyfikowane w załączniku Z00 „Definicje i pojęcia” zwarte w dokumencie „Opis systemu zarządzania jakością”. W ramach ochrony fizycznej systemu bezpieczeństwa informacji wydzielono strefy bezpieczeństwa przedstawione w tabeli 9.



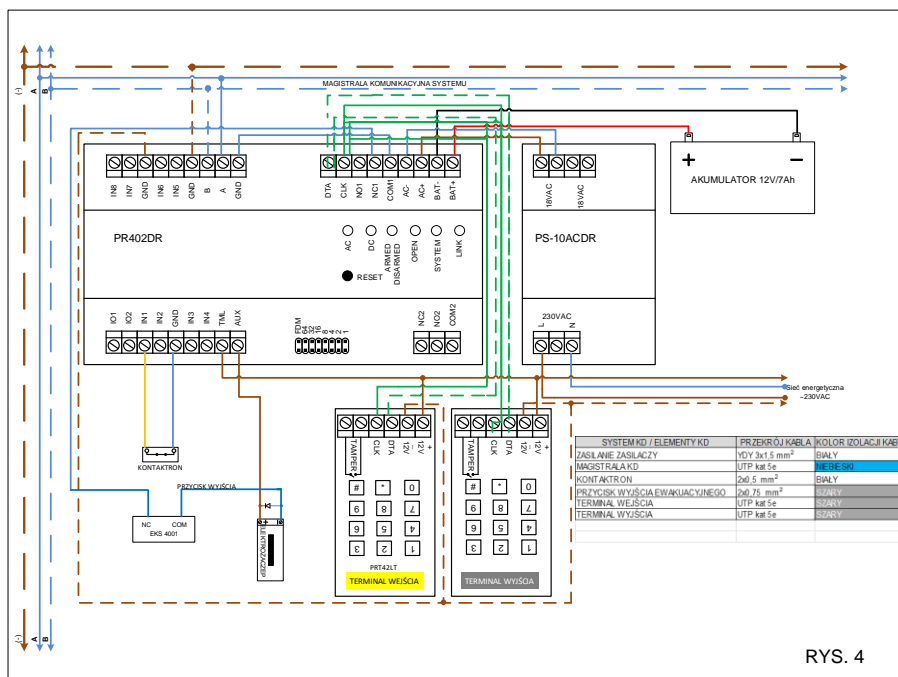
Tabela 9. Strefy bezpieczeństwa

1	Strefa publiczna nienadzorowana	Obszar niekontrolowany: parkingi przed budynkiem, otoczenie budynku na terenie oddziału, ogólnodostępne dla osób z zewnątrz.
2	Strefa publiczna nadzorowana	Pomieszczenia w budynku dostępne dla osób z zewnątrz i gości firmy. Strefa jest pod nadzorem ochrony lub pracowników administracyjnych. W tej strefie nie są przetwarzane informacje chronione i poufne.
3	Strefa administracyjna dostępna	Przeznaczona tylko dla pracowników firmy. Goście mogą przebywać w tej strefie jedynie pod bezpośrednim nadzorem wyznaczonego pracownika.
4	Strefa administracyjna produkcyjna	Przeznaczona wyłącznie dla pracowników firmy lub współpracowników (podwykonawców) realizujących swoje zadania na terenie spółki. Osoby z zewnątrz nie mają wstępu do tej strefy.
5	Strefa chroniona	Wydzielone pomieszczenie chronione, czytelnie oznaczone, podlegające kontroli wejścia, wyjścia wspomaganą przez elektroniczne systemy identyfikacji i blokady dostępu. Strefę chronioną w szczególności może stanowić certyfikowane urządzenie do przechowywania nośników informacji np. sejf lub kasa pancerna.

Ze względu na bezpieczeństwo i stan urządzeń infrastruktury technicznej każda ze stref musi mieć możliwość dopuszczenia do niej osoby z zewnątrz pod nadzorem pracownika spółki. Praktycznie w każdym pomieszczeniu znajdują się urządzenia, które w przyszłości mogą wymagać przeglądów lub serwisu podczas awarii, co będzie wymagało obecności osób bez praw dostępu. Pomieszczenia, w których znajdują się lokalne punkty dystrybucyjne nie są wyposażone w samozamykacze. Dlatego należy zwracać szczególną uwagę podczas opuszczania strefy i dopilnować prawidłowego zamknięcia drzwi.

System kontroli dostępu został skonfigurowany na serwerze KSROGER1. KD zarządzana jest za pomocą programu PR master w wersji 4.5.14. Prace wdrożeniowe rozpoczęto od utworzenia nowych podsystemów kontrolujących strefy dostępu. Każda z central posiada własny interfejs zarządzający, w którym użytkownik wprowadza podstawowe dane takie jak nowe IP urządzenia i hasło do interfejsu.

Podsystemy należące do projektowanego budynku w Katowicach zostały utworzone w oparciu o najnowsze centrale CPR 32NET z zintegrowanym modułem komunikacyjnym. W kolejnym etapie rozpoczęto dodawanie poszczególnych kontrolerów, do których podłączono, czytniki, kontaktrony, przyciski wyjścia zgodnie ze schematami przedstawionymi na rysunku 44.



Rysunek 44. Schemat połączeń kontrola wejścia i wyjścia z ewakuacją realizowaną przez urządzenie EKS-4001

Ze względu na bezpieczeństwo i fakt posiadania systemu PPOŻ. Zasilanie elektrozaczepek zostało połączone z elementem wykonawczym EKS4001, który w przypadku pożaru lub wyzwolenia przycisku ROP, przerywa obwód zasilający zamek, umożliwiając bezpieczną ewakuację. Po zakończeniu podstawowych połączeń rozpoczęto proces nadawania numerów ID urządzeń nanosząc ich pozycję na mapę obiektu. Od tego etapu rozpoczął się proces programowania kontrolerów i konfiguracji oprogramowania na serwerze KSROGER1.

Do przygotowania projektu wykorzystano dokumentów normatywnych i prawnych zestawionych w [103, 121-129].

#### Ad. 4. Projekt Monitoringu Wizyjnego

#### Ad. 5. Projekt Sieci Strukturalnej

W pracy zaniechano szczegółowego opisu kwestii technicznych instalacji Systemu Monitoringu Wizyjnego i Sieci Strukturalnej, gdyż są to informacje poufne KAMSOFT S.A. objęte zakresem wdrożonego i utrzymywanego w spółce Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem Informacji certyfikowanego na zgodność z normą ISO/IEC 27001. Na podstawie art. 11 ust. 2 ustawy o zwalczaniu nieuczciwej konkurencji dokumenty te stanowią tajemnicę przedsiębiorstwa KAMSOFT S.A. i nie mogą być udostępniane.

#### Ad. 6. Projekty instalacji OZE

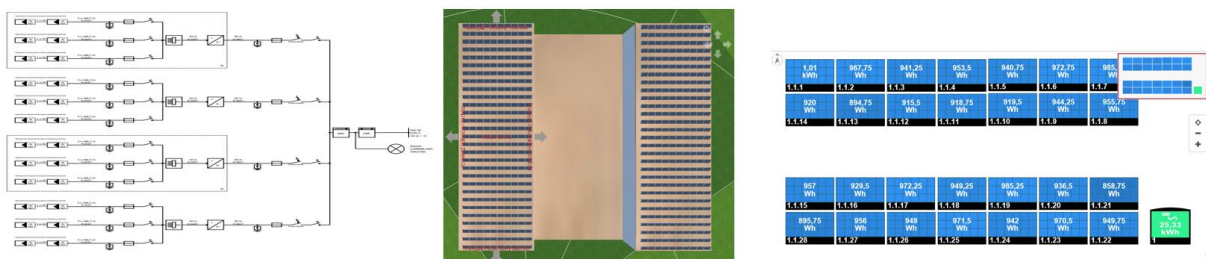
Dla budynku CRON przygotowano rozwiązania ekologiczne i OZE obejmujące:

- Panele fotowoltaiczne na dachu ok. 174kWp,
- Wiaty z panelami fotowoltaicznymi i funkcją zbierania deszczówki do zbiorników (124-146 stan.),

- Stacje ładowania samochodów elektrycznych (72 stan.),
- Zbiorniki na deszczówkę 250-500m<sup>3</sup> woda zbierana z dachu budynku i wiat,
- Pompy Ciepła i odzysk energii z serwerowni Data Center.

Wszystkie zastosowane rozwiązania powodują oszczędności dające dodatkowy efekt ekologiczny w postaci zmniejszonej emisji gazów cieplarnianych do atmosfery w postaci CO<sub>2</sub>, oraz zmniejszenie zużycia wody.

Dla budynku CRON przeprowadzono analizy różnych instalacji fotowoltaicznych. Wzięto pod uwagę montaż instalacji fotowoltaicznych na dachu budynku, jego elewacji południowej oraz montaż instalacji fotowoltaicznych na parkingu zewnętrznym w terenie na Carport'ach. We wszystkich wariantach zastosowano rozwiązania firmy SolarEdge z optymalizatorami pozwalającymi na bezpieczne wyłączenie pracy instalacji także po stronie DC generatora fotowoltaicznego przed inwerterem oraz panelami fotowoltaicznymi monochromatycznymi firmy EXE Solar model A-HCUT330 o mocy 330W (rozwiązanie optymalne cenowo w stosunku do mocy na panel w momencie przygotowywania analizy). Dzięki wybraniu rozwiązania z optymalizatorami możliwy był monitoring instalacji z dokładnością do pojedynczego panela fotowoltaicznego (rys. 45).



Rysunek 45. Rozwiązania OZE Fotowoltaiki Budynku CRON Centrum Rozwoju Nauki

Pierwszym wariantem analizy było rozmieszczenie paneli fotowoltaicznych na dachu budynku. Uwzględniono odległości od kominów wentylacyjnych, a co za tym idzie powstałe od nich możliwe zacienienie obniżające wydajność instalacji. Dodatkowo zostało uwzględnione zacienienie pomiędzy panelami.

Na rysunku 46 przedstawiono pierwszy wariant układu instalacji fotowoltaicznej na dwóch połaciach dachu z 4 zestawami po 4x4 szt. paneli i 9 zestawami po 4x5 szt. paneli o mocy 161,04 kWp.



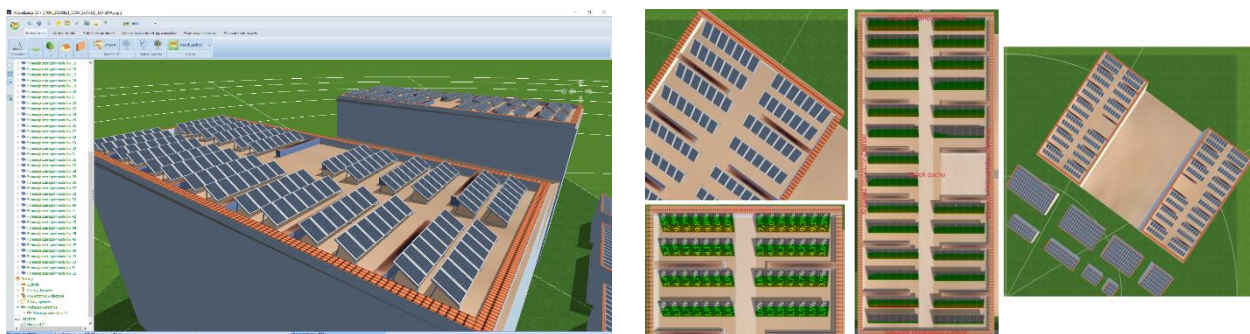
Rysunek 46. Budynek CRON Układ Paneli 2x(4x4x4+9x4x5) Moc 161,04 kWp

Na rysunku 47 przedstawiono drugi wariant układu instalacji fotowoltaicznej na dwóch połaciach dachu z 13 zestawami po 2x7 szt. paneli o mocy 120,12 kWp.



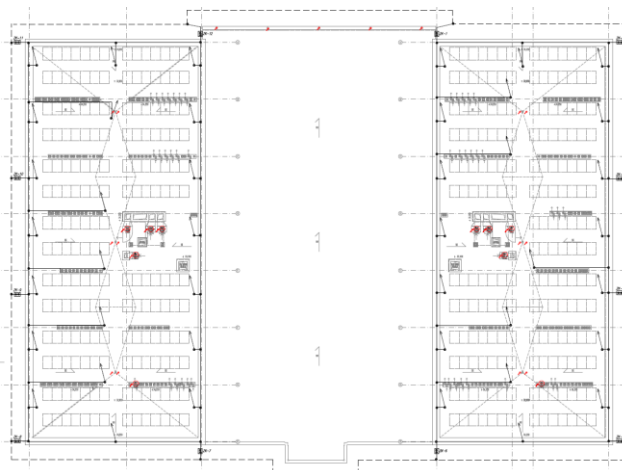
Rysunek 47. Budynek CRON Układ Paneli 2x(13x2x7) Moc 120,12 kWp

Na rysunku 48 przedstawiono trzeci wariant układu instalacji fotowoltaicznej na dwóch połaciach dachu z 26 zestawami po 7 szt. paneli o mocy 120,12 kWp.



Rysunek 48. Budynek CRON Układ Paneli 2x(7x26) Moc 120,12 kWp

Jako rozwiązanie optymalne wybrano wariant trzeci. Decydującym parametrem o wyborze tego wariantu była największa obliczona wartość wyprodukowanej energii elektrycznej oraz łatwy dostęp do elementów instalacji. Na rysunku 49 przedstawiono projekt układu instalacji paneli fotowoltaicznych.



Rysunek 49. Projekt wykonawczy wybranego układu paneli fotowoltaicznych

W ramach projektu wdrożeniowego przygotowałem również projekt i wdrożenie instalacji OZE dla budynku biurowego K-133.

## **6 Wdrożenie systemu sterowania w budynku biurowym wyposażonym w Centrum Przetwarzania Danych**

### **6.1 Projekt serwerowni i opis instalacji**

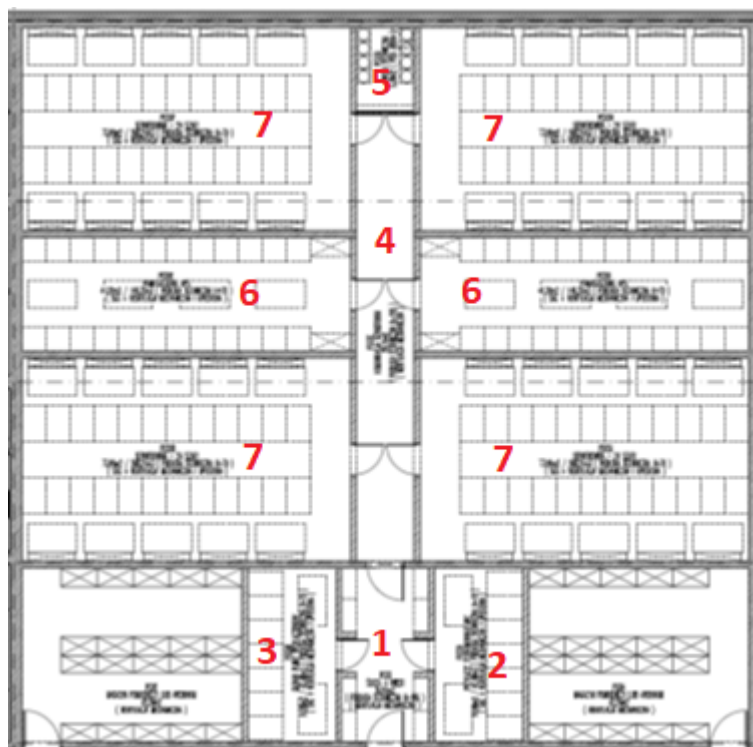
Po decyzji o wstrzymaniu budowy nowego budynku CRON przygotowano projekt, a następnie wdrożono go do realizacji obejmujący budowę serwerowni w istniejącym budynku K-133 firmy KAMSOF S.A. Pod koniec 2021 r. opracowałem dla niej system zbierania danych. Do opracowania projektu wykorzystałem wiedzę, którą pozyskałem z analizy sterowania temperaturą ogrzewania i klimatyzacji dla Budynku GLON. Serwerownie S0 uruchomiono w budynku KS-133 KAMSOF S.A. w Katowicach w 2022 r. i od tego momentu rozpocząłem pozyskiwanie wszystkich rejestrowanych parametrów. Rozpocząłem również ich analizę oraz ich interpretację.

Serwerownia S0 obsługuje pracę KAMSOF S.A. i jej klientów. Wszelkie zmiany parametrów pracy serwerowni muszą odbywać się z zachowaniem jej bezpiecznej pracy i po uzyskaniu zgód Zarządu KAMSOF S.A. oraz Sekcji IT. Oprócz systemu zbierania danych w raportowanym okresie zaprojektowałem całą infrastrukturę serwerowni m.in. systemy regulacji temperatury i wilgotności.

Z punktu widzenia realizacji doktoratu wdrożeniowego szczególnym pomieszczeniem jest serwerownia. W projektowanym budynku CRON powstało specjalne pomieszczenie o powierzchni 465 m<sup>2</sup> wykorzystywane jako serwerownia, czyli Centrum Przetwarzania Danych (CPD). Jest ona zlokalizowana na poziomie przyziemia w środkowej części budynku. W serwerowni została zaprojektowana podłoga techniczna o wysokości 70 cm, w której umieszczone są kanały klimatyzacji doprowadzające kratami nawiewnymi chłód do korytarzy zimnych.

Centrum Przetwarzania Danych składa się z następujących pomieszczeń (rys. 50):

1. Śluza serwerowni,
2. Przyłącze telekomunikacyjne,
3. Główny Punkt Dystrybucyjny,
4. Komunikacja serwerowni,
5. Wnęka techniczna,
6. Pomieszczenia UPS x 2 szt.,
7. Serwerownia x 4 szt. (po 24 szafy 19”).



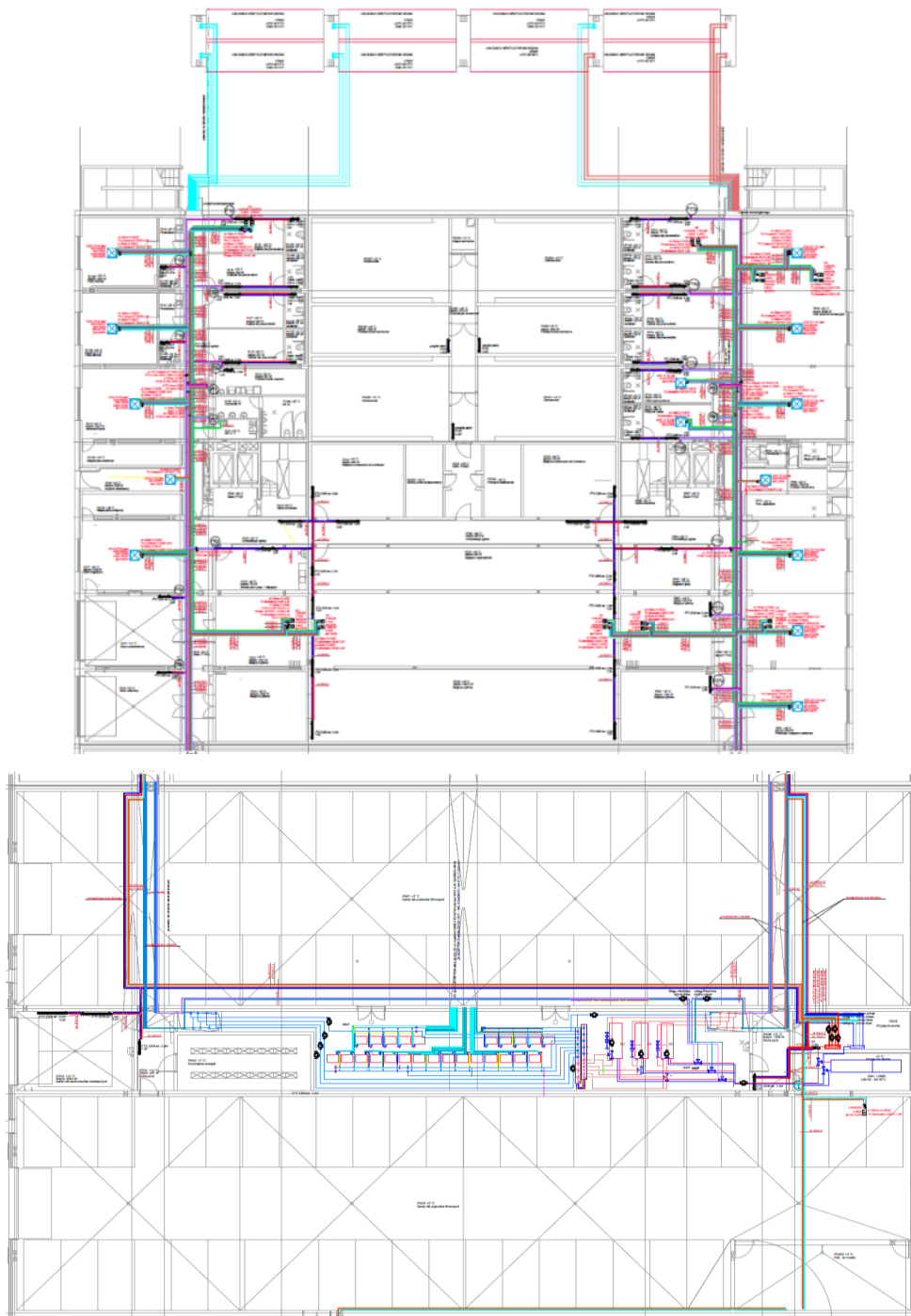
Rysunek 50. Widok przyziemia – rozkład pomieszczeń serwerowni

Serwerownia (CPD) jest wyposażona w następujące instalacje:

- Stałe Urządzenie Gaśnicze Gazowe SUG,
- System Sygnalizacji Pożaru SSP,
- Dźwiękowy System Ostrzegawczy DSO,
- Instalacja Elektryczna zasilania i oświetlenia,
- Instalacja Wodociągowo-Kanalizacyjna IWiK,
- Instalacja wentylacji mechanicznej WM i upustowej,
- Instalacja Chłodnicza Klimatyzacji.

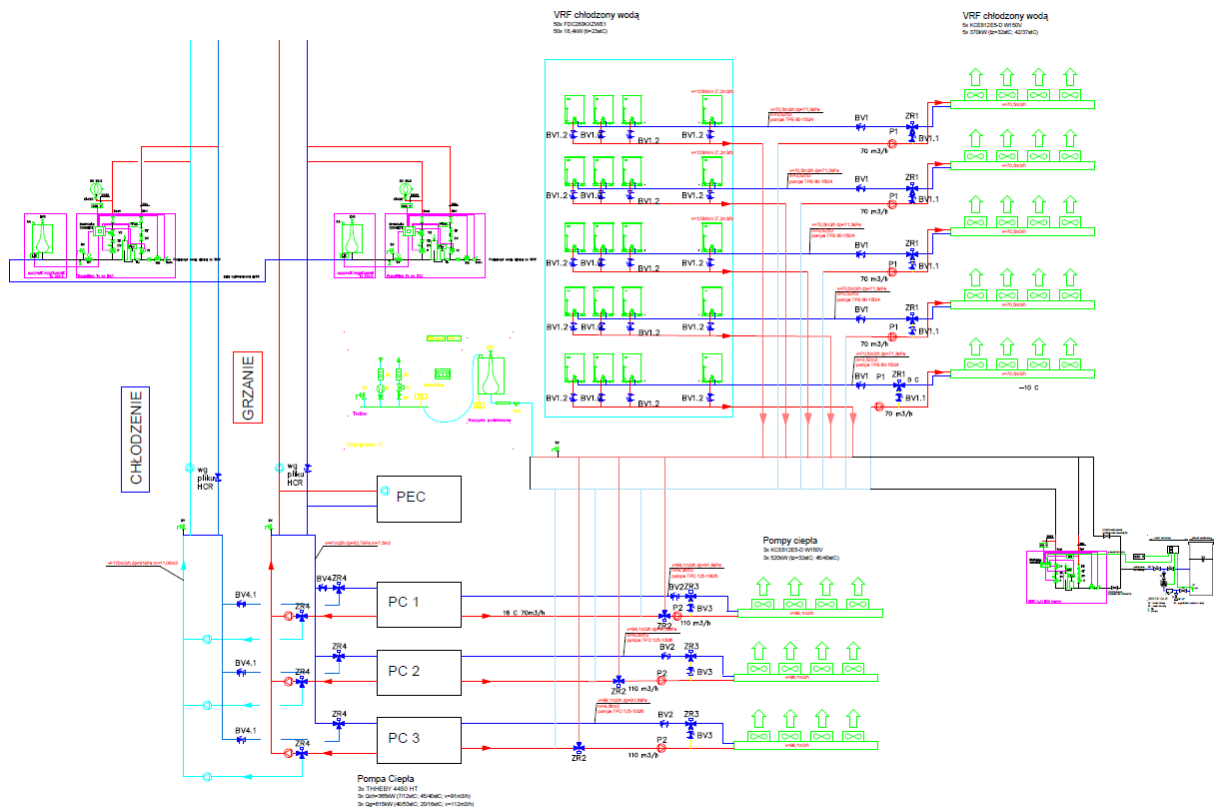
Mój udział w projektowaniu obiektu CPD głównie polegał na opracowaniu założeń koncepcji i rozwiązań projektowych oraz komunikatywnym przekazywaniu informacji o potrzebach i strukturze organizacyjnej firmy KAMSOF S.A. Wszystkie projekty Budowlane i Wykonawcze instalacji były także przeze mnie zatwierdzane z ramienia Inwestora.

Ważnym, a z punktu widzenia tematu mojego doktoratu wdrożeniowego, najistotniejszym elementem prawidłowej pracy serwerowni jest zapewnienie odpowiednich warunków środowiskowych oraz temperatury pracy urządzeń w niej zamontowanych. Do tego będzie służyć zaprojektowana przeze mnie instalacja chłodnicza – klimatyzacja. Składa się ona z pięciu chłodziw wentylatorowych wodnych o mocy 370 kW (kolor błękitny – rys. 51). Instalacja klimatyzacji pozostałej części budynku składa się z 3 chłodziw wentylatorowych wodnych o mocy 520kW (kolor ceglasty). Chłodziwa wentylatorowe wodne są połączone z Pompami Ciepła znajdującymi się w wymiennikowni chłodu i ciepła, a następnie z klimakonwektorami kanałowymi.



*Rysunek 51. Instalacja Chłodu-Klimatyzacji*

Na rysunku 52 został umieszczony schemat węzła chłodniczego i ciepłego pracującego z odyskiem ciepła do całego budynku CRON. W prawej górnej części umieszczono 5 urządzeń typu VRF chłodzonych wodą o mocy 370 kW pracujących na rzecz Serwerowni. Natomiast na dole umieszczone są 3 Pompy Ciepła o mocy 520 kW ( $3 \times Q_{ch} = 365 \text{ kW}$   $3 \times Q_g = 615 \text{ kW}$ ) pracujących na rzecz pozostałej części budynku biurowego CRON.



Rysunek 52. Schemat węzła chłodniczego i ciepłego całego budynku CRON

## 6.2 Koncepcja i wdrożenie projektu serwerowni

### 6.2.1 Opis serwerowni

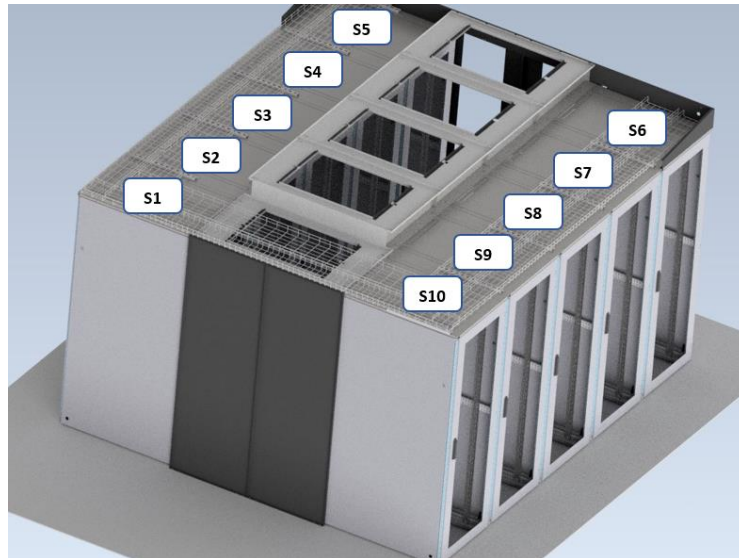
Serwerownia (Data Center), zlokalizowana jest w istniejącym Centrum Przetwarzania Danych w budynku biurowym w Katowicach (KS-133). Jego powierzchnia wynosi 110 m<sup>2</sup>. Serwerownię wyposażono w następujące instalacje:

- System kontroli dostępu,
- Stałe urządzenie gaśnicze gazowe,
- Nawilżacze powietrza,
- Klimatyzację,
- Podłogę techniczną,
- DataBox.

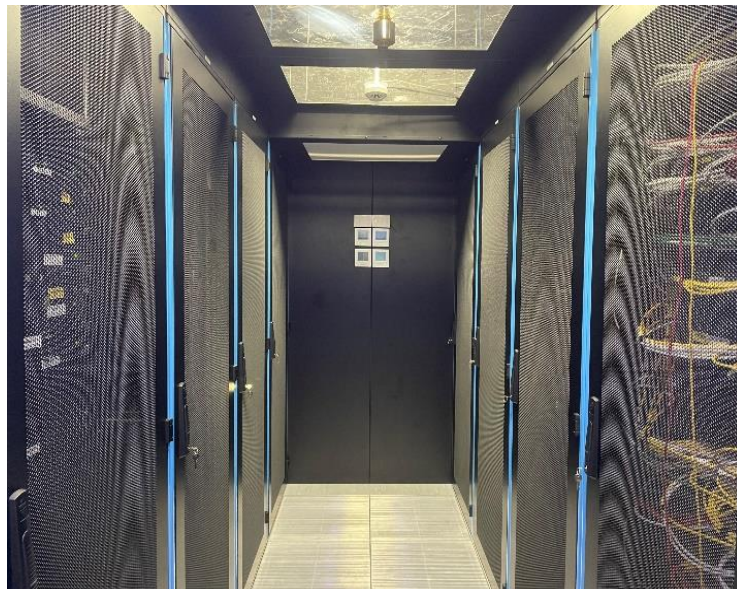
W środku serwerowni znajduje się Data Box, który zawiera 10 standardowych 19-calowych szaf rack 19", o numerach S1 do S10, każda z nich zajmuje przestrzeń 800x1200 mm i wysokość 47U, jak pokazano na rysunku 53. Do utrzymania stałej, ustawionej temperatury służą cztery klimatyzatory kanałowe Mitsubishi Heavy Industries K1–K4 o mocy chłodniczej 25 kW każdy. W praktyce pracują one w parach K1-K3 i K2-K4, naprzemiennie co 10 godzin.



a)



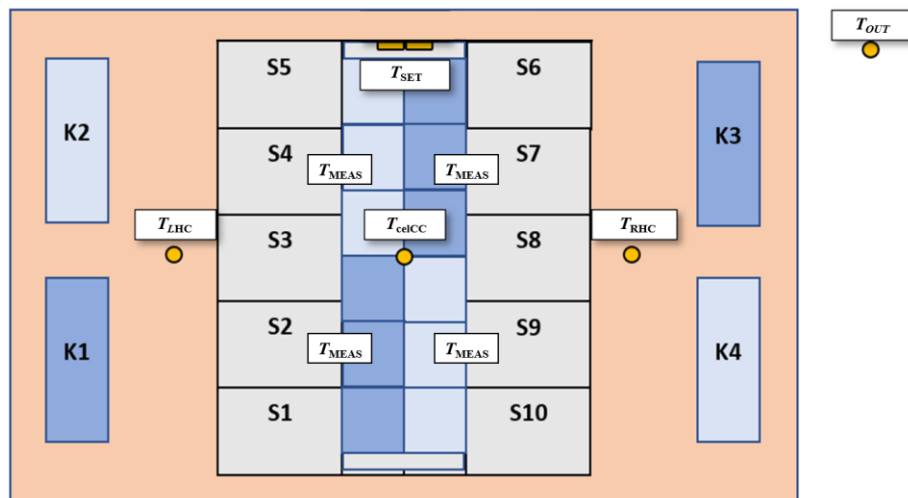
b)



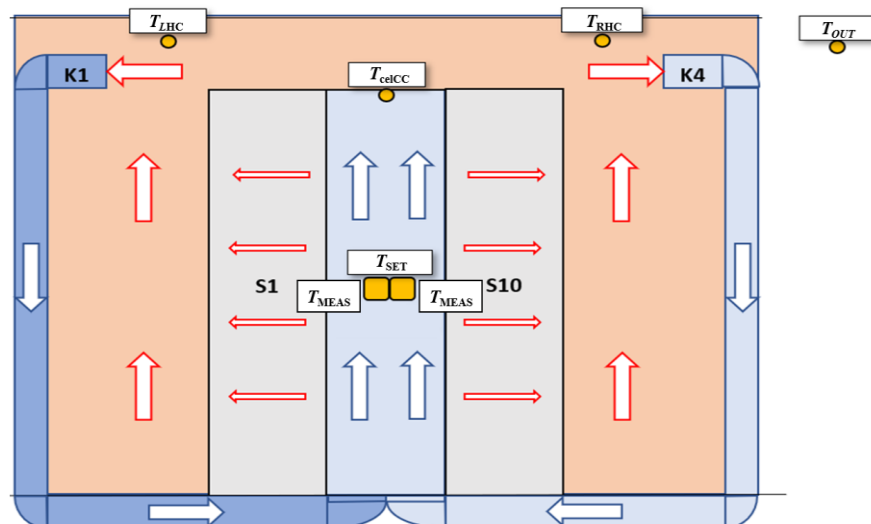
Rysunek 53. a) Rozmieszczenie szaf serwerowych S1 do S10 w DataBox, b) zimny korytarz Databox

Na rysunku 54 przedstawiono rozmieszczenie szaf i urządzeń klimatyzacyjnych w rzucie poziomym (a) i w rzucie pionowym (b). Na rysunku 54b) zaznaczono za pomocą strzałek również przepływ zimnego i ciepłego powietrza. W prezentowanym systemie powietrze z zimnego korytarza jest zasysane przez urządzenia serwerowe umieszczone w szafach rack 19" S1-S10 i przepływa przez nie. Tam następuje schłodzenie urządzeń i podgrzanie przepływającego powietrza. Następnie jest ono wywiewane z tyłu szaf przepływając do ciepłego korytarza. Stamtąd zasysane jest do pracujących jednostek wewnętrznych klimatyzacji, gdzie powietrze jest ponownie schładzane, a następnie wydmuchiwane kanałami spod podłogi do zimnego korytarza pomiędzy szafami serwerowymi. Następnie cykl cyrkulacji powietrza jest powtarzany. Czujnik temperatury ( $T_{set}$ ) zewnętrznej znajduje się na północnej ścianie budynku na wysokości 2 m od podłoża.

a)



b)



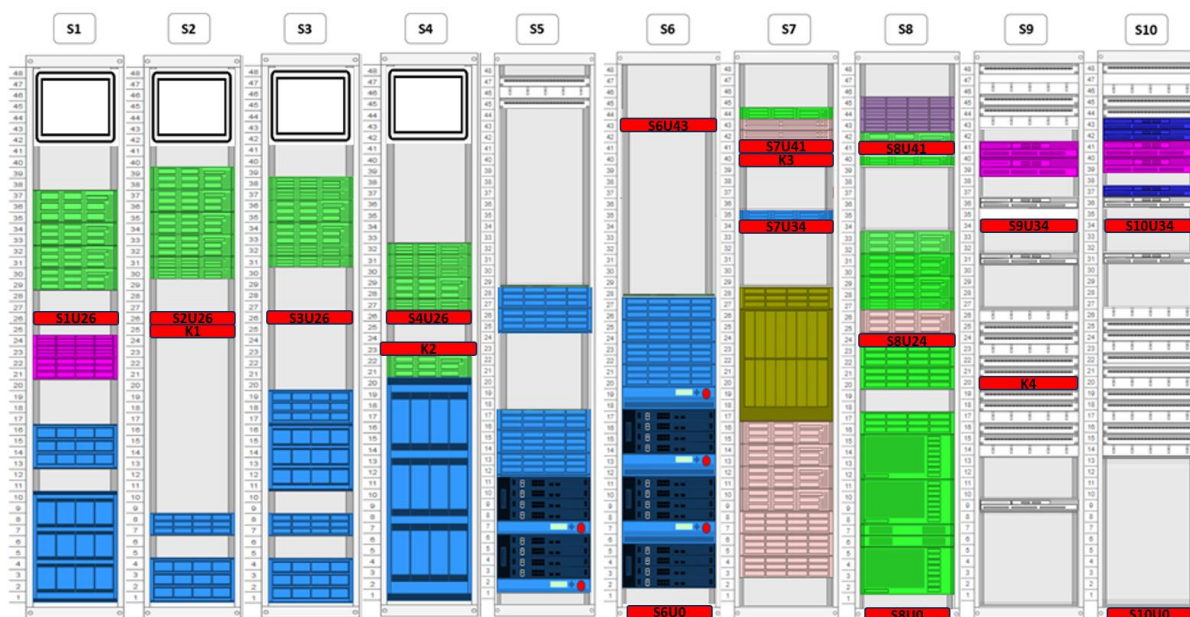
Rysunek 54. Rozmieszczenie szaf i urządzeń klimatyzacyjnych w: a) rzucie poziomym; b) rzucie pionowym

Na rysunku 55 przedstawiono rozmieszczenie urządzeń serwerowych w szafach rack 19" S1-S10. Do oznaczenia poszczególnych grup urządzeń zastosowano różne kolory:

1. Niebieski - Serwery,
2. Kolor zielono-kremowy – macierze dyskowe,
3. Fioletowy i granatowy – urządzenia sieciowe aktywne,
4. Biały – Pasywne urządzenia sieciowe.

Dodatkowe układy pomiaru temperatury umieszczone są w szafach rack 19". Ich lokalizacja jest zaznaczona na czerwono. Odpowiadają za pomiar temperatury na różnych wysokościach na wlocie powietrza z zimnego przejścia do szafy lub pomiar temperatury wewnątrz urządzeń. Numeracją punktu pomiarowego jest numer szafki S1-S10 oraz wysokość wielokrotności U od 0 na dole do 48 na samej górze

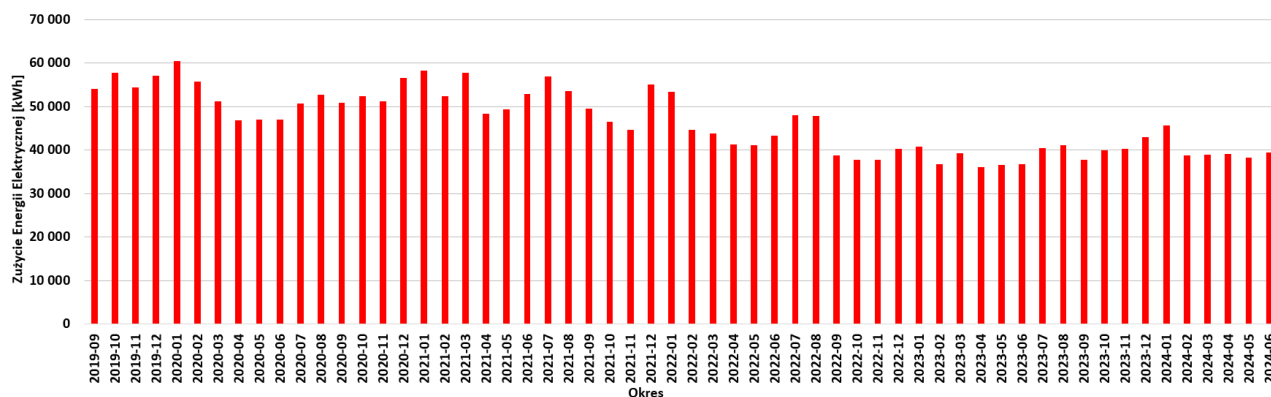
szafy. Punkty pomiarowe oznaczone jako K1-K4 są miejscami pomiarów temperatury odniesienia dla poszczególnych urządzeń klimatyzacyjnych.



Rysunek 55. Rozmieszczenie urządzeń w szafach S1 do 10 wraz z rozmieszczeniem miejsc pomiaru temperatury (kolor czerwony)

## 6.2.2 Metodyka badań

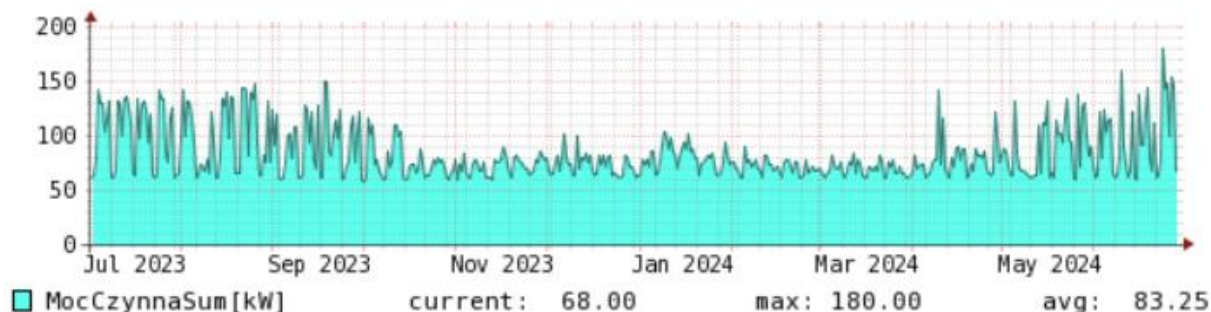
Jednym z istotnych wyzwań zielonej transformacji jest zmniejszenie zapotrzebowania budynków na energię, w tym w szczególności energię elektryczną. Szczególnie istotna jest w tym zakresie energia elektryczna, gdyż wielu właścicieli budynków realizuje proces elektryfikacji pod kątem zapotrzebowania na energię, w tym także na ciepło. Szczególnym przykładem jest budynek biurowy wyposażony w Data Center. Budowa serwerowni w budynku biurowym K-133 pozwoliła mi przeprowadzić badania dla tego typu przypadku. Pomiary zużycia energii elektrycznej w budynku prowadziłem od początku realizacji doktoratu od września 2019 r. Na wykresie (rys. 56) przedstawiono zużycie energii w latach od września 2019 do czerwca 2024. Na wykresie widać dwa wyraźne punkty ze spadkami zużycia energii. Pierwsze miało miejsce w 2020 roku, co jest efektem pandemii Covid-19 i pracy zdalnej pracowników. Drugie w roku 2023, kiedy to uzyskano dodatkowe oszczędności energii elektrycznej wynikające z analizy pracy urządzeń elektrycznych w budynku – szczególnie tych zainstalowanych w serwerowni Data Center. Ponadto można zauważyć zwiększone zużycia energii w okresach letnich, wynika to z faktu wzmożonej pracy agregatów chłodniczych i klimatyzatorów zasilających części biurowe budynków.



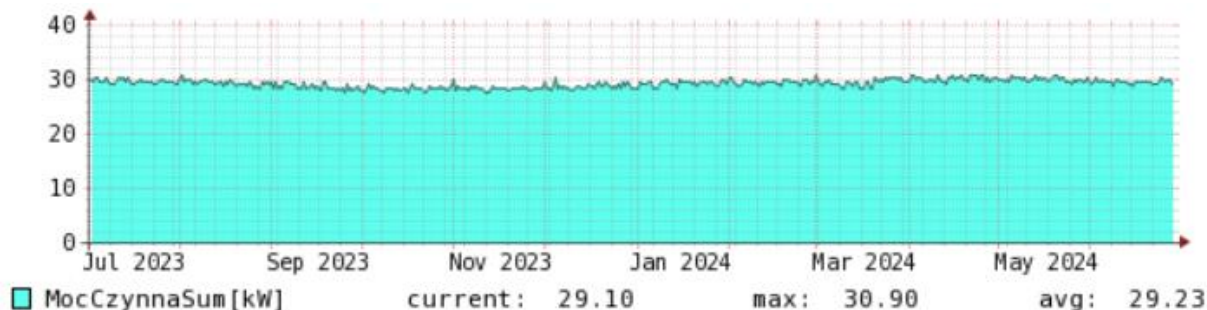
Rysunek 56. Zużycie energii elektrycznej w budynkach biurowych KAMSOFT S.A. w latach 2019 – 2024

Na wykresie zbiorczym trudno jest zauważyć wpływ uruchomienia serwerowni na zmiany zużycia energii. Stąd przeprowadzoną szczegółową analizę zapotrzebowania na energię elektryczną dla budynku biurowego wyposażonego w Data Center. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 57. Przeprowadzono analizę zapotrzebowania na moc czynną w okresie 1 roku, od 1 lipca 2023 r. do 30 czerwca 2024 r. W analizowanym okresie zakończono pracę usprawnienia działania klimatyzacji oraz zakończono prace związane ze zwiększaniem mocy serwerów. Na rysunku 57a) przedstawiono zapotrzebowanie na moc całego budynku z serwerownią i klimatyzacją, natomiast na rysunku 57b) zapotrzebowanie na moc dla serwerowni (Data Center) oraz na rysunku 57c), dla klimatyzacji umieszczonej w serwerowni.

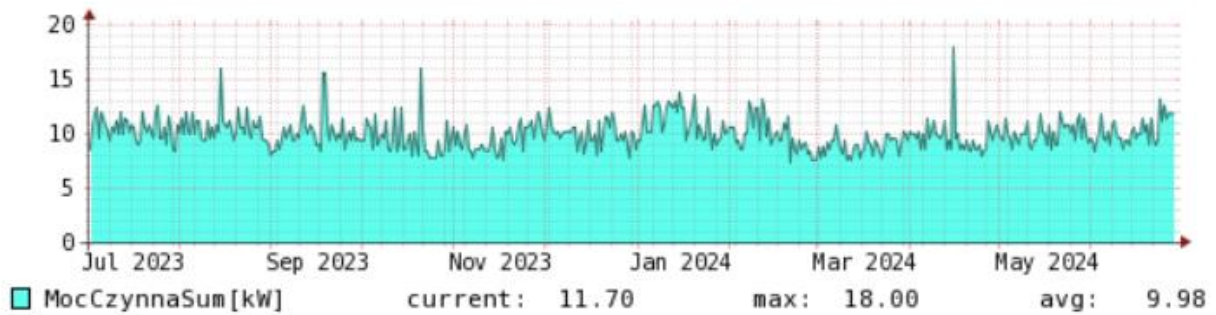
a)



b)



c)

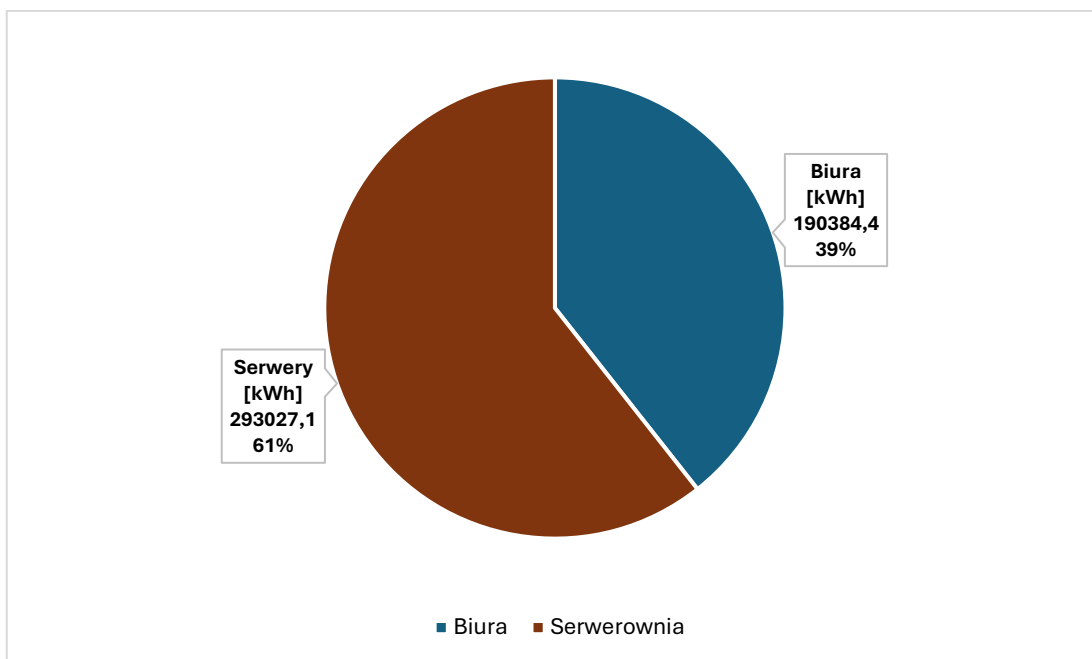


Rysunek 57. Zużycie mocy czynnej w kW, a) dla budynku KS-133 (z serwerownią), b) dla urządzeń IT w Data Center, c) dla klimatyzacji w Data Center

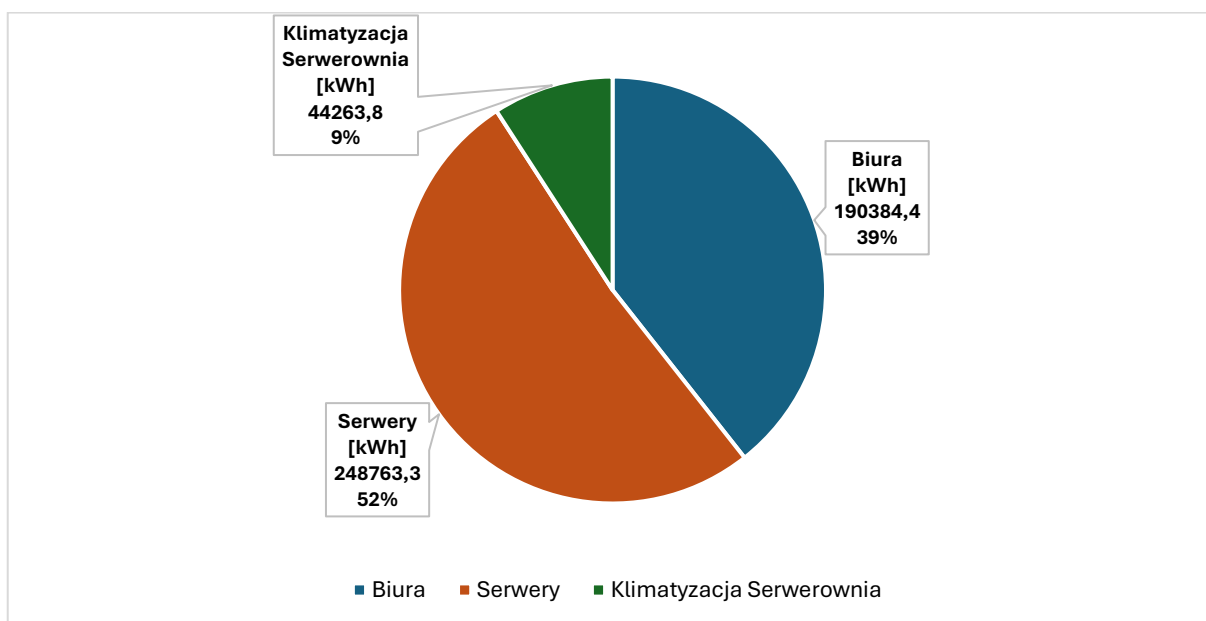
Analiza wyników przedstawionych na rysunku 57 pokazuje, że obciążenie Data Center (rys. 57b) jest stałe. W analizowanym okresie odchylenie od średniej nie przekracza 6%. Natomiast w przypadku części biurowej występują znaczne wahania obciążania budynku. Wahania są szczególnie duże w okresie letnim (rys. 57a), co wynika z dodatkowego obciążenia wynikającego z pracy agregatów chłodniczych układu klimatyzacji części biurowej budynku. W tym okresie obciążenie budynku biurowego zmienia się w zakresie od 60 do 180 kW. Na rysunku 57c) przedstawiono zapotrzebowanie na klimatyzację w pomieszczeniu serwerowni dla tego samego okresu. Zmiany zapotrzebowania na moc klimatyzacji są nieregularne i mieszczą się w zakresie od 7 do nawet 18 kW w piku, średnio 9,98 kW.

Dla przedstawienia szczegółowego podziału zużycia energii w budynku przedstawiono procentowo zapotrzebowania na energię części biurowej i części Data Center (rys. 58a). Jak widać na wykresie ok. 61% energii zużywa serwerownia. Pozostała część energii ok. 39% jest wykorzystywana na oświetlenie, klimatyzację i inne. Na rysunku 58b przedstawiono jaką część zużycia energii w serwerowni stanowi obciążenie serwerów i innych urządzeń IT. W całkowitym ujęciu zużycia energii obciążenie stałe w serwerowni stanowi 52%, a zużycie energii na chłodzenie w serwerowni stanowi 9% całkowitego zużycie energii w budynku. W serowni, w trakcie jego pracy nie ma potrzeby używania ogrzewania, a oświetlenie jest załączane sporadycznie jedynie w przypadkach kontroli lub bieżących napraw.

a)



b)



Rysunek 58.a) Procentowy udział w zużyciu energii elektrycznej przez Data Center w biurowcu; b) Procentowy udział w zużyciu energii elektrycznej przez klimatyzację Data Center w biurowcu

Odnosząc poziom zapotrzebowania na energię w odniesieniu do powierzchni użytkowej każdego segmentu tj. części biurowej i części Data Center, można uzyskać wskaźnik w postaci względnej gęstości zapotrzebowania na energię, który przyjmuje wartość  $0,76 \text{ kW/m}^2$  dla części biurowej i  $36 \text{ kW/m}^2$  dla części Data Center. Przyjęto wskaźnik odnoszący się do powierzchni, gdyż wszystkie pomieszczenia w budynku mają tą samą wysokość. Powyższa analiza podkreśla znaczenie Data Center w procesie ograniczania

zapotrzebowania na energię. Jednak jedynie zapotrzebowania energii na chłodzenie serwerowni może podlegać optymalizacji. Obciążenie stałe, tj. moc obliczeniowa komputerów i moc serwerów wynikają z działalności firmy KAMSOFT S.A. i podlegają ograniczeniu. Jednym z celów moich badań było ograniczenie zapotrzebowania na energię układu chłodzenia w części serwerowej. Proces ograniczania zapotrzebowania na energię przeprowadzono w następujący sposób:

1. Projekt i budowa układu pomiarowego rejestrującego dane pomiarowe w serwerowni,
2. Sprawdzenie poprawności działania układu pomiarowego i układu regulacji pracy urządzeniami klimatyzacji,
3. Budowa modelu predykcji temperatury w serwerowni oraz istotności parametrów pomiarowych,
4. Analiza wyników w celu określenia istotności parametrów elektrycznych i temperaturowych na moc klimatyzacji,
5. Budowa modelu automatyki sterowania procesem chłodzenia jednostek serwerowych,
6. Kontrola układu sterowania i analiza pracy urządzeń w serwerowni,
7. Optymalizacja pracy układu sterowania i regulacji klimatyzacją,
8. Ocena wprowadzonych zmian.

### *6.2.3 Systemy zbierania danych pomiarowych*

W trakcie opracowywania projektu serwerowni, przygotowano odpowiedni system czujników służących do rejestracji wszystkich niezbędnych parametrów pracy urządzeń stanowiących wyposażenie serwerowni. Pierwsze próby uruchomieniowe serwerowni rozpoczęły się w czerwcu 2022 r., natomiast uruchomienie serwerowni nastąpiło we wrześniu 2022 r. W trakcie eksploatacji pomieszczenia Data Center gromadzono i rejestrowano w bazie danych strumień danych dotyczący każdego z czujników. Rejestrację danych pomiarowych przeprowadzono w okresie od 13 września 2022 r. do 31 maja 2023 r. Czas zbierania danych podzielone na następujące okresy:

1. 13 września 2022 r. – 31 grudnia 2022 r. – Okres 1 (O1) - modyfikowano i usprawniano system pomiarowy,
2. 01 stycznia 2023 r. – 31 stycznia 2023 r. – Okres 2 (O2) – analiza pracy urządzeń w serwerowni,
3. 01 lutego 2023 r. – 09 marca 2023 r. – Okres 3 (O3) – modyfikacja i usprawnienie pracy urządzeń automatyki i sterowania, zwiększenie mocy urządzeń IT pracujących w serwerowni (wzrost obciążenia),
4. 10 marca 2023 r. – 31 maja 2023 r. – Okres 4 (O4) – modyfikacja i usprawnienie pracy urządzeń automatyki i sterowania, zwiększenie mocy urządzeń IT pracujących w serwerowni (wzrost obciążenia).

Dane pomiarowe rejestrowano w okresach 15 minutowych. Zbiór danych obejmował 16 zmiennych. Dwie z nich to wartości mocy (klimatyzacji i serwerów), cztery zmienne to temperatury związane

z klimatyzacją, temperatura zewnętrzna, a pozostałe to temperatury pracy serwerów. Pełna lista zmiennych rejestrowanych w eksperymencie znajduje się w tabeli 10.

Tabela 10. Zmienne zarejestrowane do analizy

Jednostka	Opis zmiennych	Oznaczenie
kW	Moc jednostek obliczeniowych	$P_{CU}$
kW	Moc klimatyzacji	$P_{AC}$
°C	Temperatura lewego gorącego korytarza	$T_{LHC}$
°C	Temperatura prawego gorącego korytarza	$T_{RHC}$
°C	Temperatura pod sufitem zimnego korytarza	$T_{celCC}$
°C	Temperatura szafy 7 na wysokości 34U	$T_{R7U34}$
°C	Temperatura szafy 8 na wysokości 24U	$T_{R7U24}$
°C	Temperatura wlotowa szafy 7 na wysokości 34U	$T_{R7U34wew}$
°C	Temperatura wlotowa szafy nr 8 na wysokości 24U	$T_{R8U24wew}$
°C	Temperatura wlotowa szafy 8 na wysokości 41U	$T_{R8U41wew}$
°C	Temperatura wewnętrzna szafy nr 1 na wysokości 26U	$T_{R1U26}$
°C	Temperatura wewnętrzna szafy 2 na wysokości 26U	$T_{R2U26}$
°C	Temperatura wewnętrzna szafy 3 na wysokości 26U	$T_{R3U26}$
°C	Temperatura wewnętrzna szafy 4 na wysokości 26U	$T_{R4U26}$
°C	Temperatura na zewnątrz budynku	$T_{OUT}$
°C	Temperatura mierzona przez klimatyzację	$T_{Meas1-4}$

### 6.3 Modele predykcyjne i ocena istotności zmiennych pomiarowych

#### 6.3.1 Wprowadzenie

Pierwszym elementem badań było wykorzystanie narzędzi informatycznych do budowy systemu predykcji temperatury w kanale ciepłym i ocena istotności mierzonych w serwerowni zmiennych. Jak poprzednio dane obejmowały okres od 2022-09-13 do 2023-05-31 (co dało 27 013 próbek) zarejestrowanych z rozdzielczością czasową 15 minut. Obok warunków zewnętrznych istotnym czynnikiem wpływającym na zużycie energii w serwerowni są jednostki obliczeniowe zlokalizowane w centrum rejestracji danych. Do prawidłowej pracy wymagają one jednak nie tylko energii związanej z zasilaniem, ale również energii niezbędnej do utrzymania odpowiednich parametrów termicznych i wilgotności powietrza. Zbyt wysoka temperatura może doprowadzić do przegrzewania się jednostek, co w konsekwencji ogranicza ich moc obliczeniową, jak również może doprowadzić do stanów awaryjnych. Podobnie też temperatura pracy nie powinna być zbyt niska, gdyż chwilowe zmiany temperatury związane z obciążeniem jednostek, mogą powodować istotny wzrost temperatury układów krzemowych co dla dużych gradientów temperatury może



również negatywnie wpływać na żywotność jednostek obliczeniowych, przy jednoczesnym zwiększonym zużyciu energii elektrycznej. Wychodząc naprzeciw tym wyzwaniom istotne jest aby móc zapewnić możliwie stałe warunki temperaturowe pracy jednostek obliczeniowych oraz macierzy dyskowych. Zwarzywszy na charakter pracy tych jednostek, klimatyzacja zwykle projektowany jest tak, aby zapewnić stałe warunki wejściowe układu chłodzenia tj. stałą temperaturę w kanale zimnym układu chłodzenia. Wówczas układ regulacyjny sam dobiera odpowiedni punkt pracy, tak aby zapewnić stałą temperaturę wlotu powietrza do jednostek obliczeniowych, niezależnie od temperatury zewnętrznej.

Charakterystyka pracy układu regulacji zakłada, że temperatura w kanale zimnym, a dokładniej temperatura wejściowa do jednostek obliczeniowych jak i temperatura wyjściowa z jednostek mierzona w kanale ciepłym powinny mieścić się w określonym przedziale tj. od 16°C do 26°C dla kanału zimnego oraz od 22°C do 35°C w kanale ciepłym. Dla kanału zimnego w systemie monitoringu środowiska ustawione są następujące wartości temperatury uruchamiające alarmy: ostrzegawczy minimum 16°C, ostrzegawczy maksimum 23°C, krytyczny minimum 12°C, krytyczny maksimum 26°C. Przekroczenie zadanych wartości alarmów powoduje wysłanie do osób odpowiedzialnych za ciągłość działania serwerowni komunikatu w formie email'a i SMS'a.

W niniejszym etapie realizacji badań podjęto wyzwanie budowy systemu predykcji temperatury w kanale ciepłym na podstawie danych dostarczanych pomiarowych dostarczanych na wejście układu. Celem takiego układu modelowego jest budowa numerycznego bliźniaka, który pozwoli na przeprowadzenie różnego rodzaju symulacji umożliwiających np. określenie zadanej temperatury referencyjne układu regulacji, zapewniającej stabilną pracę jednostek obliczeniowych przy jednoczesnej minimalizacji zużycia energii elektrycznej (maksymalnej temperatury nastawy oraz szerokości okna histerezy).

### 6.3.2 Założenia procesu modelowania

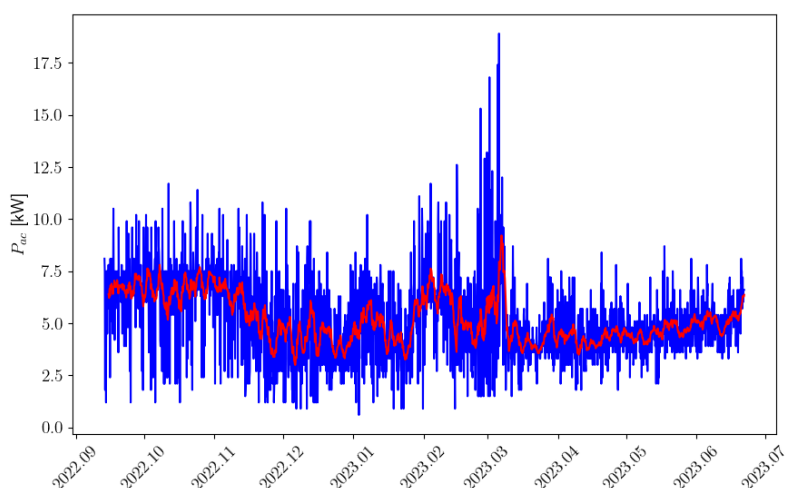
Z wszystkich rejestrowanych zmiennych (tabela 10) do analizy wybrano siedem, które przedstawiono w tabeli 11. Każda ze zmiennych stanowi szereg czasowy zarejestrowany w przedstawionych powyżej okresach. Na rysunkach 59- 64. przedstawiono reprezentację graficzną poszczególnych zmiennych wraz z ich interpretacją. Rysunek 60 przedstawia moc elektryczną pobieraną przez jednostki obliczeniowe. W okresie od lutego 2022 r. do marca 2023 r. (O3) obserwujemy trend skokowy – zaznaczony na czerwono, który wynika ze zwiększania liczby serwerów wykorzystywanych w ramach Data Center. Na rysunku 59 obserwujemy moc pobieraną przez układ chłodzenia i klimatyzacji – przedstawiono parametry pierwszego klimatyzatora. Jak można zaobserwować w okresach 1 i 2 (O1 i O2) widać stosunkowo dużą wariację, zwłaszcza w porównaniu z późniejszym okresem (O4). Co zaskakujące, nie odpowiada to zużyciu energii elektrycznej przedstawionemu na rysunku 60 Jest to wynikiem zmian wprowadzonych w układzie chłodzenia. W okresie 4 (O4) obserwujemy powolny wzrost trendu zużycia energii przez instalację klimatyzacyjną, co wynika ze wzrostu średniej temperatury zewnętrznej.

Tabela 11. Wykaz zmiennych wykorzystanych w modelowaniu temperatury

Jednostka	Opis	Symbol
kW	Moc elektryczna jednostek obliczeniowych	$P_{CU}$
kW	Moc elektryczna układu klimatyzacji	$P_{AC}$
°C	Temperatura w lewym korytarzu ciepłym	$T_{LHC}$
°C	Temperatura w prawym korytarzu ciepłym	$T_{RHC}$
°C	Temperatura pod sufitem w korytarzu zimnym	$T_{ceICC}$
°C	Temperatura na zewnątrz budynku	$T_{OUT}$
°C	Temperatura układu regulacji	$T_{MEAS1-4}$

### Moc klimatyzacji ( $P_{AC}$ )

Charakterystykę zapotrzebowania na energię elektryczną układu klimatyzacji przedstawia rysunek 59. Na wykresie widoczne są obok zarejestrowanych wartości chwilowych mocy przedstawionych kolorem niebieskim również linia czerwona reprezentująca średnią kroczącą.

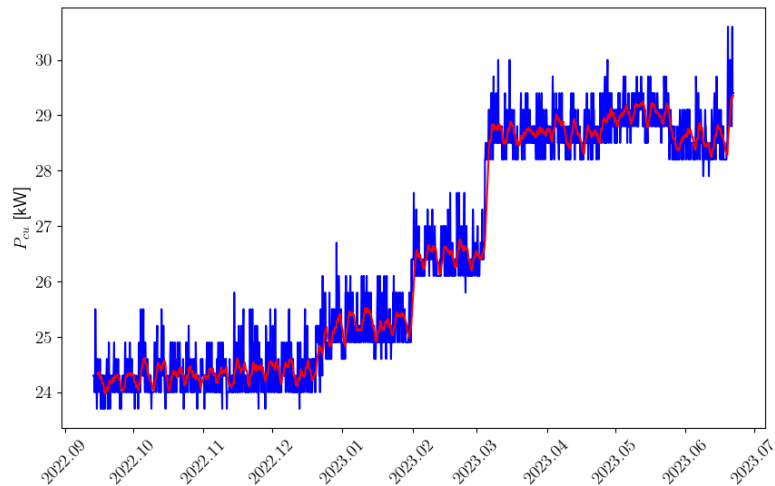


Rysunek 59. Zapotrzebowanie na moc układu klimatyzacji

Na wykresie uwidaczniają się cztery charakterystyczne okresy. Pierwszy to przedział wrzesień 2022- grudzień 2022, drugi to styczeń 2023, kolejny okres to luty 2023 - 09 marca 2023 oraz czwarty okres od 10 marca do czerwca 2023. W pierwszym i drugim okresie widoczna jest duża wariancja w zakresie zużycia energii. Różnica między nimi wynika z tego, że w (O1) następowała kalibracja układu automatyki klimatyzacji, natomiast w drugim nie prowadzono żadnych zmian w systemie. W kolejnym okresie (O3) widoczne są piki oraz składowa stała w okolicach początku lutego 2023 oraz nagły istotny wzrost zapotrzebowania na energię w drugiej połowie lutego oraz na początku marca. W tym okresie wprowadzono zaproponowane zmiany w układzie klimatyzacji oraz zwiększono moc serwerów. Okres (O4) obejmuje czas po zmianach, gdzie widoczna jest już stabilna praca, a widoczny trend wzrostowy związany jest ze wzrostem temperatury zewnętrznej.

### Moc jednostek obliczeniowych ( $P_{CU}$ )

W przypadku charakterystyki zużycia energii przez jednostki obliczeniowe została przedstawiona na rysunku 60. Uwydatnia ona stały poziom szumu – odpowiadający zmienności dobowej zapotrzebowania na moc nałożony na charakterystyczną krzywą schodkową. Obserwowana krzywa schodkowa jest wynikiem zwiększenia liczby jednostek obliczeniowych znajdujących się w centrum danych.

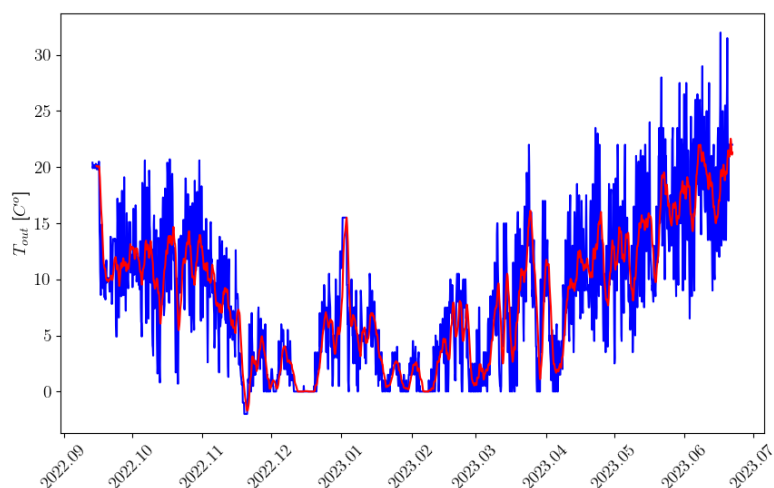


Rysunek 60. Zapotrzebowanie na moc jednostek obliczeniowych

Podobnie jak uprzednio na wykresie przedstawiono wartości chwilowe – kolor niebieski oraz linią czerwoną krzywą kroczącą.

### Temperatura zewnętrzna $T_{OUT}$

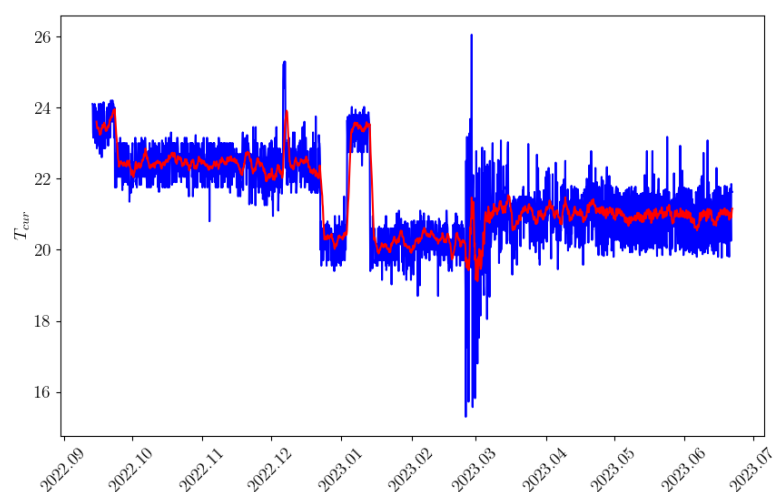
Analizowany okres rejestracji zmiennych, w tym temperatury zewnętrznej, obejmował zarówno porę zimną jak i ciepłą panującą Polsce (rys. 61). Zakres temperatury obejmował od wartości ujemnych do wartości dodatnich ( $+30^{\circ}\text{C}$ ). Ze względu na wykorzystanie czujnika temperatury Geist GTH zarządzalnej listwy zasilającej model GU30030L produkcji VERTIV, nie pozwalał on rejestrować wartości ujemnych. Czujnik był integralną częścią układu rejestracji parametrów środowiskowych oraz wykorzystywał środowisko dedykowane do tego układu.



Rysunek 61. Wykres zmienności temperatury zewnętrznej

### Temperatura układu regulacji $T_{Meas1-4}$

Temperaturę układu regulacji rejestrowano za pomocą 4 czujników termistorowych Thi-A MHI (013920 PSA551A008D o rezystancji  $5k\Omega$  dla  $25^{\circ}\text{C}$ ). Czujniki w okresach O1 i O2 były umieszczone na ścianie frontowej (rys. 53  $T_{SET}$ ). Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników opisanych w rozdziałach 6.3.5, w okresie 3 zmieniano położenie czujników. Ostatecznie, od 10 marca, czujniki umieszczono w na wlotach powietrza szaf serwerowych (rys 55). Te zmiany są widoczne na przebiegu temperatury pokazanym na rysunku 62. Na wykresie widać charakterystyczne 3 przedziały czasu: od września 2022 do stycznia 2023 (O1+O2), w miarę stabilny zakres temperatury (średnie wartości na poziomie  $22,5^{\circ}\text{C}$ ). Między lutym, a marcem 2023 r. (O3) – w tym czasie można zauważyć duże zmiany wartości, wynikają one z wprowadzonych zmian systemie sterowania. Ostatni okres po 9 marca 2023 r. (O3) to już stabilna praca.

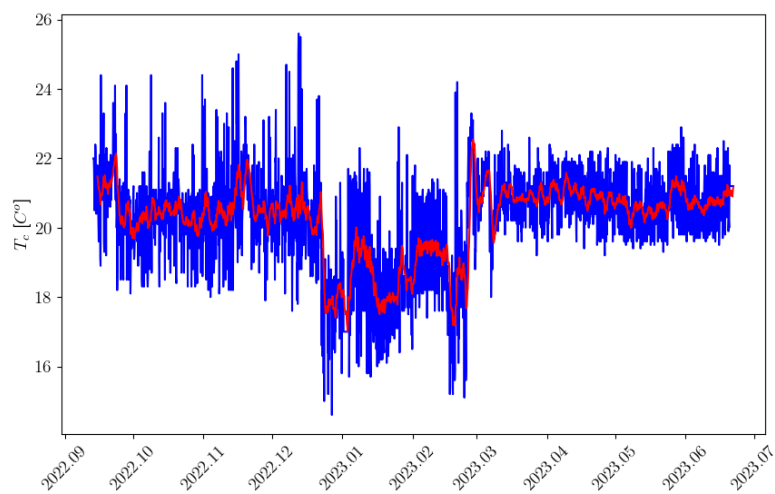


Rysunek 62. Wykres zmienności temperatury regulacji

### Temperatura pod sufitem w korytarzu zimnym $T_{\text{celCC}}$

Na rysunku 63 przedstawiono przebieg temperatury w korytarzu zimnym. Można zauważyć trzy charakterystyczne okresy:

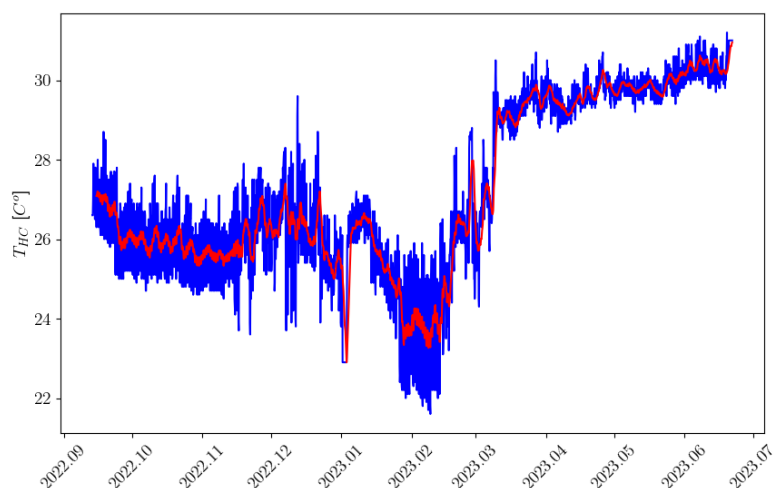
- w pierwszym okresie amplitudy temperatury są duże i mieszczą się w zakresie od ok. 18°C do 25°C. Świadczy to o niewłaściwej układowi sterowania klimatyzacją. Średnia wartość temperatury wynosi ok. 20°C,
- w drugim charakterystycznym okresie również widoczne są duże skoki temperatur i duża zmienność średniej wartości temperatury (zaznaczone kolorem czerwonym). Jest to okres w którym zmieniała się moc serwerów oraz nastąpiły zmiany w układzie sterowania klimatyzacją,
- w ostatnim okresie amplituda zmian jest najmniejsza mieści się w granicach od ok. 19°C do 23°C. Jest okres w którym nastąpiła już ustabilizowana praca układu sterowania klimatyzacją.



Rysunek 63. Wykres zmienności temperatury pod sufitem w korytarzu zimnym

### Temperatury w korytarzach ciepłych $T_{\text{LHC}}, T_{\text{RHC}}$

Na rysunku 64 przedstawiono przebieg temperatury w jednym z korytarzy ciepłych (prawym). Analogiczny przebieg jest dla korytarza lewego. Podobnie jak dla przebiegu przedstawionego na rysunku 62 można zauważyć trzy charakterystyczne okresy. Pierwsze dwa to niewłaściwa praca układu klimatyzacji, widać duże wahania temperatury. Natomiast w trzecim okresie temperatura powietrza na wylocie z szaf serwerowych jest stabilna średnio wynosi ok. 30°C.



Rysunek 64. Wykres zmienności temperatury w korytarzu ciepłym

### 6.3.3 Charakterystyka modeli predykcyjnych wykorzystanych w badaniu

W zakresie budowy modeli predykcyjnych opracowano bardzo dużo różnych algorytmów. Z jednej strony są to modele minimalno-odległościowe, z drugiej strony są to algorytmy bazujące na drzewach decyzji, a również są to algorytmy sieci neuronowych. Zgodnie z twierdzeniem „No free lunch” (braku darmowego obiadu) nie istnieje jeden uniwersalny najlepszy model predykcyjny umożliwiający predykcję z minimalnym błędem, wymaga to natomiast przejrzania różnych narzędzi i porównania ich zdolności predykcyjnych [130-134].

**Metody minimalno-odległościowe**, takie jak k-Nearest Neighbors (kNN), są jednymi z najczęściej stosowanych algorytmów w klasyfikacji i regresji w analizie danych. Algorytmy te bazują na prostym założeniu, że klasyfikacja nowego punktu danych zależy od klasy najbliższych sąsiadów w wielowymiarowej przestrzeni wejściowej. Metody te są szczególnie użyteczne w przypadku danych o wysokiej wymiarowości i często stosowane w zadaniach rozpoznawania wzorców, analizy obrazów, oraz w systemach rekomendacji. Algorytm kNN jest klasycznym przykładem metody lazy learning, gdzie nie buduje się modelu na etapie uczenia, ale decyzje podejmowane są dopiero na etapie predykcji. Główną ideą jest znalezienie k najbliższych sąsiadów dla punktu, który chcemy sklasyfikować, a następnie przypisanie mu klasy dominującej wśród tych sąsiadów [135].

Jak wskazuje Rutkowski [130] w swojej książce "Metody i techniki sztucznej inteligencji", minimalno-odległościowe algorytmy, takie jak kNN, są intuicyjne i proste w implementacji, co czyni je popularnym wyborem w wielu aplikacjach. Breiman [131] również opisuje, że algorytmy te charakteryzują się dobrą wydajnością w przypadku problemów klasyfikacyjnych, w których dane są niejednorodne i występuje duża liczba zmiennych, ale podkreśla także wyzwania związane z ich skalowalnością i efektywnością obliczeniową w przypadku dużych zbiorów danych. kNN znalazło szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak:

1. Rozpoznawanie obrazów: Algorytmy kNN są często stosowane do klasyfikacji obrazów, gdzie każdy

obraz jest reprezentowany jako punkt w przestrzeni cech,

2. Systemy rekomendacji: w systemach rekomendacji, gdzie na podstawie podobieństw między użytkownikami lub produktami przewiduje się preferencje użytkowników,
3. Analiza medyczna: w analizie medycznej, do klasyfikacji pacjentów na podstawie ich wyników testów medycznych.

Do zalet tego algorytmu należą prostota implementacji i intuicyjność oraz brak założeń dotyczących rozkładu danych. Natomiast wadami algorytmu kNN są:

- Wysoka złożoność obliczeniowa procesu predykcji przy dużych zbiorach danych,
- Wymaga dużej ilości pamięci do przechowywania danych treningowych,
- Czułość na wybór metryki odległości oraz parametr  $k$ .

W literaturze wskazuje się na potrzebę dalszego rozwoju technik, które mogą zmniejszyć złożoność obliczeniową algorytmów kNN, jak również technik, które pozwolą na lepsze radzenie sobie z danymi o wysokiej wymiarowości i dużej liczbie klas. Przykładem takich technik są różne formy przybliżonych metod najbliższych sąsiadów (ang. Approximate Nearest Neighbors, ANN), które są omawiane przez Indyk i Motwani [132].

**Drzewa decyzyjne** są metodami klasyfikacji, które działają poprzez podział przestrzeni cech na regiony odpowiadające różnym klasom. Jak opisuje Breiman [131] w swojej książce, proces budowy drzewa polega na rekurencyjnym dzieleniu przestrzeni cech, gdzie w każdym węźle drzewa dokonuje się podziału na podstawie wybranej cechy, minimalizując przy tym błąd klasyfikacji.

Algorytmy bazujące na drzewach decyzyjnych mają pewne unikalne cechy [136]:

- Prostota interpretacji: Drzewa decyzyjne są łatwe do zrozumienia i interpretacji, co czyni je popularnym wyborem w analizie danych,
- Nieliniowe granice decyzyjne: Drzewa mogą tworzyć skomplikowane, nieliniowe granice decyzyjne, które dobrze radzą sobie z danymi o złożonych zależnościach,
- Zdolność do obsługi danych o mieszanych typach: Drzewa decyzyjne mogą przetwarzać zarówno dane liczbowe, jak i kategoryczne, co daje im dużą elastyczność.

Rutkowski [130] podkreśla, że jednym z kluczowych elementów skuteczności drzew decyzyjnych jest wybór odpowiednich miar, takich jak współczynnik Gini czy informacja wzajemna, które są używane do określenia najlepszych podziałów w węzłach drzewa.

Najważniejsze zalety algorytmów bazujących na drzewach decyzji to:

- Łatwość interpretacji wyników w postaci zbioru reguł.
- Elastyczność w obsłudze danych o mieszanych typach.
- Możliwość pracy z danymi niejednorodnymi.
- Wysoka skalowalność – łatwość przetwarzania dużych zbiorów danych.

Natomiast do wad należą:

- Wysoka podatność na przeuczenie (overfitting), zwłaszcza gdy drzewa są głębokie i złożone,
- Niekiedy duża niestabilność, gdzie małe zmiany w danych mogą prowadzić do znacznie różnych drzew.

W literaturze [130, 131] wskazuje się na potrzebę rozwijania technik, które mogłyby poprawić stabilność drzew decyzyjnych oraz zmniejszyć ich podatność na przeuczenie. Na przykład, techniki takie jak lasy losowe RF (Random Forests) czy GBT (Gradient Boosted Trees) są rozwinięciami klasycznych drzew decyzyjnych, które próbują zniwelować te wady poprzez łączenie wyników z wielu drzew decyzyjnych w celu uzyskania bardziej stabilnych i dokładnych predykcji [136]. Obie te metody wykorzystują model oparty na drzewie decyzyjnym i tworzą zespół, z tą różnicą, że mechanizm konstruowania zespołów jest inny. W RF zamiast pojedynczego drzewa, zestaw drzew jest szkolony równoległe, gdzie różnorodność drzew osiąga się poprzez losowe wybranie podzbioru cech używanych do zbudowania pojedynczego drzewa. Ogromną zaletą tej metody jest łatwość zrównoleglenia zarówno procesu uczenia i predykcji. Z drugiej strony GBT konstruuje nowe drzewa sekwencyjnie, tak że po dodaniu nowego drzewa funkcja kosztu określająca wagi próbek uczących jest optymalizowana w celu zapewnienia, że kolejne drzewo zostanie zbudowane w sposób minimalizujący ogólny błąd całego modelu.

Drzewa decyzyjne są niezwykle użytecznym narzędziem w analizie danych, oferując intuicyjność, elastyczność i moc predykcyjną. Ich prostota w interpretacji i zdolność do modelowania skomplikowanych zależności czyni je popularnym wyborem w wielu zastosowaniach praktycznych. Jednakże, wyzwania związane z przeuczeniem i niestabilnością wskazują na potrzebę dalszych badań i rozwoju w tej dziedzinie.

**Sieci neuronowe**, zainspirowane biologicznymi neuronami, są jednymi z najważniejszych i najczęściej stosowanych narzędzi w dziedzinie sztucznej inteligencji. Stanowią fundament nowoczesnych metod uczenia maszynowego, umożliwiając rozwiązywanie skomplikowanych problemów klasyfikacyjnych, regresyjnych, a także problemów z zakresu analizy danych obrazowych, przetwarzania języka naturalnego oraz innych dziedzin. Sieci neuronowe składają się z warstw neuronów, które przekształcają dane wejściowe przez serie nieliniowych funkcji aktywacyjnych, prowadząc do decyzji lub predykcji na wyjściu sieci. Jak opisuje Rutkowski [130], sieci neuronowe można interpretować jako wielowarstwowe struktury, w których każda warstwa jest odpowiedzialna za ekstrakcję i przekształcanie cech danych wejściowych. Podstawowym budulcem sieci neuronowych są sztuczne neurony, które imitują funkcjonowanie neuronów biologicznych. Neurony te sumują sygnały wejściowe, przekształcają je za pomocą funkcji aktywacyjnej, a następnie przekazują wynik do kolejnych warstw sieci. Kluczowymi aspektami skutecznego działania sieci neuronowych są [137]:

- Struktura sieci: liczba warstw i liczba neuronów w każdej z nich,
- Funkcje aktywacyjne: które wprowadzają nieliniowości, pozwalając sieci na modelowanie złożonych zależności,
- Metody optymalizacji: takie jak algorytmy gradientowe, które pozwalają na efektywne dostosowanie



wag neuronów w procesie uczenia.

Sieci neuronowe znalazły szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach, w tym:

1. Rozpoznawanie obrazów: W przetwarzaniu obrazów sieci konwolucyjne (CNN) są wykorzystywane do rozpoznawania wzorców, klasyfikacji obiektów na zdjęciach oraz segmentacji obrazów,
2. Przetwarzanie języka naturalnego (NLP): Sieci neuronowe, w szczególności sieci rekurencyjne (RNN) i transformery, są stosowane do analizy tekstu, tłumaczeń maszynowych oraz rozpoznawania mowy,
3. Systemy rekomendacji: W e-commerce i serwisach streamingowych sieci neuronowe są używane do przewidywania preferencji użytkowników na podstawie ich wcześniejszych wyborów.

Do zalet sieci neuronowych zaliczamy [131]:

- Zdolność do modelowania skomplikowanych zależności: Dzięki swojej wielowarstwowej strukturze sieci neuronowe mogą uchwycić złożone zależności między danymi wejściowymi a wyjściowymi,
- Uniwersalność: Mogą być stosowane do różnych typów danych, w tym obrazów, tekstu, dźwięku i innych,
- Efektywność w zadaniach dużej skali: Sieci neuronowe, szczególnie głębokie, są skuteczne w przetwarzaniu ogromnych ilości danych, jak np. big data.

Natomiast do wad:

- Wymagania obliczeniowe: Sieci neuronowe, szczególnie głębokie, wymagają dużych zasobów obliczeniowych, co może być problematyczne w zastosowaniach na mniejszą skalę,
- Trudność w interpretacji: Modele te są często uważane za "czarne skrzynki", co utrudnia zrozumienie, w jaki sposób dochodzą do swoich predykcji,
- Ryzyko przeuczenia: Sieci neuronowe mogą łatwo ulec przeuczeniu, zwłaszcza w przypadku niewielkich zbiorów danych.

Sieci neuronowe są stale rozwijane, a obecne badania koncentrują się na poprawie ich efektywności obliczeniowej, zrozumiałości oraz na zmniejszeniu ich podatności na przeuczenie. Techniki takie jak rekuraryzacja, różne formy normalizacji oraz innowacje w architekturze sieci, takie jak tzw. skip connections w głębokich sieciach neuronowych. i sieci z pamięcią długoterminową (LSTM), są badane i rozwijane, aby sprostać tym wyzwaniom.

Sieci neuronowe są niezwykle potężnym narzędziem w analizie danych i uczeniu maszynowym. Ich zdolność do modelowania skomplikowanych zależności i zastosowanie w różnych dziedzinach czyni je jednym z najważniejszych elementów współczesnej sztucznej inteligencji. Jednakże ich efektywność obliczeniowa, interpretowalność oraz podatność na przeuczenie pozostają wyzwaniami, które wymagają dalszych badań.

Jak wskazano wyżej, jednym z czynników niezbędnych do realizacji obliczeń jest procedura poszukiwania najlepszego zestawu parametrów konfiguracyjnych dla poszczególnych modeli uczenia maszynowego. Procedura ta składa się z kilku etapów tj. określenia zestawu parametrów, których

użytkownik chce dokonać analizy, rozpoczęcie algorytmu przeszukiwania z odpowiednią metodą estymacji błędu predykcji, wyboru zestawu parametrów minimalizujących błąd predykcji.

W przypadku pierwszego kroku tj. wyboru zestawu parametrów to dla poszczególnych metod można wyróżnić: listę najbliższych sąsiadów  $k$  dla klasyfikatora  $k$ NN, listy określającej liczbę drzew w algorytmie typu lasy losowe, czy też drzewa wzmacniane, różnej liczby kryteriów rozwoju drzewa, czy też wielkość współczynnika uczenia algorytmu drzew wzmacnianych. W przypadku sieci neuronowych typowymi parametrami jest architektura sieci, wartość początkowa współczynnika uczenia, czy też rozmiar paczki wektorów [138].

Jak wskazano wyżej po określeniu zestawu ewaluowanych parametrów następuje rozpoczęcie procedury przeszukiwania. Wymaga ona jednak określenia metody ewaluacji modelu. Do najczęściej stosowanych metod należy zaliczyć algorytm testu krzyżowego. Jego idea polega na podziale zbioru danych na  $q$ - rozłącznych części, a następnie na nauczeniu modelu z wykorzystaniem  $q-1$  części i ewaluacji na pozostałej części. Procedura ta powtarzana jest dla każdej części  $q$  z osobna, a uzyskane wyniki są uśredniane. Powyższa procedura minimalizuje uzyskanie wyników przeszacowanych, które łatwo można uzyskać korzystając z prostego podziału trening/test, gdyż przypadkowo można dostać zestaw parametrów charakterystycznych tylko dla pojedynczego zestawu trening/test.

W ostatnim kroku następuje wybór najlepszego zestawu parametrów. Wówczas w najprostszym przypadku wyznaczane jest minimum wielkości błędu uzyskanego dla różnych zestawów parametrów wejściowych danego algorytmu lub też w procesie podejmowania decyzji wykorzystywane są również inne parametry opisujące rozkład dokładności poszczególnych modeli np. odchylenie standardowe uzyskane w teście krzyżowym.

Wszystkie te algorytmy znalazły szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak:

- Diagnostyka medyczna: W analizie medycznej są stosowane do klasyfikacji pacjentów na podstawie wyników badań medycznych. Na przykład, mogą one pomóc w prognozowaniu ryzyka chorób serca na podstawie takich cech jak wiek, ciśnienie krwi i inne zmienne kliniczne,
- Finanse: W sektorze finansowym są używane do oceny ryzyka kredytowego, gdzie na podstawie historii kredytowej i innych zmiennych przewiduje się, czy klient spłaci pożyczkę,
- Marketing: W marketingu są stosowane do segmentacji klientów oraz do przewidywania ich reakcji na kampanie marketingowe.

#### 6.3.4 Opis eksperymentów

W celu realizacji postawionego na wstępie rozdziału badania dokonano porównania opisanych wyżej algorytmów predykcyjnych. Jako dane wejściowe wykorzystano parametry opisane tabeli 11, za wyjątkiem temperatury w kanale ciepłym, która stanowiła zmienną wyjściową systemu  $y = T_{LHC}$  W dalszej części badań dokonano adaptacji atrybutów tj.  $P_{CU}$ ,  $P_{AC}$ ,  $T_{celCC}$ ,  $T_{OUT}$  oraz  $T_{MEAS}$  tak aby ujednorodnić częstotliwość

próbkowania poszczególnych zmiennych (poszczególne parametry rejestrowane są z różną częstotliwością). Tak uzyskane zmienne poddano procesowi normalizacji sprowadzając wartość średnią każdego z nich do 0 oraz odchylenie standardowe do 1. W kolejnym kroku do zbioru danych dodano atrybuty autoregresyjne, zamieniając każdą ze zmiennych na ciąg siedmiu wartości historycznych  $\{X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, X_{t-3}, X_{t-4}, X_{t-5}, X_{t-6}\}$ , tak aby model podejmując decyzję znał również informacje o przebiegu zmian poszczególnych parametrów systemu. W ostatnim kroku do zestawu danych dodano kolejne atrybuty w tym atrybut symboliczny umożliwiający identyfikację dni tygodnia, atrybut binarny identyfikujący weekendy oraz święta. Następnie przeprowadzono przeszukiwanie typu krata w celu identyfikacji najlepszych parametrów modelu. Zestawienie analizowanych parametrów przedstawia tabela 12.

Tabela 12. Zestaw parametrów wykorzystany w procedurze optymalizacji modelu

Model	Parametr 1	Parametr 2
GBT	# drzew [50, 100, 150, 200, 250, 300, 350]	Współczynnik uczenia [ 0.02, 0.07, 0.1, 0.2],
RF	# drzew [50, 100, 150, 200, 250, 300]	Liczba cech: [sqrt(#f), log2(#f)]
kNN	K = [5, 15, 25, 35, 45, 55]	-
MLP	#neuronów w warstwach: (100,), (100,10), (10,10)	Współczynnik uczenia [ 0.001, 0.01, 0.1]

### 6.3.5 Wyniki

W ramach przeprowadzonych w pierwszym etapie eksperymentów dokonano analizy dwóch zagadnień w tym w pierwszym kroku dokonano porównania modeli predykcyjnych w celu identyfikacji najlepszego modelu predykcyjnego, a w drugim kroku dokonano oceny istotności atrybutów wykorzystanych do budowy modelu predykcyjnego.

#### Porównanie modeli predykcyjnych

Jako funkcję błędu oceny jakości modelu predykcyjnego wykorzystano pierwiastek z błędu średniokwadratowego wyznaczony dla uprzednio znormalizowanej zmiennej wyjściowej, zależność (1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1..n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

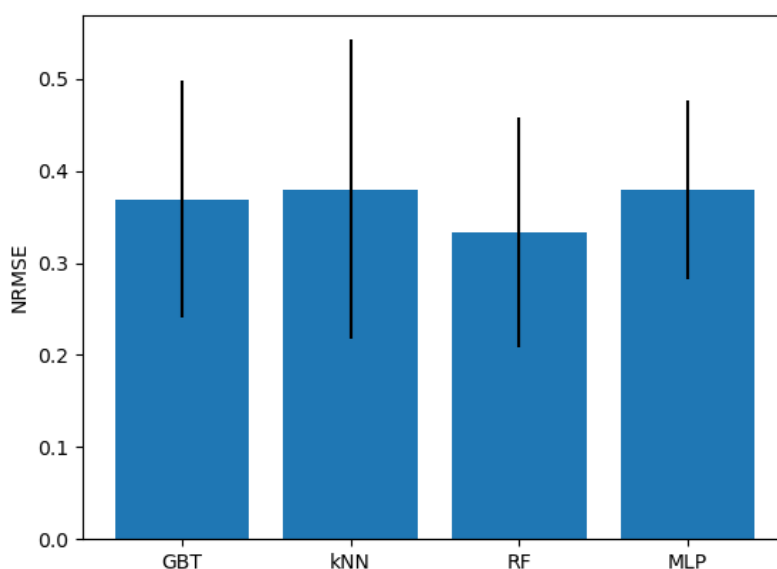
Powyższy wskaźnik ułatwia interpretację błędu, gdyż wartość  $RMSE \sim 1$  oznacza jakość predykcji równoważną modelowi naiwnemu zwracającemu na wyjściu wartość średnią, natomiast  $RMSE$  bliskie 0 oznacza bardzo dobre dopasowanie modelu. Poniżej przyjęto oznaczać miarę jako NRMSE, czyli znormalizowany błąd  $RMSE$ .

W wyniku przeprowadzonych badań porównawczych uzyskano wyniki, które zebrano w tabeli 13 oraz graficznie przedstawiono na rysunku 65. Na rysunku niebieskie słupki oznaczają błąd predykcji, natomiast czarnymi liniami oznaczono odchylenie standardowe uzyskanych wyników. Wyniki te, pozwalają na identyfikację, iż najlepszym modelem predykcyjnym jest algorytm losowych lasów, który pozwolił na uzyskanie

błędu predykcji na poziomie 0.3347. Algorytm ten cechował się również najmniejszym odchyleniem standardowym wyników, a wynik ten osiągnięto dla lasu składającego się z 300 drzew. Kolejne miejsce zajął algorytm GBT oraz sieć neuronowa, które uzyskały błąd na poziomie 0.37. Wprawdzie algorytm wzmocnionych drzew uzyskał błąd minimalnie mniejszy (optymalny model składał się z 200 drzew i współczynnika uczenia równego 0.15), to jednak miał on większe odchylenie standardowe wyników w porównaniu do najlepszej sieci składającej się z jednej warstwy ukrytej i 100 neuronów oraz 1500 epok uczenia. Podobny średni błąd oraz podobne odchylenia standardowe powodują, że obydwa modele są statystycznie nierozróżnialne. Najgorsze wyniki uzyskał algorytm kNN dla  $k=5$ , który cechował się zarówno największym błędem predykcji jak i największym rozrzutem wyników w przypadku testu krzyżowego.

*Tabela 13. Wyniki uzyskane przez poszczególne modele predykcyjne wykorzystane w badaniu*

Model	NRMSE	Odchylenie standardowe
GBT	0.3712	0.1280
RF	0.3347	0.1275
kNN	0.3853	0.1418
MLP	0.3770	0.1265



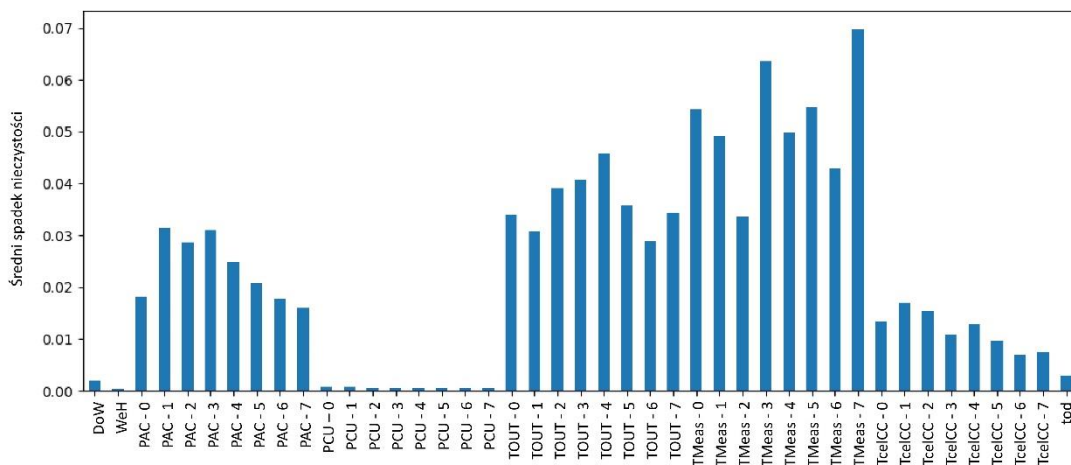
*Rysunek 65. Porównanie wyników predykcji czterech modeli predykcyjnych*

### **Analiza istotności atrybutów**

W kolejnym etapie badań przeprowadzono analizę istotności atrybutów. Analiza ta ma szczególne znaczenie, gdyż pozwala na identyfikację, wpływu poszczególnych zmiennych wejściowych na proces podejmowania przez model decyzji lub też innymi słowy, zmiana której zmiennej najbardziej wpływa na uzyskiwaną temperaturę w kanale ciepłym. Ponieważ najmniejszy błąd predykcji uzyskał algorytm lasu

losowego dlatego stosowaną analizę istotności atrybutów wykorzystano z jego zastosowaniem. Algorytm ten posiada wbudowany mechanizm oceny istotności atrybutów zwany MDI (ang. Mean Decrease in Impurity). Metoda ta bazuje na wyznaczeniu całkowitej redukcji zanieczyszczenia węzła (zmiany wskaźnika oceny jakości węzła np. Gini) ważona przez prawdopodobieństwo trafienia do danego węzła. Prawdopodobieństwo to jest szacowane jako liczba wektorów trafiających do danego węzła względem wszystkich wektorów uczących [137].

Uzyskane w okresie (O2) wyniki dla pierwszych 15 cech przedstawia rysunek 66. Zastosowano następujące dodatkowe zmienne: DoW, oznaczający dzień tygodnia; WeH, który służy do rozróżnienia dni roboczych od weekendów lub świąt  $t_{od}$  – minuta dnia (time of a day). Dane przedstawione na wykresie wskazują, zgodnie z intuicją, iż istotnymi atrybutami są moc klimatyzacji i temperatury zewnętrzna i temperatura mierzona przez klimatyzację. Jednak zaskakujący jest fakt, że moc serwerów jest najmniej istotnym parametrem. Świadczy to o tym, że układ sterowania jest nie poprawny. Wydaje się być oczywistym wniosek, że wzrost mocy serwerów zwiększa temperaturę w pomieszczeniu, co powinno zwiększyć moc pracy klimatyzacji. Wniosek ten jest zbliżony z wnioskami przedstawionymi w rozdziale 6.3.4. Te informacje w konsekwencji były powodem wprowadzenia zmian w systemie sterowania opisanymi w rozdziale 6.3.4. W podobny sposób dokonano oceny istotności atrybutów po wprowadzonych zmianach (O4), wyniki wnioski przedstawiono w rozdziale 6.4.5.



Rysunek 66. Wykres istotności atrybutów uzyskanych z algorytmu lasu losowego z wykorzystaniem algorytmu MDI (O2)

Ciekawym spostrzeżeniem jest fakt, iż największą wartością dla mocy klimatyzacji cechuje się zmienna o współczynniku  $-1 P_{AC} - 1$ , a zmienna  $T_{OUT} - 0$  jest czwartą z kolei, natomiast zmienna  $T_{Meas} - 0$  jest trzecią z kolei. Powyższe może wynikać z faktu, iż atrybuty autoregresyjne są silnie skorelowane. Ponadto istotna może być stała czasowa układu chłodzenia, która powoduje, że obserwowany wzrost temperatury wynika z uprzedniego zużycia energii bardziej niż z aktualnego.

## 6.4 Budowa modelu automatyki sterowania procesem chłodzenia jednostek serwerowych

W celu analizy pracy układu automatyki i sterowania systemem chłodzenia w serwerowni opracowano model tego układu. Model uwzględniał fakt, że jednostki serwerowe wymagają utrzymania stałego reżimu temperaturowego, a przekroczenie dopuszczalnych wartości może mieć poważne konsekwencje dla usług świadczonych w ramach Data Center. Zbudowany model obejmował:

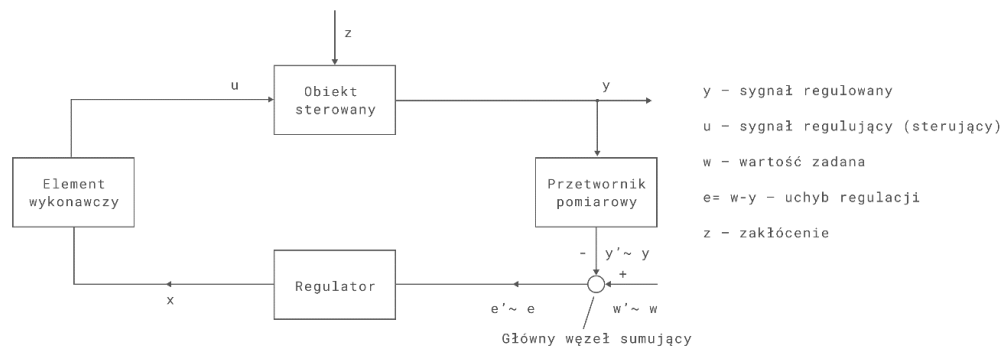
1. Strukturę układu sterowania,
2. Metody regulacji temperatury,
3. Opis klimatyzatora jako elementu wykonawczego,
4. Optymalizacja sterowania w oparciu o dostępne pomiary temperatury powietrza w pomieszczeniu, w szafach serwerowych i w chłodzonych urządzeniach,
5. Analiza zapotrzebowania na chłodzenie – możliwość optymalizacji temperatury zadanej dla klimatyzatorów,
6. Analiza pracy klimatyzatorów w zależności od temperatury powietrza na zewnątrz budynku – analiza wpływu tego czynnika i możliwości wykorzystania tej wiedzy w sposobie sterowania klimatyzatorami,
7. Regulacja predykcyjna w oparciu o dane o obciążeniu chłodzonych urządzeń.

### 6.4.1 Struktura układu sterowania

Problem stabilizacji temperatury jest jednym z najczęściej występujących zagadnień regulacyjnych. Do jego rozwiązania stosuje się wiele różnych metod w zależności od natury procesu (podgrzewanie, chłodzenie), zakresu temperatur, wymagań co do jakości regulacji, dostępnych rozwiązań technicznych oraz ograniczeń, które wynikają z fizyki zjawiska lub zostały przyjęte przez użytkownika. Równocześnie, ze względu na złożoność procesu wymiany ciepła, problem ten należy do najtrudniejszych zadań automatyki. Wymiana ciepła to proces, który zachodzi poprzez przewodzenie, konwekcję lub promieniowanie, a z każde z tych zjawisk, przy odpowiednio wysokim poziomie szczegółowości analizy, ujawnia swoją skomplikowaną naturę [140]. Wiele prac porusza różne aspekty tej złożoności, w szczególności od strony termodynamicznej [141-143]. W większości spotykanych w przemyśle zadań regulacji temperatury daleko posunięta dokładność nie jest jednak konieczna. Odpowiednie dopasowanie wymagań stawianych układom regulacji umożliwia dokonanie wielu uproszczeń, które następnie pozwalają zrealizować zadanie ekonomicznie rozsądnym nakładem sił i środków. W szczególności dokonanie pewnych uproszczeń może dopuścić rozwiązania, które są technicznie łatwo realizowalne i tanie w implementacji.

W ujęciu ogólnym rozwiązania regulacji procesów ciągłych można podzielić na dwie najbardziej podstawowe grupy: układy otwarte oraz układy ze sprzężeniem zwrotnym. Te pierwsze wykorzystywane są najczęściej do kompensacji wpływu zakłóceń, natomiast ich użyteczność do zadań regulacji podstawowych parametrów procesu jest mocno ograniczona. Do tego celu w przytłaczającej większości przypadków

wykorzystuje się układy ze sprzężeniem zwrotnym [144]. Na rysunku 67 wyróżniono najważniejsze elementy zamkniętego układu regulacji. W perspektywie rozpatrywanego w niniejszej pracy układu stabilizacji temperatury w serwerowni są to następujące urządzenia:



Rysunek 67. Schemat ideowy zamkniętego układu regulacji [opracowanie własne na podstawie 144]

**Obiektem sterowanym** jest serwerownia, a właściwie rozkład temperatury w przestrzeni pomieszczenia serwerowego, w elementach stałych w tym pomieszczeniu (szafy serwerowe, inne obiekty) a w szczególności w urządzeniach serwerowych, którym należy zapewnić chłodzenie. Głównymi zakłóceniami wpływającymi na ten rozkład temperatur są wszelkie uzyski i straty ciepła, które pochodzą od przebywających stale w pomieszczeniu pracujących urządzeń, ludzi okazjonalnie wchodzących i opuszczających pomieszczenie oraz zmian warunków brzegowych na granicach pomieszczenia (np. otwierane drzwi). Z tej perspektywy obiektem regulacji jest złożony, niestacjonarny układ termodynamiczny, którego dokładne sterowanie wymagałoby kompleksowego podejścia spełniającego szereg ograniczeń wynikających z fizyki zjawiska (prawa termodynamiki) jak i ograniczeń wynikających z reguł sterowania takim obiektem [142]. Dodatkowo rozprzestrzenianie się temperatury w układzie termodynamicznym ma naturę continuum [143], co opisywane jest wielowymiarowymi równaniami różniczkowymi (obiekt o parametrach rozłożonych [144]). Uwzględniając te właściwości można zbudować układu regulacji o wysokiej skuteczności, ale jego synteza będzie niezwykle trudna. W zadaniu klimatyzacji pomieszczenia serwerowego nie jest jednak istotny rozkład temperatury w całej objętości a jedynie w jego wąskich podprzestrzeniach, gdzie występuje zagrożenie dla wrażliwych elementów elektronicznych na działanie wysokiej temperatury. Pozwala to poczynić szereg uproszczeń umożliwiających syntezę układu regulacji nawet w przypadku, gdy część z tych uproszczeń powoduje utratę rzetelnej informacji o dynamice obiektu, a osiągnane efekty są nieraz niewiele gorsze od układów regulacji opartych na złożonych modelach dynamicznych [145], których opracowanie jest zazwyczaj czasochłonne.

**Przetwornik pomiarowy** reprezentuje urządzenia pomiaru temperatury, które informują o aktualnym stanie obiektu regulacji. Pierwotnym celem układu jest należyte chłodzenie urządzeń serwerowych dla zapewnienia im optymalnych warunków pracy, a w skrajnym wypadku dla ochrony przed zniszczeniem w skutek przegrzania. Z tej perspektywy najbardziej interesującymi powinny być pomiary temperatury chłodzonych

urządzeń. Praktyka pokazuje jednak, że nie byłby to dobry wybór. Sam obieg chłodzonego powietrza w skali całego pomieszczenia jest rzadko wystarczający do zapewnienia właściwego chłodzenia urządzeń. Każde urządzenie generujące istotne ilości ciepła wyposażone jest zazwyczaj we własne układy chłodzenia czerpiące chłodne powietrze ze swojego bezpośredniego otoczenia. To powoduje, że pomiar temperatury chłodzonego urządzenia przestaje być pomiarem reprezentatywnym dla regulacji temperatury w całej serwerowni, ponieważ zależy przede wszystkim od pracy lokalnego dla urządzenia układu chłodzenia. Co więcej, sprawnie i optymalnie działające chłodzenie w urządzeniu powoduje, że jego temperatura staje się w pewnym stopniu niezależna od pracy regulacji temperatury w pomieszczeniu. Zamiast tego pod uwagę należy wziąć przede wszystkim pomiary temperatury powietrza w wewnętrznym korytarzu, w zewnętrznych korytarzach oraz temperatury powietrza przepływającego przez poszczególne segmenty szaf serwerowych. Pomiary temperatury chłodzonych urządzeń będą traktowane jedynie informacyjnie.

**Element wykonawczy** jest to urządzenie, którego działanie ma wyraźny wpływ na jedną lub więcej regulowanych wielkości, choć najczęściej nie jest to wpływ bezpośredni. Może to być urządzenie sterowane w sposób ciągły (np. zawór regulacyjny, grzałka elektryczna regulowanej mocy, pompa z falownikiem itp.) lub dwu- i wielostanowe urządzenia, które mogą przyjąć jedynie określoną ilość dyskretnych stanów pracy (np. zawór odcinający, pompa stałobrotowa, skrzynia biegów w samochodzie itp.). W przypadku omawianego układu elementem wykonawczym jest zespół czterech klimatyzatorów będących w istocie pompami ciepła. Spełniają one dwie funkcje: wymuszają obieg powietrza w serwerowni (sterowanie przepływem powietrza), które jest nośnikiem energii w układzie, oraz odprowadzają z tego powietrza ciepło (sterowanie mocą chłodzenia), które następnie wyprowadzane jest na zewnątrz budynku i zrzucane do atmosfery. Oba te parametry są ze sobą dynamicznie związane. Zarówno przepływ powietrza schłodzonego jak i jego temperatura (na wylocie z klimatyzatora) wpływają na intensywność wymiany ciepła z rozgrzаныmi powierzchniami tym samym na ich temperaturę. Zmiana przepływu powietrza po stronie pierwotnej klimatyzatora ma dodatkowo istotny wpływ na jego punkt pracy i limituje jego wydajność. Zmiana temperatury z kolei w niewielkim stopniu zmienia gęstość powietrza w obiegu, co wpływa na przepływ masowy uzyskiwany przy tym samym wysterowaniu wentylatorów, jednak efekt ten jest znacznie słabszy. Oba czynniki mogą zostać użyte do realizacji zadania regulacji temperatury, ale ich skuteczność zależy od warunków panujących w chłodzonym pomieszczeniu. W szczególności ważne jest aby pomiar temperatury wybrany do regulacji pozostał reprezentatywny nawet wtedy, gdy przepływ powietrza istotnie spadnie lub wygaśnie. Ten warunek nie jest spełniony w badanym przypadku, dlatego przyjęto stałe wysterowanie wentylatorów co zapewnia ciągłą cyrkulację powietrza a zadanie regulacji temperatury wykonywane jest przez zmianę uśrednionej w jednostce czasu wydajności pompy ciepła. W przypadku większości układów elementy wykonawcze odpowiadają za największą część energii zużywanej przez układ regulacji, która z kolei jest często przedmiotem optymalizacji [146]. Aby ją uwzględnić wskaźniki wykorzystywane do oceny jakości regulacji zawierają człony zależne od sygnału sterującego.



**Regulator/układ sterowania** to ogólna reprezentacja wszystkich logik sterowania, które współpracują w celu wypracowania sygnałów sterujących dla elementów wykonawczych. W ogólnym sensie pod tym pojęciem należy rozumieć logiki sterowania różnych rodzajów (algorytmy regulacji) i na wielu warstwach automatyzacji, w tym w warstwie bezpośredniej (właściwe regulatory), warstwie nadrzędnej (optymalizacji) i warstwie zarządzania. W opisywanym układzie sterowania temperaturą w serwerowni rolę układu sterowania pełni sterownik RC-EX3A, który implementuje wszystkie trzy wymienione warstwy, np. przełączanie aktywnych klimatyzatorów dwa razy na dobę służy optymalizacji zużycia urządzeń, stanowi zatem warstwę optymalizacji, a tygodniowy harmonogram pracy (dostępny choć niewykorzystany) jest funkcją warstwy zarządzania. Ten rozdział traktuje przede wszystkim o warstwie bezpośredniej sterowania, tj. o samym algorytmie regulacji, a gdy mowa jest o optymalizacji dotyczy to jedynie optymalnego doboru algorytmu w ramach przyjętych założeń i ograniczeń. Jednym z celów niniejszej pracy jest optymalizacja zużycia energii w układzie regulacji temperatury w serwerowni poprzez zaproponowanie alternatywnego sposobu sterowania w warstwie bezpośredniej, która zastąpi sterownik RC-EX1A rozwiązaniem opartym o predykcję wykorzystującą techniki sztucznej inteligencji.

#### 6.4.2 *Metody regulacji temperatury*

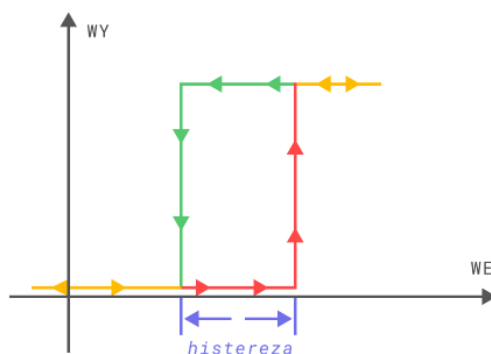
W praktyce przemysłowej do doboru metody sterowania dla zagadnień regulacji podchodzi się w różny sposób w zależności od kilku kluczowych czynników. Aby je określić należy odpowiedzieć m. in. na następujące pytania:

- Czy instalacja jest nowoprojektowana czy zadanie polega na modernizacji istniejącej instalacji?
- Czy istnieją ogólnie narzucone wymagania co do stosowanych urządzeń? (Czy dopuszczona jest wymiana urządzeń wykonawczych/pomiarowych?)
- Czy automatyzowany proces technologiczny jest dobrze znany od strony fenomenologicznej? Jaka jest trudność opracowania modelu matematycznego obiektu regulacji na poziomie szczegółowości narzucanym przez cel regulacji?
- Jakiego rodzaju kryteria jakości regulacji zostaną zastosowane?
- Jakiego rodzaju ryzyka występują w danej instalacji?
- Jakie referencje mają rozważane rozwiązania?

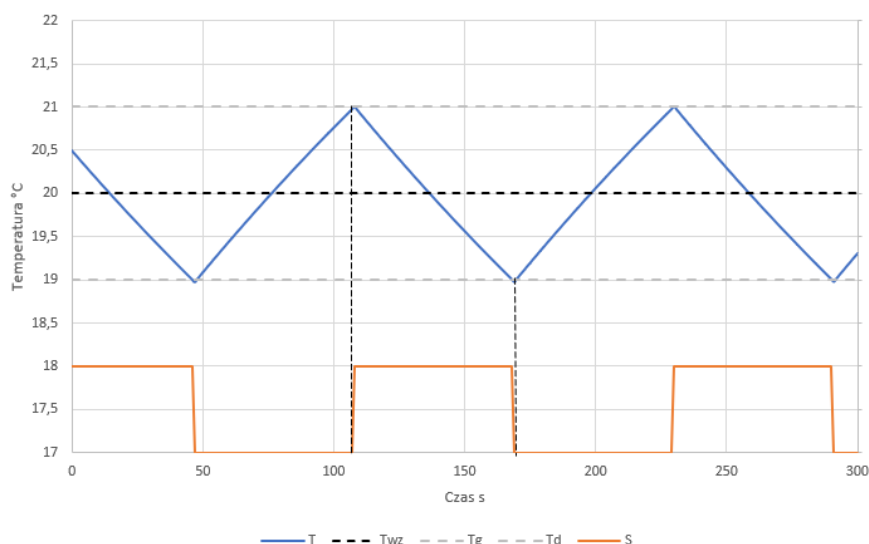
Oczywiście nad tym wszystkim górują aspekty finansowe przedsięwzięcia. Odpowiedzi na powyższe pytania mocno rzutują na rozwiązania, które pozostają w dyspozycji projektanta automatyki, a jednym z najbardziej ograniczających jest zawsze pytanie o referencje. To powoduje, że w przemyśle królują proste, sprawdzone rozwiązania, takie jak regulacja dwupołożeniowa i regulatory PID. Takie podejście jest w większości prostych problemów regulacji całkowicie akceptowalne, ponieważ zaawansowane algorytmy sterowania dla prostych zagadnień lub przy luźno zdefiniowanych wskaźnikach jakości regulacji nie

zapewniają istotnego wzrostu osiągnięć, a często wymagają rozbudowy opomiarowania i/lub dodatkowych elementów wykonawczych, czyli zwiększenia kosztów.

Najprostszą metodą sterowania jest regulacja dwupołożeniowa. Polega ona na okresowym przełączaniu elementu wykonawczego między dwoma skrajnymi położeniami (np. uruchamianie i wyłączenie klimatyzatora, otwieranie i zamykanie zaworu itp.) w odpowiedzi na oddalanie się aktualnego punktu pracy układu od zadanego stanu. Ponieważ w układach regulacji zawsze działają jakieś zakłócenia a pomiar stanu układu (temperatury) zawsze podlega pewnym zakłóceniom (tzw. szum pomiarowy), niezbędne jest wprowadzenie tzw. histerezy do sygnału sterującego. Jest to odległość między stanami (tu: wartościami temperatury) przy których następuje przełączenie elementu wykonawczego w jedną i w drugą stronę. Rysunek 68 przedstawia charakterystykę regulatora dwupołożeniowego w postaci histerezy przełączenia. Na rysunku 69 przedstawiono z kolei przykład działania takiego układu.

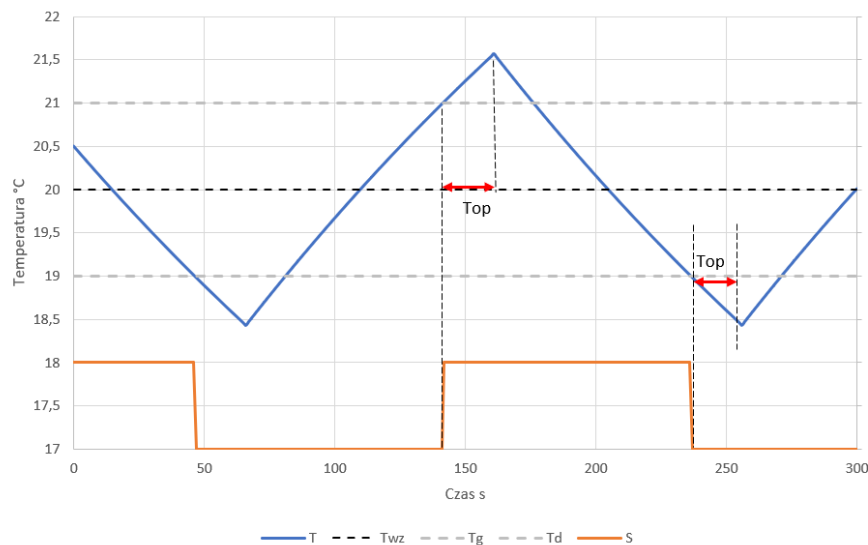


Rysunek 68. Charakterystyka regulatora dwupołożeniowego histereza przełączenia [opracowanie własne na podstawie 144]



Rysunek 69. Charakterystyka regulatora dwupołożeniowego przebieg sterowania i odpowiedzi układu [opracowanie własne],  $T$  – temperatura,  $S$  – stan,  $T_{wz}$  - wartość zadana,  $T_g$  - temperatura górna,  $T_d$  - temperatura dolna

Szerokość histerezy przełączenia powinna być większa od amplitudy sumy szumów pomiarowych sygnału regulowanego i szybkozmiennych zakłóceń losowych. Chroni to przed zbyt częstymi przełączeniami elementu wykonawczego. Z drugiej strony, jak pokazuje rysunek 70, im szersza histereza tym większa amplituda oscylacji stanu układ wokół wartości zadanej. To równocześnie stanowi największą wadę sterowania dwupołożeniowego – oscylacje wokół wartości zadanej nie da się w takich układach uniknąć. Co więcej, ich amplituda jest wrażliwa na opóźnienie transportowe występujące w obiekcie regulacji, co przedstawiono na rysunku 70. Istnieją wprawdzie metody na niwelację tego efektu, ale są one bezpieczne i skuteczne jedynie w sytuacjach, gdy opóźnienie transportowe ma stałą wartość (niezmienną w czasie), tymczasem w praktyce przemysłowej rzadko jest to prawdą.



Rysunek 70. Sterowanie dwupołożeniowe z opóźnieniem w obiekcie [opracowanie własne]

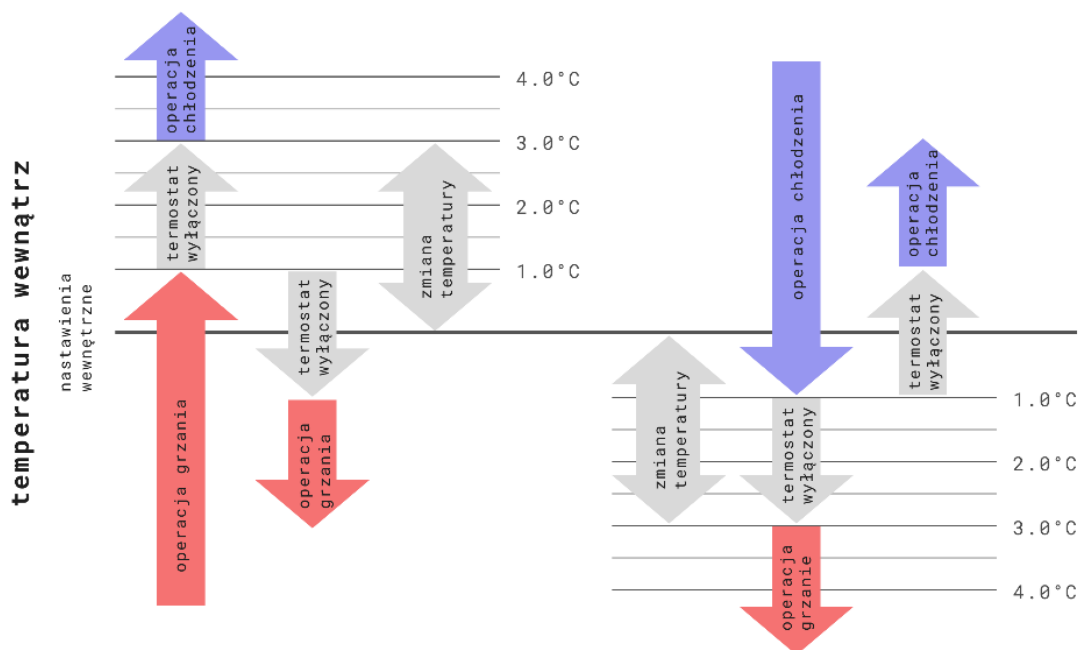
Niewątpliwą zaletą układów sterowania dwupołożeniowego jest ich prostota. Do prawidłowego nastrojenia regulatora potrzebne jest minimum wiedzy o obiekcie regulacji a parametry strojenia mają prostą, fizyczną interpretację. Elementem wykonawczym może być dowolne urządzenie, które przyjmuje polecenia sterujące w postaci pojedynczego, binarnego sygnału włącz-wyłącz (lub zamknij-otwórz itp.).

Duża wrażliwość układu na opóźnienie w obiekcie powoduje, że dobór miejsca pomiaru do regulacji staje się problematyczne. Konieczny jest kompromis między minimalizacją opóźnienia transportowego a reprezentatywnością pomiaru (sygnału do regulacji) względem regulowanego stanu obiektu. Na przykładzie klasycznego problemu klimatyzowania dużego pomieszczenia (np. biurowego): umieszczenie pomiaru temperatury blisko wylotu klimatyzatora spowoduje, że w bezpośrednim jego pobliżu temperatura będzie regulowana bardzo skutecznie, ale wpływ klimatyzatora na temperaturę w oddalonych częściach pomieszczenia będzie mała wraz odległością. Oznacza to, że mierzenie temperatury w tym miejscu jest niereprezentatywne dla pomieszczenia jako całości. Z drugiej strony umieszczenie pomiaru w oddalonej części pomieszczenia spowoduje zwiększenie opóźnienia transportowego, ponieważ powietrze z wylotu klimatyzatora musi pokonać długą drogę zanim dotrze do pomiaru i spowoduje zmianę wskazania

temperatury. To z kolei spowoduje zwiększenie amplitudy oscylacji jak na rysunku 70 oraz jeszcze większe wahania temperatury powietrza blisko wylotu klimatyzatora, co rujnuje komfort cieplny niemal w całym pomieszczeniu. Rozwiązań takiego problemu należy szukać w zmianie struktury układu klimatyzacji lub właściwego projektowania tras migracji powietrza w pomieszczeniu, ale nie jest to przedmiotem niniejszej pracy.

W rozpatrywanym układzie regulacji temperatury w serwerowni problem ten znacznie się upraszcza, ponieważ utrzymanie komfortu cieplnego, ani nawet temperatury w skali całego pomieszczenia, nie jest celem. Najważniejsze jest tu utrzymanie właściwego chłodzenia urządzeń serwerowych. Ponieważ, jak wspomniano w poprzednim punkcie, urządzenia te w większości wyposażone są we własne układy wspomagające chłodzenie, wystarczy zapewnić im dopływ odpowiednio chłodnego powietrza. Rozpływ powietrza w pomieszczeniu został tak zaprojektowany, że powietrze z klimatyzatorów wpada w pierwszej kolejności do środkowego korytarza, a następnie penetruje szafy serwerowe w kierunku zewnętrznych korytarzy przepływając wokół i przez chłodzone urządzenia. Stąd powietrze zasysane jest na powrót przez czerpnie klimatyzatorów i cykl się zamyka. Z tej perspektywy wystarczająco reprezentatywnym dla układu regulacji jest pomiar temperatury w środkowym korytarzu.

W serwerowni zastosowano klimatyzatory FDU200VSAVG z dedykowanymi sterownikami RC-EX1A. Urządzenia te udostępniają dość rozbudowane możliwości konfiguracyjne w warstwie sterowania nadrzędnego i warstwie zarządzania, jednak w warstwie bezpośredniej realizują najprostszą logikę sterowania dwupołożeniowego. Do wyboru są trzy tryby regulacji w zależności od tego czy i jak sterownik ma uwzględniać pomiar temperatury na zewnątrz budynku. Dotyczy to przełączania między trybami grzania i chłodzenia, a zatem jest to logika w warstwie sterowania nadrzędnego. Nie ma to jednak znaczenia, ponieważ w rozpatrywanym problemie interesujące jest wyłącznie chłodzenie. Rysunek 71 przedstawia zasadę działania dwupołożeniowego regulatora temperatury w sterowniku RC-EX1A [147].



◆ Aby zmienić tryb pracy (chłodzenie <-> grzanie), wymagane jest co najmniej 5-minutowe wyłączenie termostatu.

Rysunek 71. Zasada działania dwupołożeniowego regulatora temperatury w sterowniku RC-EX1A [opracowanie własne na podstawie 147]

Układ wykorzystuje histerezę przełączenia  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , tj. gdy mierzona temperatura wzrasta o  $1^{\circ}\text{C}$  powyżej temperatury zadanej klimatyzator jest uruchamiany, a gdy spada o  $1^{\circ}\text{C}$  poniżej temperatury zadanej jest wyłączany. Sama logika sterowania w warstwie bezpośredniej w ogóle nie wykorzystuje informacji z pozostałych pomiarów temperatury w układzie, w szczególności z pomiaru temperatury na zewnątrz budynku. Parametrami strojenia algorytmu jest wartość zadana temperatury oraz szerokość histerezy, którą można zmienić w granicach od  $1^{\circ}\text{C}$  do  $4^{\circ}\text{C}$ .

Najbardziej rozpowszechnioną, a za razem jedną z najstarszych metod regulacji ciągłej ze sprzężeniem zwrotnym jest regulacja proporcjonalno-całkująco-różniczkująca (PID). Jej historia sięga czasów rewolucji przemysłowej, gdy w 1765 r. James Watt skonstruował maszynę parową, w której zastosował regulator proporcjonalny, dziś nazywany regulatorem Watta [144]. Pierwszy regulator proporcjonalno-całkujący zaprezentowano w 1935 r. a pełny regulator PID w 1940 r. Krótco po tym, bo już w 1942 r., John Ziegler oraz Nathaniel Nichols opracowali technikę strojenia regulatorów PID, która w nieco zmodyfikowanej formie wykorzystywana jest do dziś. Druga połowa XX w., a w szczególności rewolucja cyfrowa, przyniosła gwałtowny rozwój automatyki i regulatorów PID. Wprowadzane innowacje sprowadzały się głównie do rozbudowy algorytmu o dodatkowe funkcjonalności, które rozwiązywały problemy napotymane podczas pracy regulatorów w warunkach rzeczywistych przy określonych ograniczeniach technicznych. Dla przykładu:

skończony zakres pracy elementów wykonawczych (efekt nasycenia) zrodził potrzebę opracowania techniki anti-windup, nieliniowość i niestacjonarność obiektów regulacji dały pole do rozwoju technik adaptacyjnych itp. Innym kierunkiem rozwoju była optymalizacja pracy regulatorów PID w różnych dziedzinach przemysłu, w których obowiązują odmienne wymagania technologiczne. Przyczyniło się to do rozwoju zróżnicowanych technik strojenia regulatorów pozwalających szybko wyznaczyć nastawy przynajmniej suboptymalne z perspektywy określonych kryteriów jakości regulacji. Jednak na przestrzeni ponad 80 lat podstawowa zasada działania regulatorów PID wykorzystywanych w przemyśle nie uległa istotnej zmianie. Jest ona opisana poniższym równaniem (2), w którym składniki sumy reprezentują kolejno część proporcjonalną, część całkującą oraz część różniczkującą.

$$u(t) = k \left( e(t) + \frac{1}{T_c} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

Gdzie:

$e(t) = w(t) - y(t)$  – uchyb regulacji,

$w(t)$  – przebieg wartości zadanej (zazwyczaj wartość stała),

$y(t)$  – przebieg mierzonej wartości procesowej podlegającej regulacji,

$u(t)$  – sygnał sterujący (wyjście regulatora podawane do elementu wykonawczego),

$k$  – wzmacnienie regulatora,

$T_c$  – stała całkowania, czas zdwojenia,

$T_d$  – stała różniczkowania, czas wyprzedzenia.

Solidną pozycję wśród algorytmów sterowania regulatory PID zawdzięczają przede wszystkim swojej prostocie, uniwersalności i odporności. Synteza układów z wykorzystaniem regulatorów PID jest co prawda nieco bardziej wymagająca niż tych z wykorzystaniem regulacji dwupołożeniowej, nadal jednak jest to zadanie względnie proste w porównaniu do innych algorytmów angażujących zaawansowany aparat matematyczny, powstało też wiele narzędzi ułatwiających inżynierom to zadanie. Prostota implementacji w dużej mierze przyczynia się do popularności algorytmu w wielu dziedzinach techniki i przemysłu, od najprostszych zastosowań domowych (np. regulacja temperatury wody w gazowych piecykach przepływowych) po szerokiej skali zastosowania przemysłowe (np. regulacja mocy cieplnej kotła w elektrowni węglowej). Dodatkowo bardzo pomocna jest dostępność wielu metod strojenia, które pozwalają uzyskać zadowalające wyniki już niewielkim nakładem pracy. W warunkach rzeczywistych bardzo rzadko można mówić o obiektach regulacji liniowych w szerokim zakresie czy stacjonarnych (tj. o parametrach niezmiennych w czasie), często też parametry obiektu regulacji nie są do końca rozpoznane. Praktyka pokazuje, że podczas strojenia regulatora PID, poświęcając w niewielkim stopniu jakość regulacji, można zyskać pewien zakres odporności algorytmu na tę niestałość lub niepewność. Dzięki temu algorytm w większości przypadków nie wymaga ponownego strojenia, gdy z biegiem czasu i starzenia się urządzeń zachowanie obiektu regulacji lub elementów wykonawczych ulegają niewielkim zmianom. Podobna

odporność algorytmu uwidacznia się podczas zmian punktu pracy (wartości zadanej), gdy w obiekcie regulacji istnieją niewielkie nieliniowości.

Ponad 80-letnia historia niezawodnej pracy w wielu różnorodnych dziedzinach przyczynia się do niekwestionowanej dominacji regulatorów PID w przemyśle, jednak opisane wyżej zalety algorytmu mają pewne negatywne konsekwencje. Automatyczne strojenie (auto-tuning) lub mnemotechniczne metody strojenia pozwalają na skuteczną syntezę układów regulacji PID bez konieczności posiadania głębokiej, specjalistycznej wiedzy z dziedziny automatyki i dynamiki układów. Autorzy tych metod zawsze jednak zaznaczają, że uzyskane za ich pomocą nastawy, choć dają dobre wyniki, są dopiero punktem wyjścia do dalszej optymalizacji. Podczas takiej optymalizacji wiedza fachowa jest już niezbędna, zwłaszcza wtedy, gdy nieprawidłowe nastrojenie regulatora może doprowadzić do niestabilności układu, a w konsekwencji do strat materialnych i przestojów produkcji. Takie ryzyko dodatkowo zniechęca do poszukiwania optymalnych nastaw. W efekcie zaskakująco duża część układów regulacji w przemyśle jest słabo nastrojona [148], a przejawem tego braku optymalności może być zwiększenie energochłonności układu regulacji lub nawet całego procesu technologicznego.

Zastosowanie ciągłej regulacji z wykorzystaniem regulatora PID wymaga aby element wykonawczy w obwodzie sterowania miał możliwość przyjmowania stanów pośrednich między dwoma skrajnymi. Niestety model klimatyzatora FDU200VSAVG nie posiada takiej funkcjonalności, co szczegółowo opisane jest w następnym rozdziale. Istnieją co prawda metody sterowania oparte o regulatory PID z wyjściem dwustanowym, jednak wymagają one aby element wykonawczy był zdolny do zmiany stanu z relatywnie wysoką częstotliwością (w odniesieniu do dominującej stałej czasowej obiektu regulacji), podczas gdy bezpieczna eksploatacja sprężarki wymaga, aby przełączanie jej stanu odbywało się nie częściej niż co 3 minuty („compressor inching prevention”).

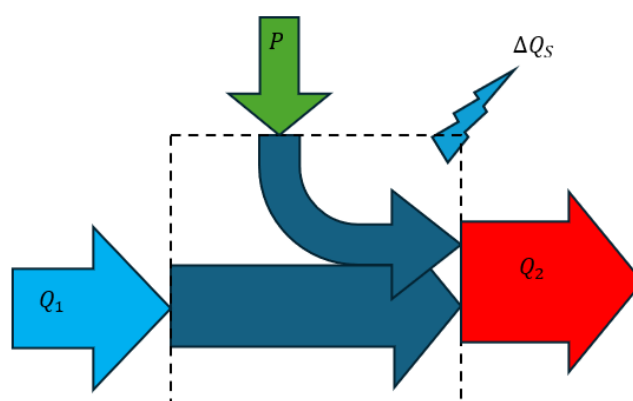
W ostatnich latach, ze względu na inicjatywy klimatyczne, coraz silniejszy nacisk wywierany jest na energooszczędność budynków i układów klimatyzacyjnych, co wypukliło dość poważne ograniczenia klasycznych algorytmów sterowania. Przyczyniło się to do wzrostu wysiłków naukowych w kierunku adaptacji rzadziej używanych algorytmów sterowania, które potencjalnie mogłyby poradzić sobie z równoczesnym zapewnieniem komfortu cieplnego oraz optymalizacją zużycia energii układów klimatyzacyjnych [146, 149-150]. Prowadzone są też prace w kierunku wykorzystania w zagadnieniu nowych technologii takich jak sztuczna inteligencja [151] czy Internet-of-Things [152]. Z drugiej strony zwrócono uwagę, że choć nowe metody regulacji wykazują poprawę energooszczędności, to jednak osiągi te w dużej mierze zależą od złożoności układu urządzeń klimatyzacyjnych, struktury budynku oraz nakładu pracy poświęconej szczegółowemu modelowaniu i strojeniu układów regulacji [145]. Kiedy wymienione warunki nie są spełnione osiągi zaawansowanych algorytmów są niewiele lepsze od metod klasycznych, które z kolei górują nad bardziej skomplikowanymi metodami łatwością implementacji. Szczególnie problematyczny jest problem modelowania obiektu regulacji oraz strojenia algorytmów ponieważ do kosztów w sprzecznie dokładany jest koszt związany z pracą wykwalifikowanych inżynierów. Jeśli modelowanie i strojenie będzie

musiało zostać wykonane indywidualnie dla każdego obiektu, to koszty te będą ponoszone każdorazowo, a to w ogólnym rachunku ekonomicznym może okazać się nieopłacalne. Problem ten otwiera interesujące możliwości przed algorytmami opartymi o sztuczną inteligencję (AI). Aspekt uczenia się (adaptacji) takich algorytmów może do pewnego stopnia zmniejszyć, a może nawet wyeliminować konieczność ręcznego modelowania i strojenia układów regulacji czyniąc je tym samym bardziej dostępnymi.

#### 6.4.3 Klimatyzator jako element wykonawczy

Kluczowym elementem układu chłodzenia serwerowni jest urządzenie klimatyzacyjne FDU200VSAVG produkcji Mitsubishi Heavy Industries Ltd. z dedykowanymi sterownikami RC-EX1A. Jest to pompa ciepła typu powietrze-powietrze, która przystosowana jest zarówno do pracy w kierunku chłodzenia jak i ogrzewania. Z perspektywy omawianego systemu klimatyzacji serwerowni istotny jest jedynie tryb chłodzenia, ale w istocie praca w kierunku grzania odbywa się według dokładnie tych samych zasad i wykorzystuje te same procesy termodynamiczne.

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki naturalnie zachodzący proces wymiany ciepła między dwoma ośrodkami zawsze zachodzi w kierunku z ośrodka cieplejszego do ośrodka chłodniejszego [141]. Pompa ciepła jest to maszyna cieplna, która pozornie łamie tę zasadę. Ujmując rzecz możliwie najprościej wykorzystuje ona pewną ilość dostarczonej z zewnątrz energii  $P$  (w przypadku pomp sprężarkowych energii mechanicznej) aby wymusić przepływ ciepła  $Q_1$  z ośrodka chłodniejszego do ośrodka cieplejszego, przy czym ciepło uzyskane na „gorącym końcu” pompy jest w przybliżeniu ich sumą, tj.  $Q_2 \cong Q_1 + P$ . Jeśli agregat zlokalizowany jest w ośrodku ogrzewanym, to równość jest pełna. W przeciwnym wypadku ciepło  $Q_2$  jest pomniejszone o straty ciepła  $\Delta Q_S$  w urządzeniu. Klasycznym przykładem elektrycznych pomp ciepła są chłodziarki i zamrażarki oparte o technologię znaną już od 1913 r. Uproszczony schemat bilansu mocy pompy ciepła przedstawiono na rysunku 72 poniżej.

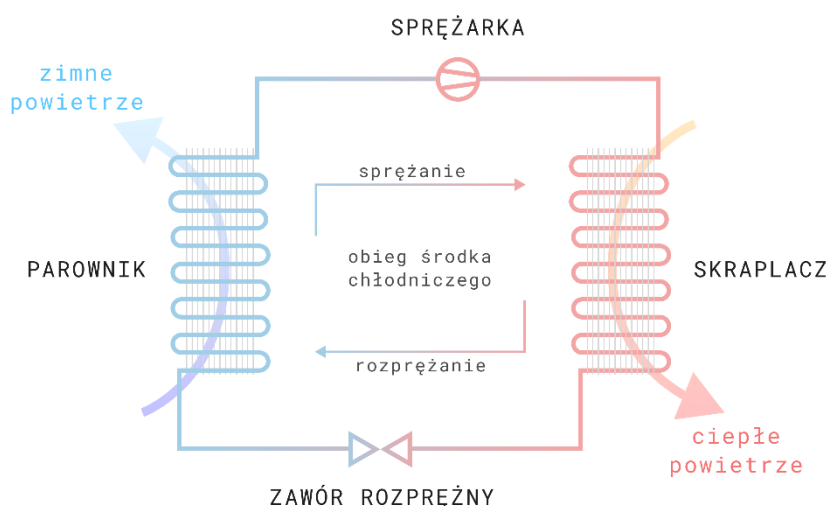


Rysunek 72. Uproszczony schemat bilansu mocy pompy ciepła [opracowanie własne]

Praca pompy ciepła opiera się na silnej zależności temperatury parowania medium roboczego od ciśnienia oraz na zjawisku termodynamicznym polegającym na zmianie temperatury medium podczas przemiany adiabatycznej (sprężanie i rozprężanie adiabatyczne). Aby prawidłowo wykorzystać to zjawisko



medium robocze krążące w obiegu wewnętrznym pompy musi posiadać specyficzne, odpowiednio dopasowane właściwości termodynamiczne. Decydują one o zakresie roboczym pompy oraz o jej efektywności. Niestety najczęściej są to związki chemiczne lub mieszaniny związków, które mogą być toksyczne, szkodliwe dla środowiska, lub trudne do zsyntetyzowania przez co relatywnie kosztowne. W agregacie FDU200VSAVG wykorzystywana jest jeszcze mieszanina pentafluoroetanu i difluorometanu o oznaczeniu R-410A. Jest to mieszanina należąca do grupy freonów, która co prawda nie jest trująca dla człowieka, jednak ma szkodliwy wpływ na środowisko. Przyczynia się do powstawania dziury ozonowej i charakteryzuje się wysoką wartością współczynnika GWP na poziomie 2088. Oznacza to, że ma on 2088-krotnie wyższy wpływ na globalne ocieplenie niż dwutlenek węgla. Z tych względów czynnik ten, zgodnie z regulacjami UE, zostanie wycofany z produkcji do 2025 r. i w urządzeniach o pojemności przekraczającej 3kg (do których zalicza się agregat FDU200VSAVG) musi zostać zastąpiony przez alternatywny czynnik roboczy spełniający wymogi środowiskowe. Uproszczony schemat ideowy pompy ciepła przedstawiono na rysunku 73.



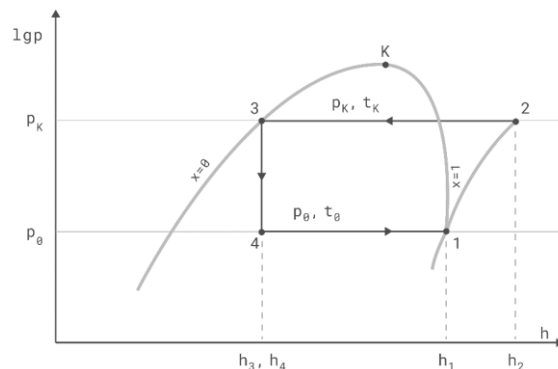
Rysunek 73. Uproszczony schemat ideowy pompy ciepła [opracowanie własne]

Na rysunku 73 wyróżniono następujące podstawowe urządzenia:

- **Parownik** – wymiennik ciepła, w którym następuje odparowanie czynnika roboczego w warunkach niskiego ciśnienia. Aby mogło do tego dojść temperatura parowania czynnika przy ciśnieniu panującym w parowniku musi być niższa od temperatury ośrodka chłodzonego. Zachodzi tu normalna wymiana ciepła zgodnie z drugą zasadą termodynamiki. W modelu FDU200VSAVG (praca w trybie chłodzenia) rolę parownika pełni jednostka zabudowana wewnątrz pomieszczenia (FDU200VG). Jest ona wyposażona w wentylatory wymuszające prawidłowy przepływ powietrza przez wymiennik, równocześnie zapewniające cyrkulację powietrza w całym pomieszczeniu,

- **Sprężarka** – dokonuje sprężenia czynnika i przetłacza go do skraplacza. Proces ten, przebiega w sposób zbliżony do przemiany adiabatycznej (adiabata nieodwracalna), podczas której wraz ze wzrostem ciśnienia czynnika roboczego wzrasta również jego temperatura. Im wyższa wartość wykładnika adiabaty medium roboczego tym silniejszy jest ten efekt, co w pewnym stopniu zwiększa wydajność pompy ciepła,
- **Skraplacz** – wymiennik ciepła, w którym następuje izobaryczne wychłodzenie oraz ponowne skroplenie czynnika roboczego poprzez oddawanie ciepła do ośrodka ogrzewanego. Proces ten następuje w istotnie wyższym ciśnieniu i temperaturze w porównaniu do parownika. Osiągalna rozpiętość temperatur między parownikiem a skraplaczem zależy przede wszystkim od właściwości czynnika roboczego, a dokładniej od zależności jego temperatury skraplania od ciśnienia. Podczas pracy klimatyzatora w trybie chłodzenia rolę skraplacza pełni wymiennik w agregacie zabudowanym na zewnątrz budynku. Przepływ powietrza odbierającego ciepło z wymiennika jest wymuszany przez wentylatory,
- **Zawór rozprężny** – jest to zawór, przez który czynnik w postaci ciekłej przepływa na powrót do parownika. Stanowi on istotny opór hydrauliczny na drodze tego przepływu co decyduje o utrzymaniu różnicy ciśnień między wymiennikami. Na zaworze następuje rozprężenie w przybliżeniu izentalpowe, obniżenie temperatury czynnika, ale również częściowe jego odparowanie.

Opisane wyżej przemiany termodynamiczne składają się na cykl Lindego, którego diagram przedstawiono na rysunku 74.

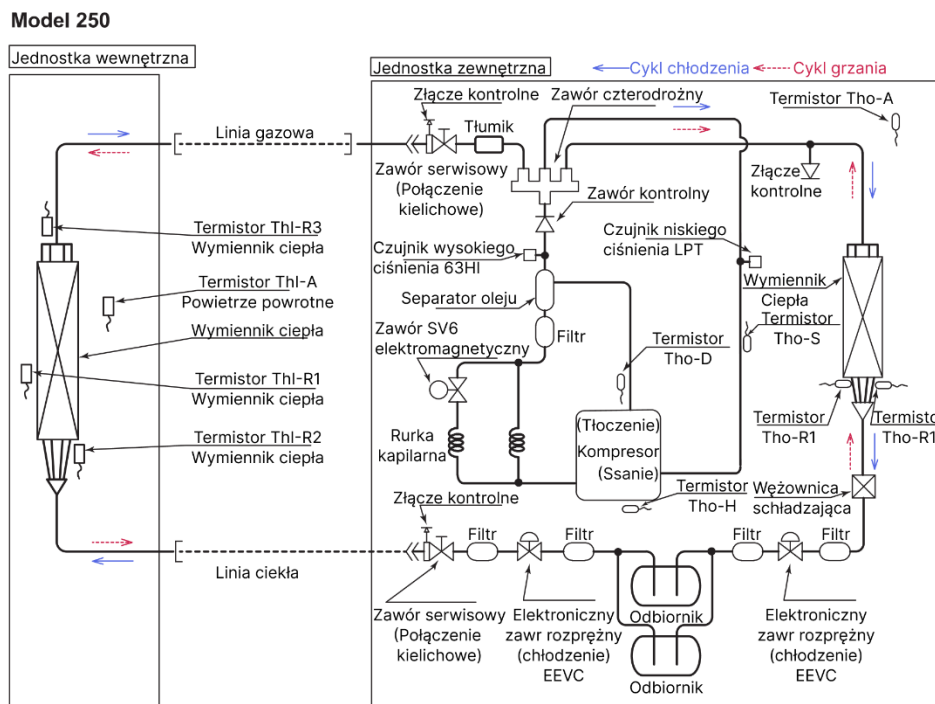


Rysunek 74. Cykl Lindego, jednostopniowy obieg w układzie  $lg p-h$  [opracowanie własne na podstawie 144]

Na diagramie wyróżniono kolejne przemiany na tle charakterystyki  $p-h$  (ciśnienie-entalpia) czynnika roboczego:

- 1-2 – sprężenie adiabatyczne,
- 2-3 – schładzanie i kondensacja,
- 3-4 – rozprężanie na zaworze,
- 4-1 – odparowanie.

Budowa rzeczywistej pompy ciepła jest oczywiście znacznie bardziej złożona. Na rysunku 75 przedstawiono ideowy schemat budowy wewnętrznej klimatyzatora FDU250VSAVG [147].



Rysunek 75. Schemat ideowy budowy wewnętrznej klimatyzatora FDU250VSAVG [opracowanie własne na podstawie 147]

Należy zwrócić uwagę, że agregat może pracować zarówno w kierunku grzania jak i chłodzenia. Zmiana trybu pracy na ogrzewanie polega na odwróceniu ról wymienników ciepła, wymiennik znajdujący się wewnątrz pomieszczenia staje się skraplaczem a wymiennik na zewnątrz budynku – parownikiem. Obieg czynnika napędzany jest tą samą sprężarką, przy czym kierunkiem przepływu medium zawiaduje zbroczone zaworowe (4-way valve). Urządzenie ponadto wyposażone jest w zbiornik buforowy (receiver) służący do gromadzenia czynnika do celów remontowych oraz rozbudowany układ olejowy sprężarki. Urządzenie wyposażone jest ponadto w liczne opomiarowanie, które pozwala na monitorowanie stanu urządzenia i czuwanie nad prawidłowym przebiegiem procesu, w szczególności nad prawidłową pracą sprężarki, która jest najbardziej wrażliwym na uszkodzenia urządzeniem w obiegu.

W zależności od realizowanego przez pompę ciepła zadania, dla użytkownika istotne będzie albo ciepło pobierane z ośrodka zimnego  $Q_1$  (chłodzenie) albo ciepło oddawane do ośrodka cieplejszego  $Q_2$  (grzanie), stąd też do oceny chwilowej efektywności energetycznej pompy wykorzystuje się dwa wskaźniki: odpowiednio EER (Energy Efficiency Ratio) lub COP (Coefficient of Performance) definiowane wzorami 3 i 4:

$$EER = \frac{Q_1}{P} \quad (3)$$

$$COP = \frac{Q_2}{P} \quad (4)$$

Oba te współczynniki są bardzo wrażliwe na warunki, w jakich pracuje pompa ciepła. Należą do nich przede wszystkim temperatura początkowa (na wlocie parownika) i przepływ czynnika chłodzonego oraz temperatura początkowa (na wlocie skraplacza) i przepływ czynnika ogrzewanego. Tabela 14 przedstawia zależność wydajności chłodzenia  $Q_1$  od temperatury otoczenia na zewnątrz budynku oraz temperatury powietrza w chłodzonym pomieszczeniu [147].

Tabela 14. Zależność wydajności chłodzenia  $Q_1$  od temperatury otoczenia na zewnątrz budynku oraz temperatury powietrza w chłodzonym pomieszczeniu

T	Temperatura powietrza wewnętrznego															
	18°C DB	18°C DB	21°C DB	21°C DB	23°C DB	23°C DB	26°C DB	26°C DB	27°C DB	27°C DB	28°C DB	28°C DB	31°C DB	31°C DB	34°CDB B	34°CDB B
	12°C WB	12°C WB	14°C WB	14°C WB	16°C WB	16°C WB	18°C WB	18°C WB	19°C WB	19°C WB	20°C WB	20°C WB	12°C WB	12°C WB	12°C WB	12°C WB
°CDB	TC	SHC	TC	SHC	TC	SHC	TC	SHC	TC	SHC	TC	SHC	TC	SHC	TC	SHC
11					24,64	19,66	26,08	21,18	26,80	20,97	27,60	20,77	29,20	21,89	30,80	21,40
13					24,67	19,67	26,11	21,19	26,83	20,98	27,63	20,78	29,23	21,90	30,83	21,41
15					24,69	19,68	26,14	21,20	26,86	20,99	27,66	20,79	29,26	21,91	30,86	21,42
17					24,70	19,68	26,23	21,23	26,99	21,04	27,78	20,83	29,34	21,93	30,91	21,43
19					24,81	19,73	26,33	21,27	27,13	21,09	27,90	20,87	29,43	21,96	30,96	21,44
21					24,43	19,57	25,90	21,11	26,67	20,92	27,43	20,72	28,96	21,81	30,48	21,31
23					24,05	19,42	25,47	20,95	26,20	20,76	26,96	20,56	28,49	21,67	30,01	21,18
25			22,51	19,96	23,86	19,35	25,25	20,87	25,97	20,68	26,73	20,48	28,25	21,60	29,77	21,12
27			22,33	19,88	23,67	19,27	25,04	20,79	25,74	20,60	26,85	20,52	27,96	21,51		
29			21,97	19,73	23,27	19,11	24,61	20,64	25,30	20,45	26,44	20,39	27,57	21,40		
31			21,61	19,57	22,88	18,96	24,19	20,49	24,87	20,30	26,03	20,25	27,18	21,28		
33	20,01	18,05	20,94	19,29	22,49	18,81	23,77	20,34	24,44	20,15	25,62	20,12	26,80	21,17		
35	19,87	17,99	20,68	19,18	22,10	18,65	23,35	20,19	24,00	20,00	25,21	19,98	26,41	21,05		
37	19,61	17,87	20,42	19,07	21,78	18,53	22,94	20,04	23,56	19,85	24,66	19,80	25,76	20,86		
39	19,51	17,82	20,33	19,03	21,65	18,48	22,72	19,96	23,30	19,76	24,30	19,69	25,30	20,73		
41	20,09	18,09	20,57	19,13	21,47	18,41	22,44	19,87	22,98	19,65	23,88	19,55	24,77	20,57		
43	19,02	17,60	19,85	18,83	21,05	18,25	21,92	19,68	22,41	19,46	23,19	19,33	23,96	20,34		
46	17,16	16,77	17,71	17,36	18,29	17,21	18,93	18,56	19,55	18,52	20,41	18,46	21,26	19,57		
50	11,31	11,08	11,84	11,60	12,45	12,20	12,74	12,49	12,94	12,69	13,14	12,88	13,35	13,08		

gdzie:

$T_{pz}$  – temperatura powietrza zewnętrznego,

DB – dry bulb – temperatura suchego termometru,

WB – wet bulb – temperatura mokrego termometru,

TC – total cooling capacity – całkowita wydajność chłodnicza ( $Q_1$ ),

SHC – sensible heat capacity – wydajność chłodnicza bez uwzględnienia skraplania wilgoci z powietrza.

Można zauważyć, że zgodnie z definicją istnieje związek między tymi współczynnikami:  $COP \cong EER + 1$ , ale jest to prawdą jedynie podczas pracy pompy w kierunku grzania jak i chłodzenia w identycznych warunkach termodynamicznych. Na ogół jednak, jeśli pompa ciepła wykorzystywana jest do

obu zadań, jak to ma miejsce w przypadku klimatyzatorów, to zachodzi to przy różnych warunkach zewnętrznych.

Alternatywą do sterowania dwupołożeniowego temperaturą w klimatyzowanym pomieszczeniu jest regulacja ciągła, wymaga ona jednak aby element wykonawczy realizujący zadanie sterowania miał zdolność do przyjmowania stanów pośrednich między dwoma skrajnymi, najlepiej w sposób ciągły. Niewątpliwą zaletą takiego podejścia jest potencjalna możliwość istotnego obniżenia zużycia energii przez system klimatyzacji, jednak sterowanie wydajnością pompy ciepła jest nietrywialnym zadaniem [153].

Można to osiągnąć na kilka sposobów:

- sterowanie przepływem powietrza po stronie parownika – zmiana wydajności wentylatorów powietrza w chłodzonym pomieszczeniu,
- sterowanie przepływem powietrza po stronie skraplacza – zmiana wydajności wentylatorów w agregacie na zewnątrz budynku,
- sterowanie cyrkulacją czynnika roboczego pompy – zmiana wydajności sprężarki.

Pierwsze dwa podejścia rozpatrywane pojedynczo mają niewielką skuteczność, dodatkowo zmniejszanie przepływu powietrza w pomieszczeniu poniżej wartości nominalnej jest niekorzystne, ponieważ zwiększa opóźnienie transportowe w obiekcie regulacji utrudniając zadanie stabilizacji temperatury. Popularnym podejściem do zagadnienia jest zastosowanie sprężarki o zmiennych obrotach. Skuteczność tego rozwiązania jest jednak ograniczona ze względu na problem gwałtownie malejącej efektywności energetycznej sprężarek o zmiennej prędkości [154] podczas oddalania się od punktu optymalnego (BEP – best efficiency point). Należy przy tym zachować wymagane warunki termodynamiczne w parowniku i skraplaczu aby zagwarantować prawidłowy przebieg procesu, co nakłada kolejne ograniczenia na elastyczność urządzenia. Podejściem alternatywnym jest regulacja obciążeniowa przy stałym wysterowaniu sprężarki, jednak oszczędność energii w takiej architekturze jest mocno ograniczona.

Wykorzystywane w analizowanym systemie regulacji temperatury w pomieszczeniu model urządzenia klimatyzacyjnego FDU200VSAVG jest wyposażony w sprężarkę z falownikiem, ale nie umożliwia on płynnego sterowania wydajnością. Zgodnie z informacjami producenta zawartymi w dokumentacji techniczno-ruchowej sprężarka została wyposażona w falownik w celu ochrony urządzenia przed pracą w niekorzystnych warunkach, tj. prędkość obrotowa sprężarki jest obniżana gdy:

- wymiennik pracujący jako parownik („zimny koniec”) jest zagrożony obładaniem,
- temperatura czynnika roboczego na wylocie ze sprężarki jest zbyt wysoka,
- ciśnienie czynnika roboczego na wylocie ze sprężarki jest zbyt wysokie,
- ciśnienie czynnika na wlocie do sprężarki jest zbyt niskie,
- kombinacja ciśnienia i temperatury czynnika roboczego na wlocie do sprężarki wychodzi poza obszar bezpieczny (ryzyko odparowania czynnika na króćcu ssawnym sprężarki),
- silnik sprężarki jest zagrożony przeciążeniem (zbyt wysoki prąd).

Ponadto falownik wykorzystywany jest do stopniowego zwiększania prędkości obrotowej sprężarki podczas jej uruchamiania (funkcjonalność „soft-start”) oraz do redukcji hałasu wytwarzanego przez sprężarkę w trybie cichym.

Samo urządzenie jak i sterownik RC-EX1A nie udostępniają sygnału analogowego, za pomocą którego byłoby możliwe nastawianie wydajności klimatyzatora, nie jest też możliwe bezpośrednie sterowanie wydajnością sprężarki w obszarze ograniczonym przez opisane wyżej warunki bezpiecznej eksploatacji. Jedyna możliwość zbudowania ciągłego układu regulacji temperatury w serwerowni w oparciu o urządzenie FDU200VSAVG wymagałaby bezpośredniej ingerencji w wewnętrzne algorytmy sterowania urządzeniem lub nawet całkowitego przebudowania istniejącego układu sterowania. Byłoby to jednak działanie łamiące warunki gwarancyjne producenta i wychodzi poza zakres niniejszej pracy.

#### *6.4.4 Optymalizacja sterowania w oparciu o dostępne pomiary temperatury w serwerowni*

Praca układu chłodzenia serwerowni jest stale monitorowana z wykorzystaniem trzech grup urządzeń pomiarowych:

- Pomiary podstawowe skupiające najważniejsze parametry pracy serwerowni, do których należą pomiary temperatury służące do sterowania klimatyzatorami. Wartości te odczytywane są w sposób ciągły, co zapewnia płynną pracę klimatyzatorów, jednak do systemu archiwizacji danych trafiają jedynie wartości średnie z kolejnych przedziałów 15-to minutowych,
- Pomiary dodatkowe zostały zainstalowane na potrzeby niniejszych badań w korytarzach: zimnym i ciepłym serwerowni. Pomiary te zbierane są zdarzeniowo (tj. z nieregularnym okresem próbkowania) za każdym razem, gdy zostanie wykryta zmiana mierzonego parametru w amplitudzie przekraczającej wartość nieznacznie większą od amplitudy szumu pomiarowego,
- Pomiary kontrolne, do których należą czujniki rozmieszczone indywidualnie w każdym z chłodzonych urządzeń serwerowych. Dostęp do tych danych jest ograniczony i służy jedynie weryfikacji czy podstawowe zadanie układu chłodzenia jest spełniane.

W niniejszym rozdziale analizie podlegają zarejestrowane przebiegi z następujących punktów pomiarowych:

1. Sumaryczna moc czynna urządzeń serwerowych (próbkowanie co 15min) – jest to strumień energii stanowiący sumę uzysków ciepła w chłodzonym pomieszczeniu. W przybliżeniu całość tej energii musi zostać usunięta z pomieszczenia za pomocą klimatyzatorów,
2. Sumaryczne zużycie energii klimatyzatorów (próbkowanie co 15min) – suma energii pobieranej przez pracujące klimatyzatory do zasilania sprężarek, wentylatorów strony pierwotnej i wtórnej oraz elektroniki sterującej,
3. Temperatury procesowe (próbkowanie co 15min) – pomiary służące do sterowania klimatyzatorami (PV – process value). Do 9.03.2023 r. były to pomiary zabudowane w jednostkach sterujących RC-EX1A klimatyzatorów. Od 10.03.2023r pomiary zostały podmienione na urządzenia zainstalowane po stronach wlotowych szaf serwerowych,

4. Wartości zadane temperatury dla klimatyzatorów (próbkowanie co 15min),
5. Temperatura otoczenia (próbkowanie co 15min) – temperatura na zewnątrz budynku wykorzystywana w logikach nadrzędnych sterowników RC-EX1A, która ma istotny wpływ na wydajność klimatyzatorów,
6. Temperatura w korytarzu „zimnym” (próbkowanie zmienne) – temperatura powietrza schłodzonego mierzona pod sufitem korytarza między szafami serwerowymi. Temperatura ta nie jest reprezentatywna dla każdego klimatyzatora z osobna, ale jej umiejscowienie pozwala wnioskować o skuteczności pracy całego zespołu urządzeń klimatyzacyjnych,
7. Temperatury w korytarzach „ciepłych” (próbkowanie zmienne) – pomiary umiejscowione pod sufitami korytarzy po zewnętrznych stronach serwerów na trasie powietrza z serwerów do czepni klimatyzatorów.

### Analiza zgrubna, całościowa

Analizie podlegają pomiary zebrane w okresie od 01.01.2023 r. do 31.05.2023 r. W analizowanym przedziale czasu należy wyróżnić cztery istotne daty:

- 01.02.2023r. – serwery zostały doposażone w nowe urządzenia, które nieznacznie zwiększyły uzyskać ciepła w pomieszczeniu do ok. 26,3 kW,
- 24.02.2023r. – rozpoczęcie prac nad optymalizacją sterowania klimatyzatorów,
- 04.03.2023r. – kolejna rozbudowa serwerów, zwiększenie średniej mocy do 28,8 kW,
- 10.03.2023r. – przełączenie sterowników klimatyzatorów na korzystanie z pomiarów temperatury powietrza na wlocie do czterech grup szaf serwerowych w charakterze pomiarów procesowych.

Do uporządkowania, wczytania, obróbki i wizualizacji danych pomiarowych napisano skrypt w języku Python. Na rysunku 76 przedstawiono kod do wczytania danych pomiarowych.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy import optimize
```

```
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

Mounted at /content/drive

```
%cd '/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks/'
```

/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks

```
table1 = pd.read_excel('KS133_Serwerownia_
↳SO_ENERGIA_20230101_20230531_Temperatury Istotne i liczniki.xlsx',
↳sheet_name='KS133_Serwerownia SO_ENERGIA_20')
```

```
table1['nrmeter'] = table1['nrmeter'].str.strip()
table1['name'] = table1['name'].str.strip()
table1['unit'] = table1['unit'].str.strip()
```

```
K_full = {}
series_names = table1.groupby('nrmeter')['name'].unique()
series_units = table1.groupby(['nrmeter', 'name'])['unit'].unique()

for nrmeter, names in series_names.items():
    K_full[nrmeter] = {}
    for name in names:
        tmp = table1.query('nrmeter == @nrmeter').query('name == @name')
        K_full[nrmeter][name] = pd.Series(data=tmp['value'], name=nrmeter + '_'
↳+ name)
        K_full[nrmeter][name].index = tmp['timestamp']
```

Rysunek 76. Kod programu do wczytywania danych

Na rysunku 77 przedstawiono przykładowy kod programu służący do wyświetlania danych.

```
time_start = pd.Timestamp('2023.01.01 00:00')
time_stop = pd.Timestamp('2023.06.01 00:00')

K = {}
for nrmeter, names in series_names.items():
    K[nrmeter] = {}
    for name in names:
        K[nrmeter][name] = K_full[nrmeter][name].loc[time_start:time_stop]

ax_N = len(K)
fig, axes = plt.subplots(ax_N, 1, layout='constrained')
fig.set_size_inches(11, ax_N*3)

for (nrmeter, names), ax in zip(series_names.items(), axes):
    for name in reversed(names):
        series = K[nrmeter][name]
        ax.plot(series, label=series.name)

    ax.legend(loc='best')
    ax.grid()
    ax.set_ylabel(series_units[nrmeter][name][0])
```

Rysunek 77. Kod programu pozwalający na wyświetlanie danych obejmujący cały okres analizy

Na kolejnym rysunku 78 przedstawiono przykładowy kod programu, który pozwolił korelację dla wybranych parametrów.



```

fig, ax = plt.subplots(1, 1, layout='constrained')
fig.set_size_inches(5,4)

Corr = pd.merge(K['523.1035155']['MocCzynnaSum'], K['523.
↳1035157']['MocCzynnaSum'], left_index=True, right_index=True)

ax.plot(Corr['523.1035155_MocCzynnaSum'],Corr['523.1035157_MocCzynnaSum'], '.', label='Ps vs Pk')

ax.legend(loc='best')
ax.grid()
ax.set_xlabel('Moc serwerów [kW]')
ax.set_ylabel('Moc klimatyzatorów [kW]')

#calculate equation for trendline
z = np.polyfit(Corr['523.1035155_MocCzynnaSum'],Corr['523.
↳1035157_MocCzynnaSum'], 1)
p = np.poly1d(z)

#add trendline to plot
plt.plot(Corr['523.1035155_MocCzynnaSum'], p(Corr['523.1035155_MocCzynnaSum']))

Corr['523.1035155_MocCzynnaSum'].corr(Corr['523.1035157_MocCzynnaSum'])

```

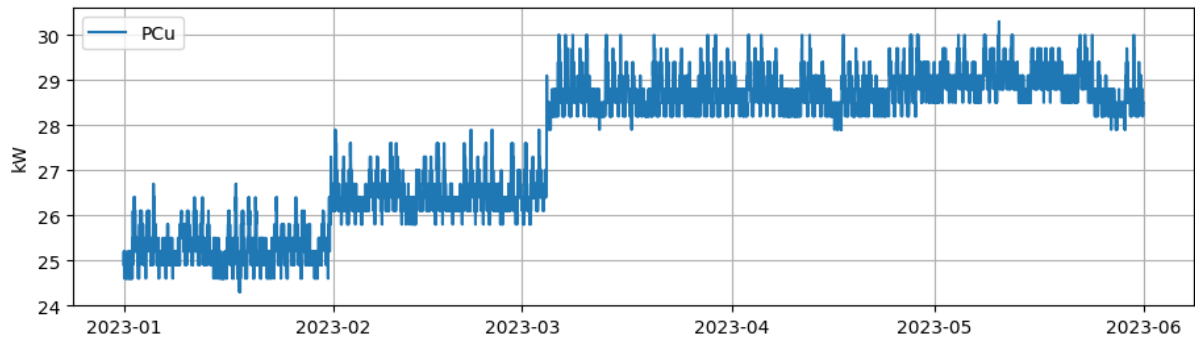
Rysunek 78. Kod programu służący do określenia korelacji między mocą klimatyzatorów a mocą serwerów

Na wykresach rysunki 79-81 przedstawiono przebiegi zmierzonych wielkości obejmujący cały okres analizy. Prezentacja wyników w całym zakresie pozwoliła wyciągnąć ogólne wnioski z pracy urządzeń w serwerowni, oraz pokazać skutki podjętych działań usprawniających pracę klimatyzatorów. Na wykresach przedstawiono następujące rejestrowane parametry:

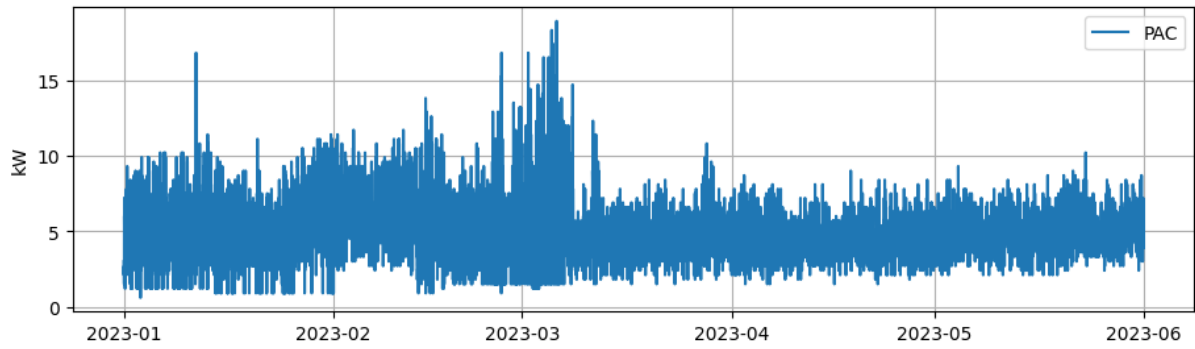
- Moc serwerów –  $P_{CU}$ , kW,
- łączna moc klimatyzacji -  $P_{AC}$ , kW,
- Temperatuty zadane klimatyzatorów -  $T_{AC1}$ ,  $T_{AC2}$ ,  $T_{AC3}$ ,  $T_{AC4}$ , °C,
- Temperatuty mierzone przez klimatyzatory -  $T_{Meas1}$ ,  $T_{Meas2}$ ,  $T_{Meas3}$ ,  $T_{Meas4}$ , °C,
- Temperatura zewnętrzna -  $T_{OUT}$ , °C,
- Temperatura lewego gorącego korytarza -  $T_{LHC}$ , °C,
- Temperatura prawego gorącego korytarza -  $T_{RHC}$ , °C,
- Temperatura pod sufitem zimnego korytarza -  $T_{celCC}$ , °C.

Na rysunku 79 przedstawiono przebiegi rejestrowane z częstotliwością 15 minut. Na kolejnym rysunku 80 przebiegi których wartości uśredniano w okresach godzinowych, natomiast na rysunku 81 przedstawiono przebiegi, dla których uśrednianie następowało w okresach 24 godzinnych.

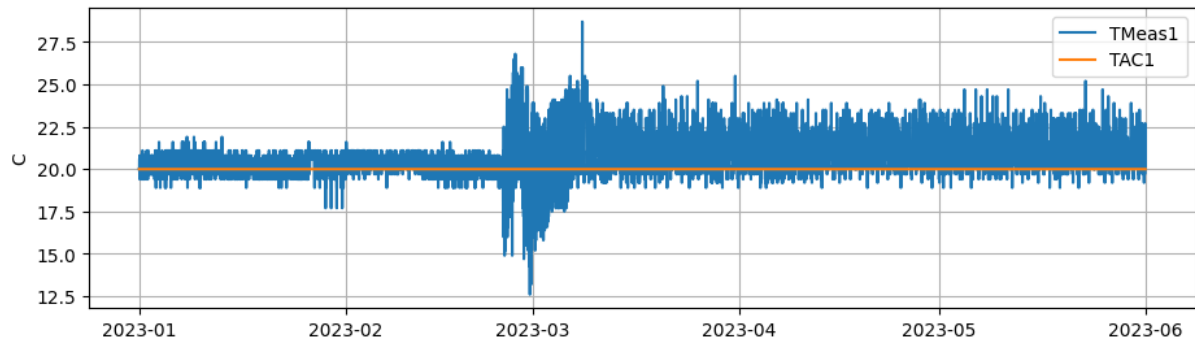
a)



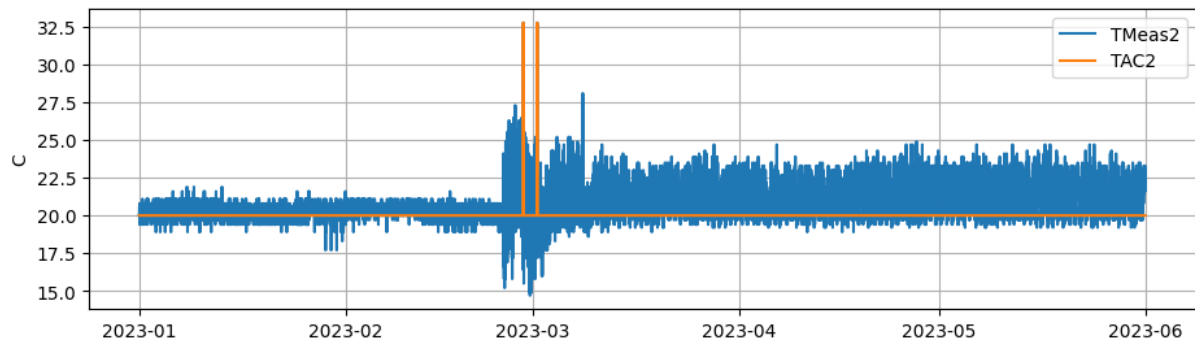
b)

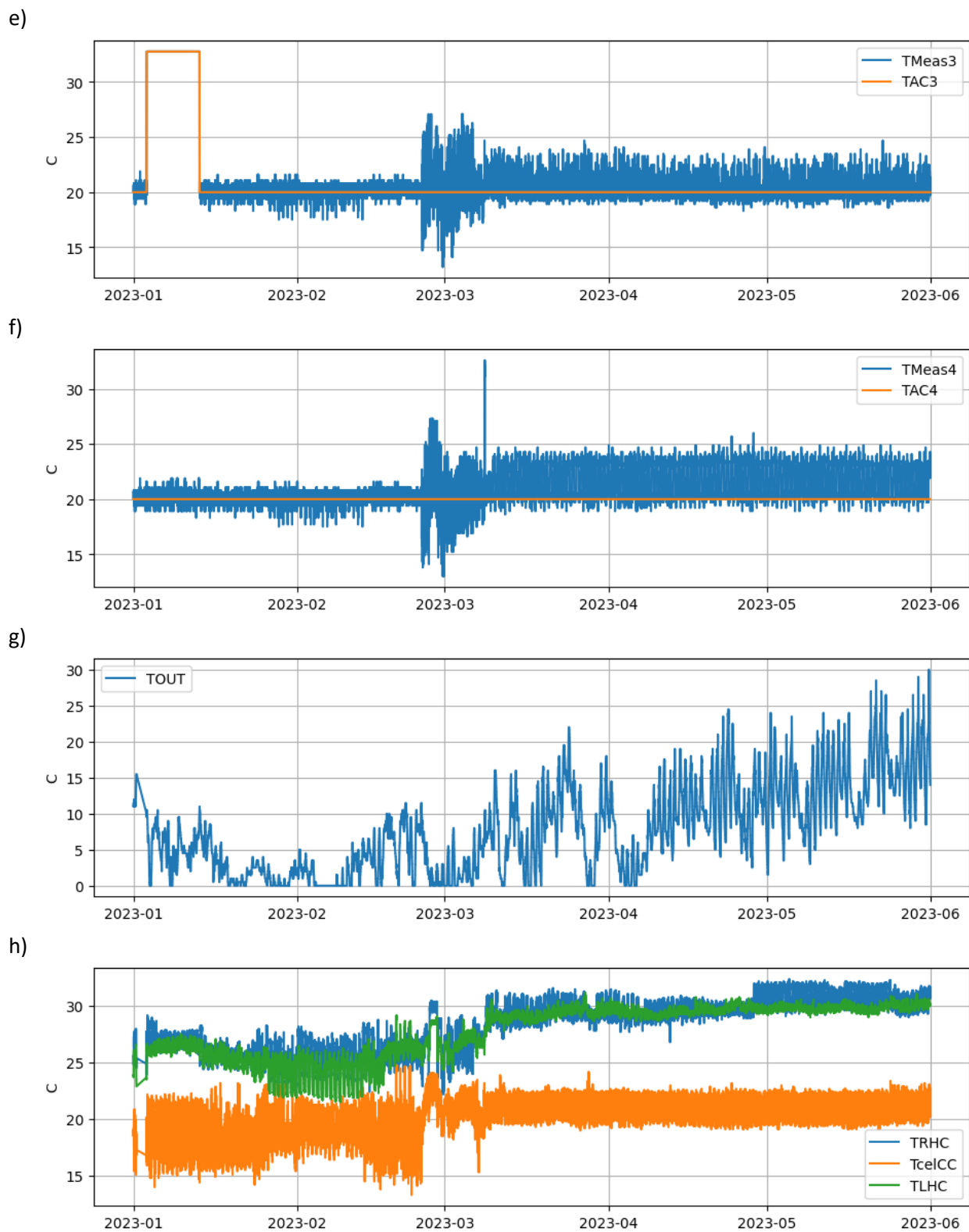


c)



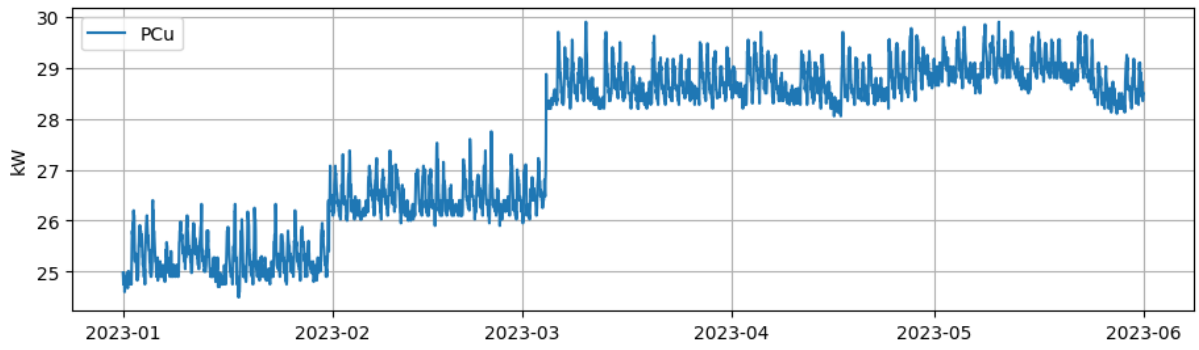
d)



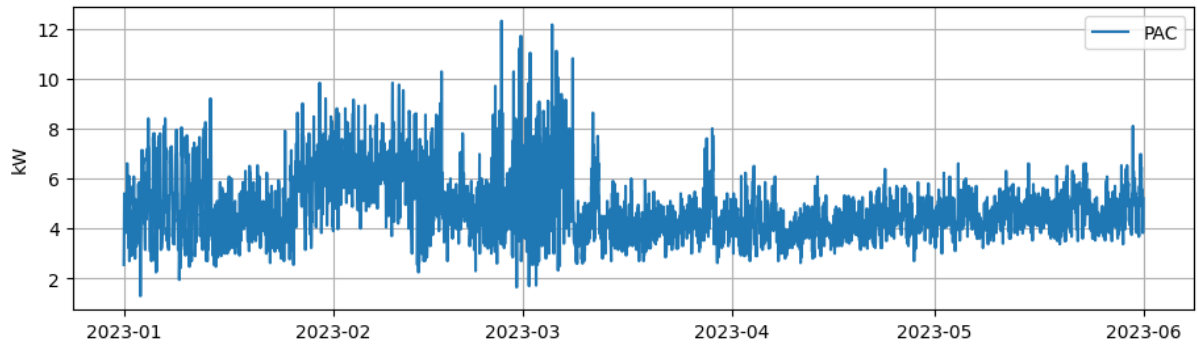


Rysunek 79. Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych obejmujące cały analizowany okres, a)  $P_{Cu}$ , b)  $P_{AG}$ , c)  $T_{AC1}$ ,  $T_{Meas1}$ , d)  $T_{AC2}$ ,  $T_{Meas2}$ , e)  $T_{AC3}$ ,  $T_{Meas3}$ , f)  $T_{AC4}$ ,  $T_{Meas4}$ , g)  $T_{OUT}$ , h)  $T_{LHC}$ ,  $T_{RHC}$ ,  $T_{celCC}$

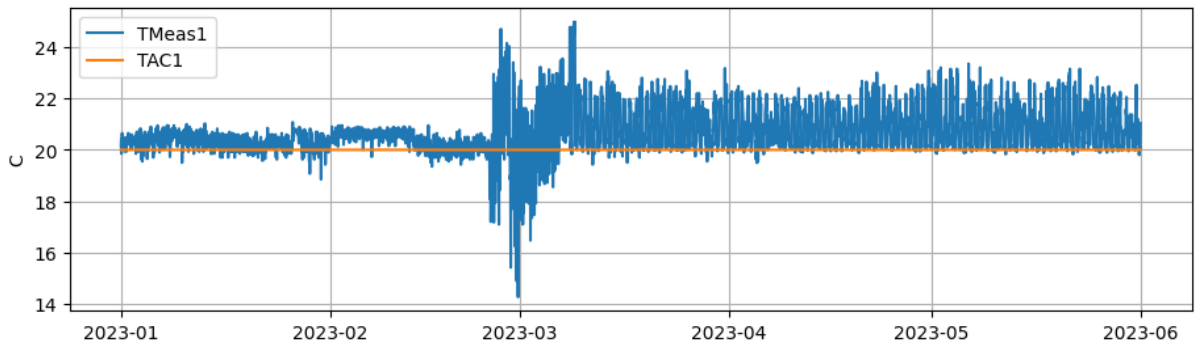
a)



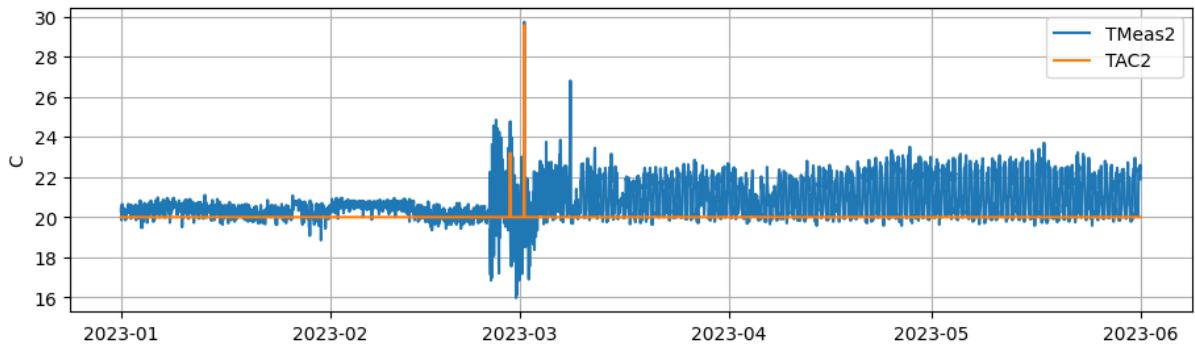
b)



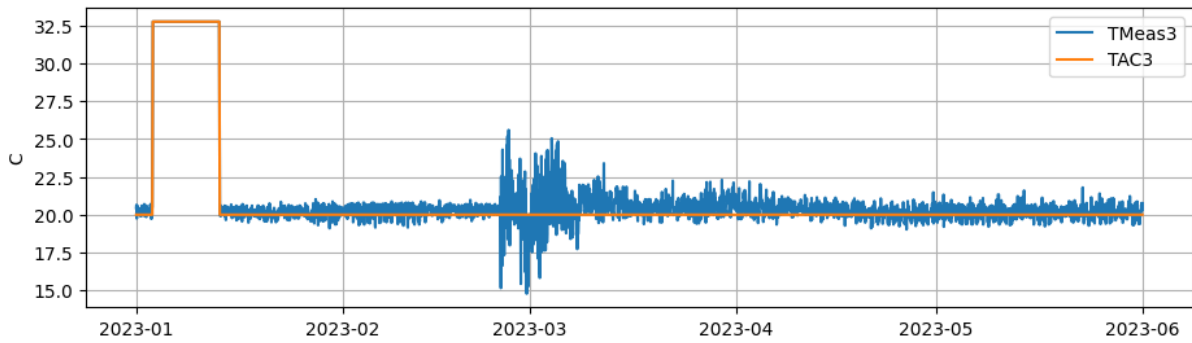
c)



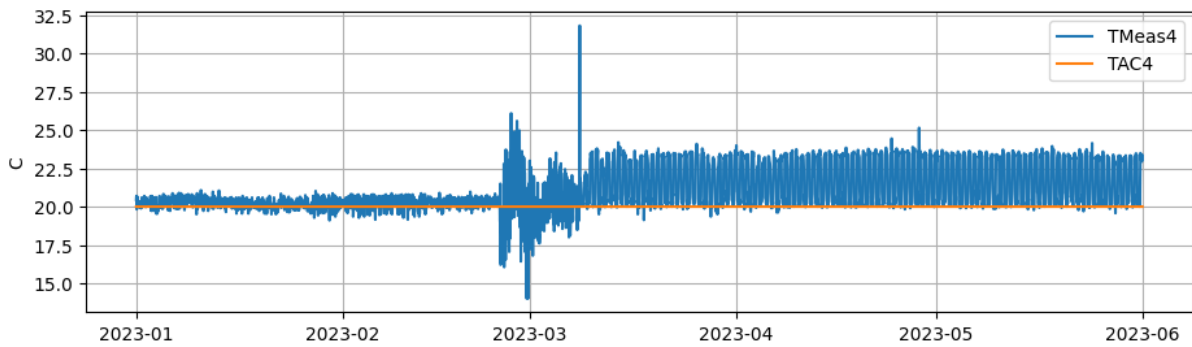
d)



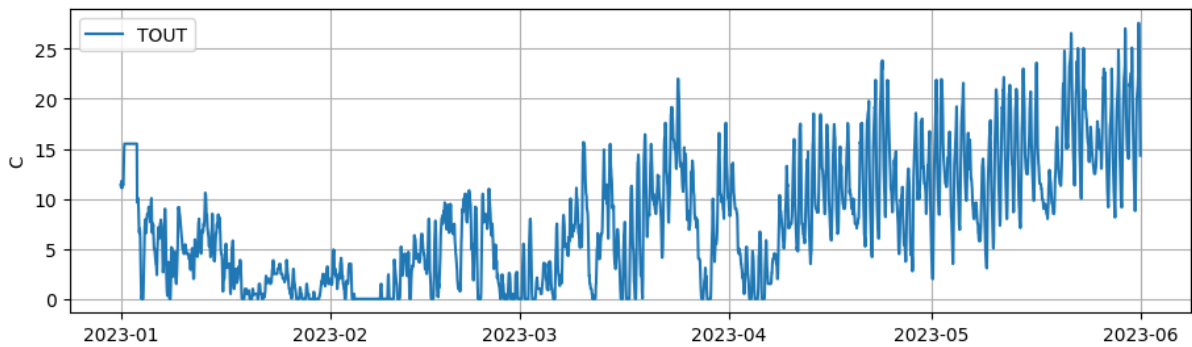
e)



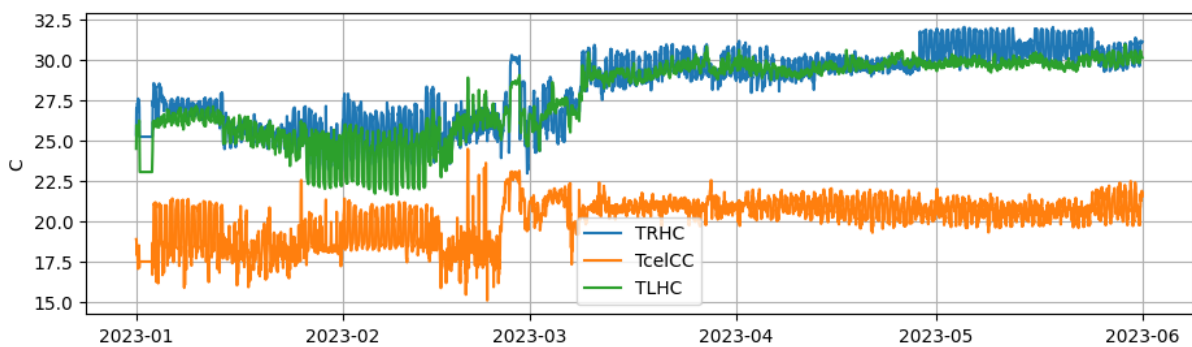
f)



g)

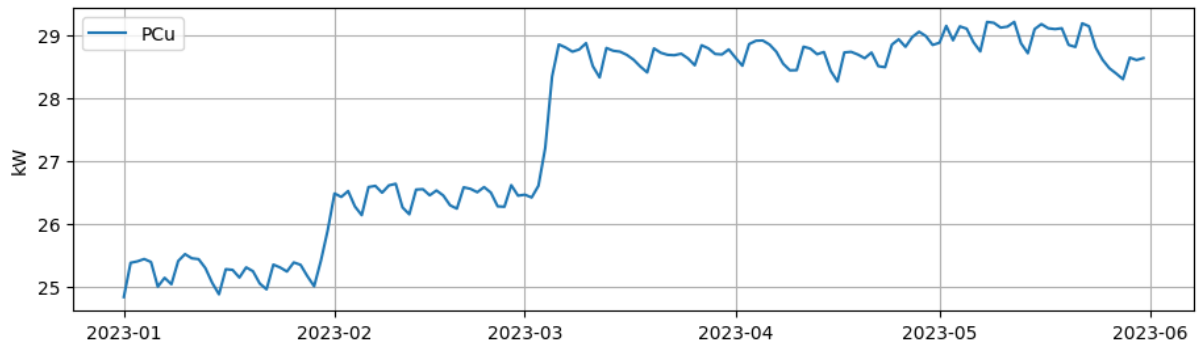


h)

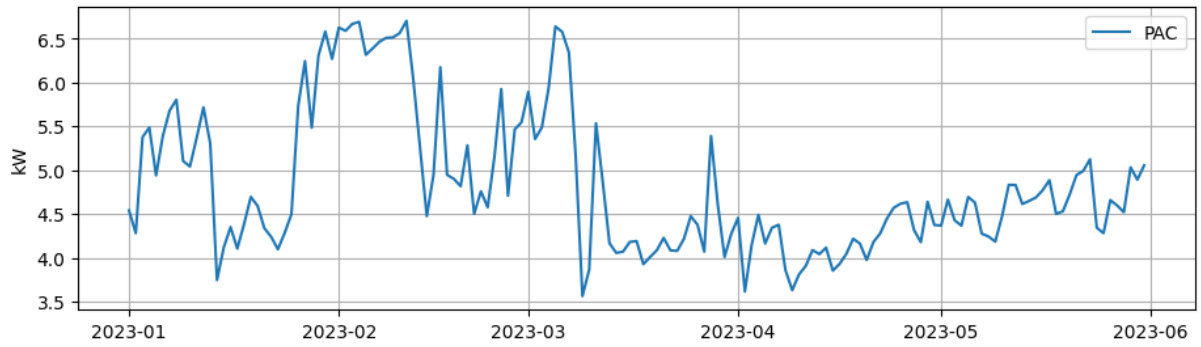


Rysunek 80. Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych – uśredniane w okresach 1 godzinnych - obejmujące cały analizowany okres, a)  $P_{Cu}$ , b)  $P_{AG}$ , c)  $T_{AC1}$ ,  $T_{Meas1}$ , d)  $T_{AC2}$ ,  $T_{Meas2}$ , e)  $T_{AC3}$ ,  $T_{Meas3}$ , f)  $T_{AC4}$ ,  $T_{Meas4}$ , g)  $T_{OUT}$ , h)  $T_{LHG}$ ,  $T_{RHG}$ ,  $T_{celCC}$

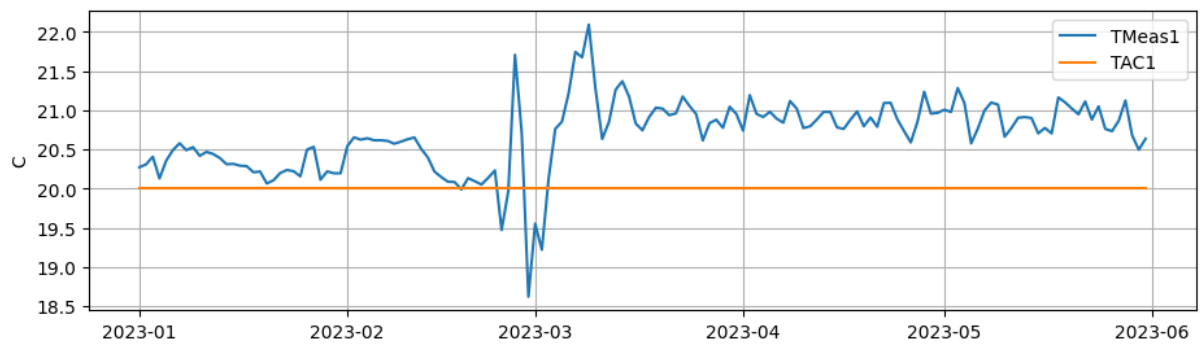
a)



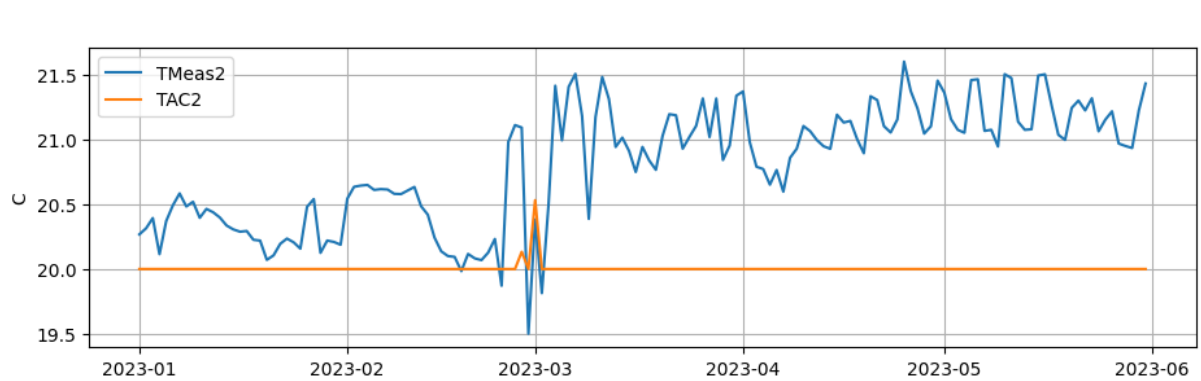
b)



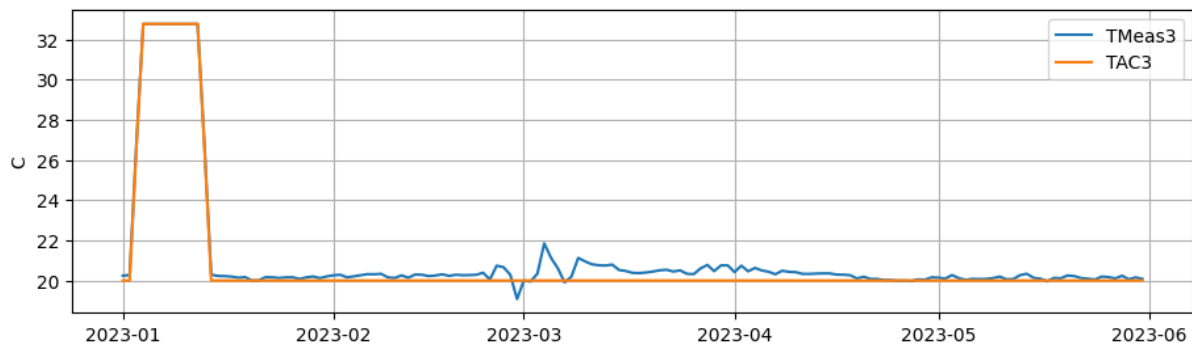
c)



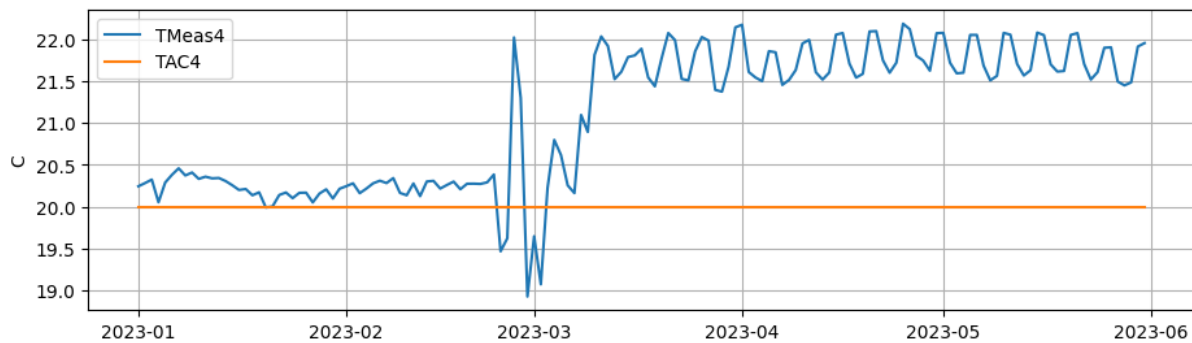
d)



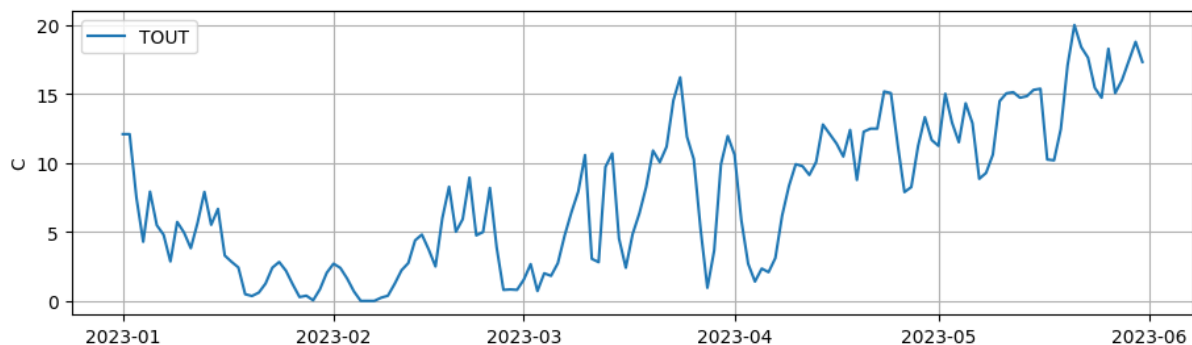
e)



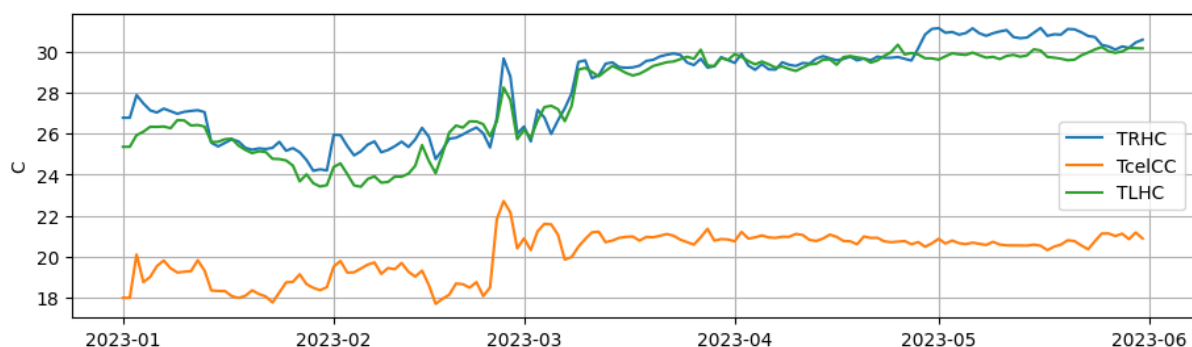
f)



g)



h)



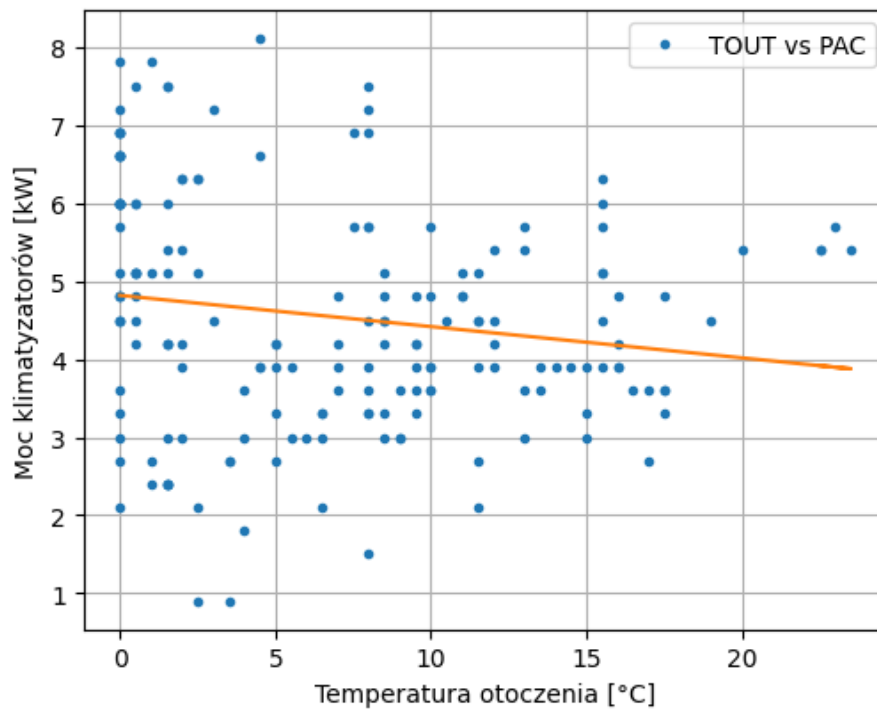
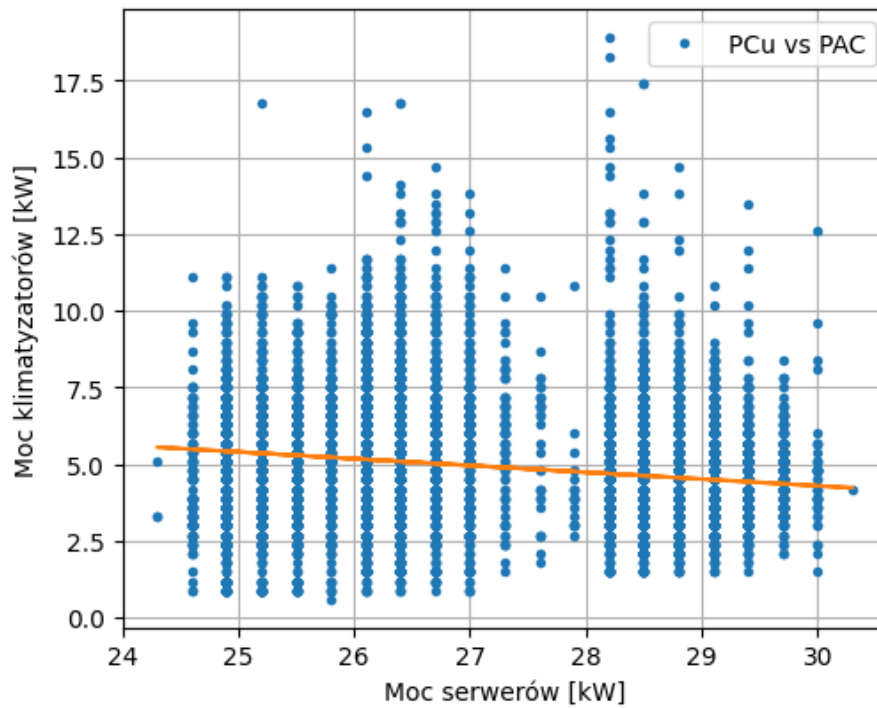
Rysunek 81. Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych – uśredniane w okresach 24 godzinnych - obejmujące cały analizowany okres, a)  $P_{Cu}$  b),  $P_{AC}$  c)  $T_{AC1}$ ,  $T_{Meas1}$ , d)  $T_{AC2}$ ,  $T_{Meas2}$ , e)  $T_{AC3}$ ,  $T_{Meas3}$ , f)  $T_{AC4}$ ,  $T_{Meas4}$ , g)  $T_{OUT}$ , h)  $T_{LHC}$ ,  $T_{RHC}$ ,  $T_{celCC}$

W analizowanym okresie na wykresach prezentujące zmiany mocy serwerów (rys.79-81 a) widać dwukrotnie zwiększenie obciążenia (1 lutego i 8 marca). Jest to wynikiem dodania dodatkowych urządzeń w serwerowni. Kolejny rejestrowany parametr to moc klimatyzacji (rys. 79-81 b). Niezależnie czy wielkości

uśredniano czy rejestrowano w odstępach 15 minutowych, widać dużą zmienność mocy, w okresie do 9 marca. Amplitudy ulegają znacznemu obniżeniu po dniu 9 marca. Co więcej wydaje się, że nie istnieje żadna korelacja między zmianą obciążenia serwerów, a zmianą mocy klimatyzacji. Na kolejnych (rys. 79-81 c-f) przedstawiono temperatury rejestrowane przez czujniki klimatyzatorów oraz temperaturę zadaną (20°C). Na wykresie dla 3 klimatyzatora w okresie 02 stycznia – 12 stycznia nastąpiła przerwa w rejestracji wynikająca z błędnego ustawienia temperatury zadanej do wartości 33°C. Niezależnie od czasu próbkowania wyników, nastąpiła zmiana kształtu przebiegów. Należy zauważyć, że przebiegi regulowanych temperatur miały początkowo mniejsze wariacje, a po wprowadzonych zmianach (po 9 marca) uległy one znacznemu zwiększeniu. Jest to jednak pozorne „pogorszenie” pracy klimatyzatorów. Porównując te przebiegi z przebiegiem mocy klimatyzatorów można dostrzec, że zmiana w istocie przyniosła poprawę, przede wszystkim pod względem obniżenia mocy pobieranej przez układ chłodzenia. Kolejny wykres (rys. 79-81 g) prezentuje wartości temperatury zewnętrznej. Z uwagi na dobrany czujnik temperatury zewnętrznej wartości ujemne nie są rejestrowane - ujemne wartości przyjmowane są jako 0. Na ostatnich wykresach (rys. 79-81 h) przedstawiono wartości temperatur w korytarzu zimny (pomiar był wykonywany przy suficie) oraz w korytarzach ciepłych z prawej i lewej strony. Niezależnie od częstotliwości próbkowania zauważono, że w okresie do 9 marca, praca klimatyzatorów jest niestabilna czego efektem są duże amplitudy temperatury w korytarzu zimnym – mieszczą się w zakresie od 13,5°C do nawet 25°C. Po wprowadzeniu zmian (po 9 marca) następują stabilna praca klimatyzatorów, zakres zmian temperatury w korytarzu zimnym mieści się w przedziale od 18,5°C do 23°C. Dodatkowym potwierdzeniem faktu stabilnej pracy klimatyzatorów po wprowadzonych zmianach są przebiegi temperatur w korytarzach ciepłych. Widać wyraźnie mniejsze wariacje zmian temperatur w okresie od 9 marca oraz większą stabilność temperatur w okolicach 30°C.

Przedstawione powyżej spostrzeżenia zostały zweryfikowane poprzez dodatkowe analizy. Pierwszą z nich jest przeprowadzenie analizy dwóch korelacji pomiędzy mocą klimatyzacji, a mocą serwerów oraz mocą klimatyzacji, a temperaturą zewnętrzną. Te dwa parametry wybrano na podstawie określenia istotności parametrów opisanych w rozdziale 6.3. Do określenia tych korelacji napisano skrypt przedstawiony na rys. 78. Natomiast na rys. 82 przedstawiono wyniki analizy przeprowadzonej dla całego analizowanego okresu.





Rysunek 82. Korelacja między mocą klimatyzacji, a: a) mocą serwerów (-0,189), b) temperaturą zewnętrzną (-0,166)

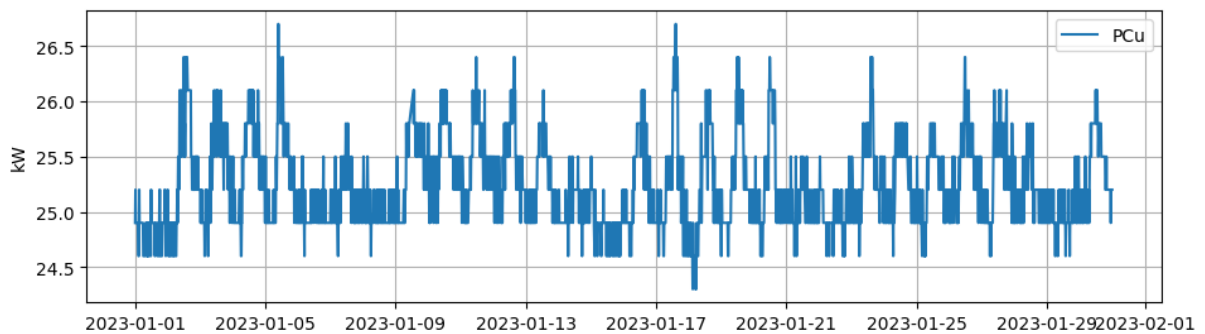
Przedstawiona analiza świadczy o niskiej korelacji między analizowanymi parametrami. Co więcej w obu przypadkach ujemna wartość współczynników świadczy, że wzrostem mocy serwerów i temperatury zewnętrznej zmniejsza się moc klimatyzacji. Choć dla temperatury zewnętrznej mogłoby to być częściowo wytłumaczalne, gdzie sprawność klimatyzatorów maleje wraz obniżeniem wartości temperatury zewnętrznej (tabela 14), to dla w przypadku mocy serwerów nie da się tego wytłumaczyć. Stąd kolejne analizy zostały przeprowadzone dla mniejszych charakterystycznych okresów. Obejmowały one trzy okresy.

Dla ułatwienia czytelników ich interpretację, obejmują one analogiczne przedziały i nazwy, jak te zaprezentowane w rozdziale 6.2.3. Ze względu na trwające prace optymalizacyjne dane z okresu od 24.02.2023r. do 09.03.2023r. (włącznie) zostały wyłączone z analizy. Pozostałe dane analizowano w trzech przedziałach:

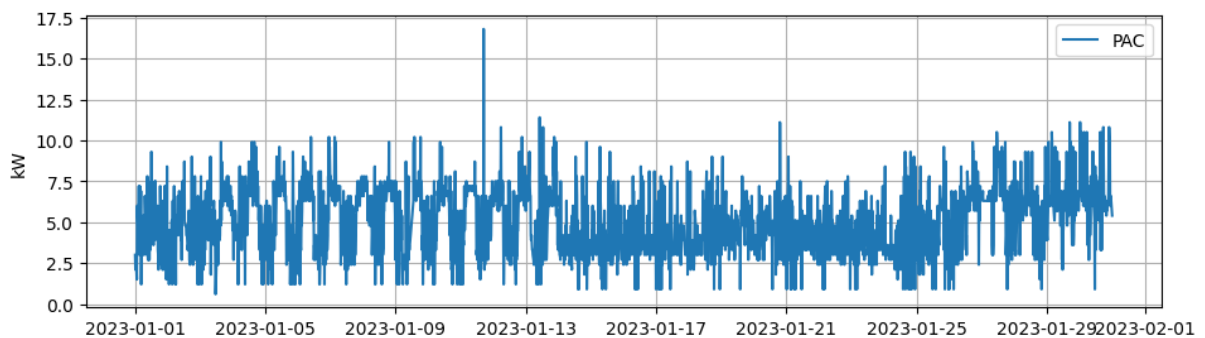
1. Od 01.01.2023r. do 31.01.2023r. – przed pierwszą zmianą mocy serwerów (Okres 2),
2. Od 01.02.2023r. do 24.02.2023r. – po pierwszej zmianie mocy, a przed pracami optymalizacyjnymi (Okres 3),
3. Od 10.03.2023r. do 31.05.2023r. – po zakończeniu prac optymalizacyjnych (Okres 4).

Na rysunku 83 przedstawiono wyniki uzyskane w drugim okresie (O2).

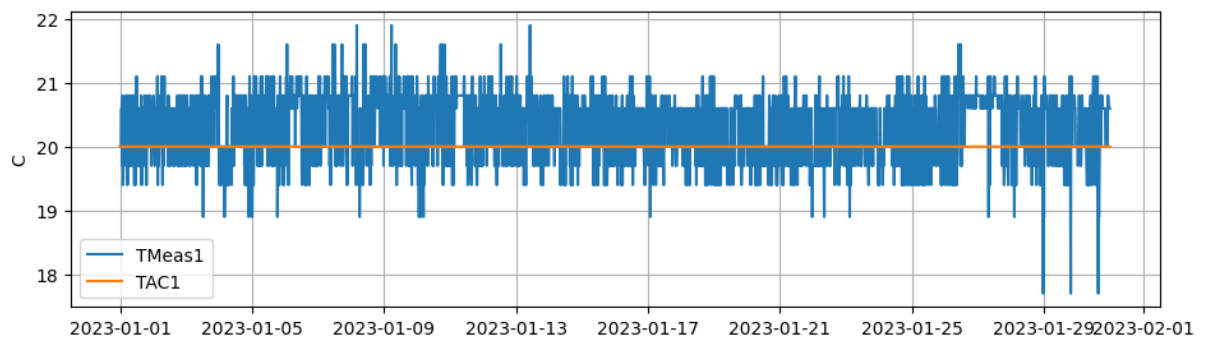
a)

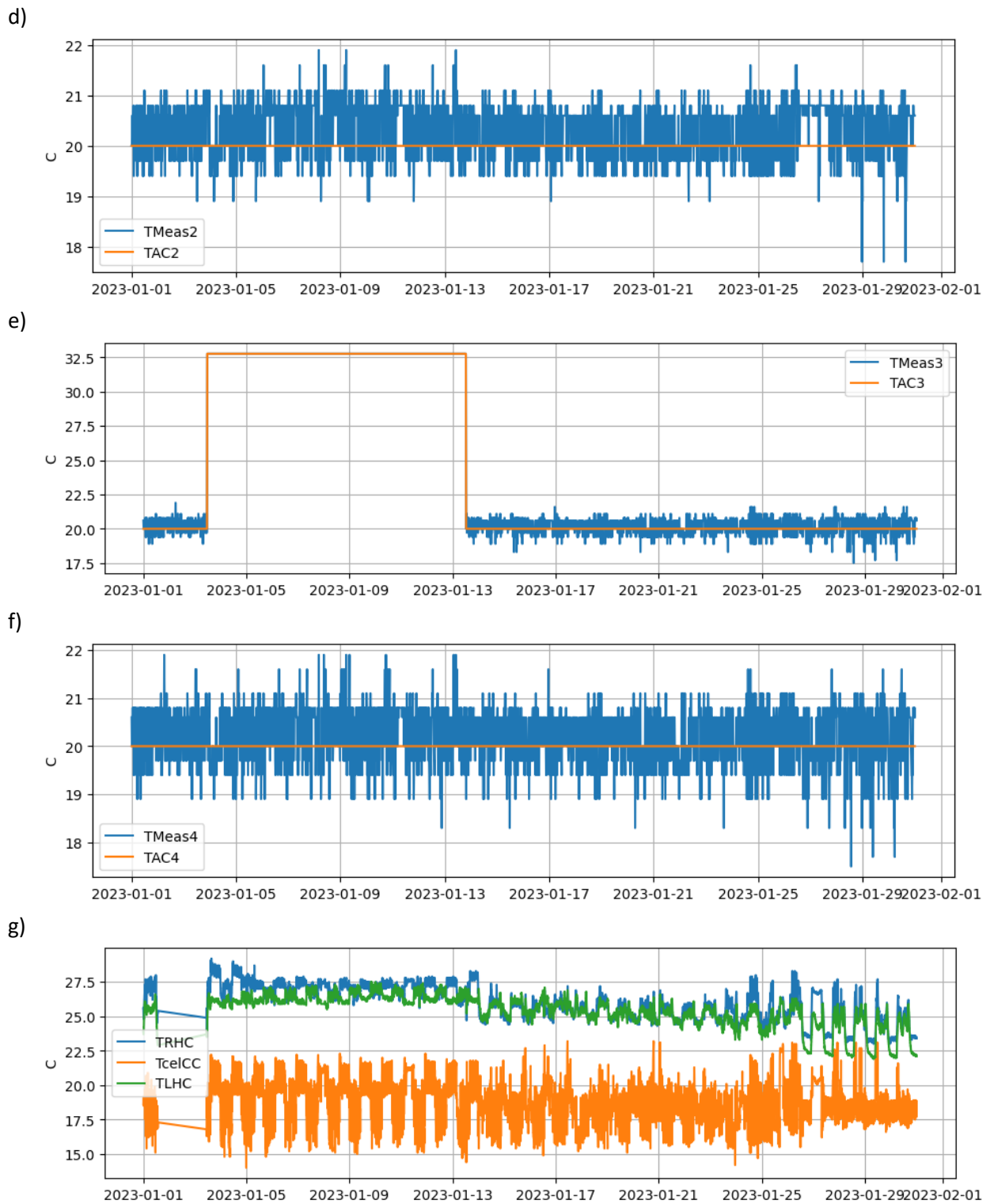


b)

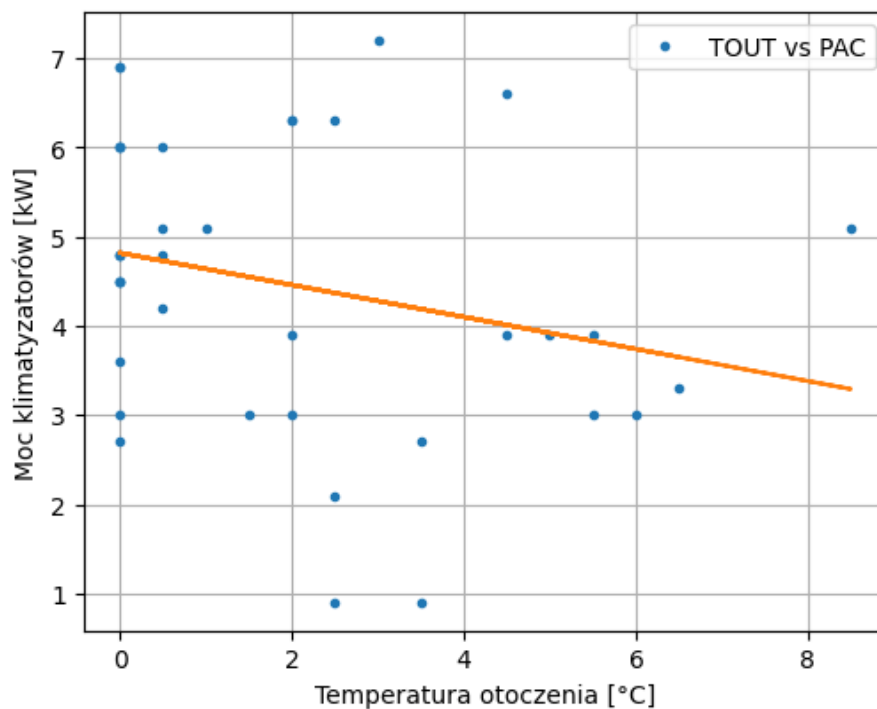
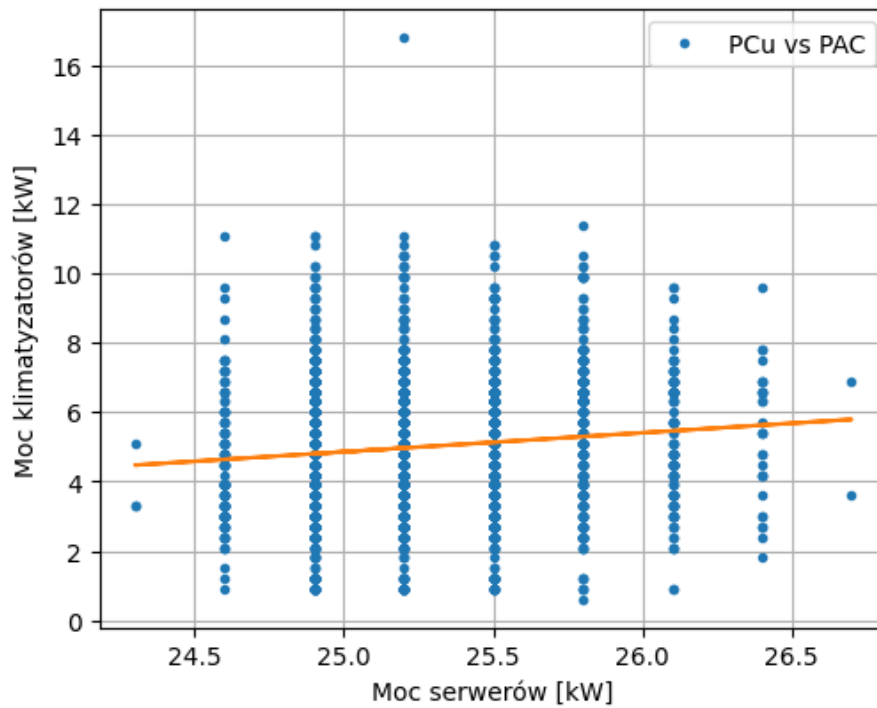


c)





Rysunek 83. Przebiegi rejestrowane w odstępach 15 minutowych obejmujący O2, a)  $P_{Cu}$ , b)  $P_{AC}$  c)  $T_{AC1}$ ,  $T_{Meas1}$ , d)  $T_{AC2}$ ,  $T_{Meas2}$ , e)  $T_{AC3}$ ,  $T_{Meas3}$ , f)  $T_{AC4}$ ,  $T_{Meas4}$ , g)  $T_{LHC}$ ,  $T_{RHG}$ ,  $T_{celCC}$



Rysunek 84. Korelacja między mocą klimatyzacji (dla O2) a: a) mocą serwerów (0,108), b) temperaturą zewnętrzną (-0,257)

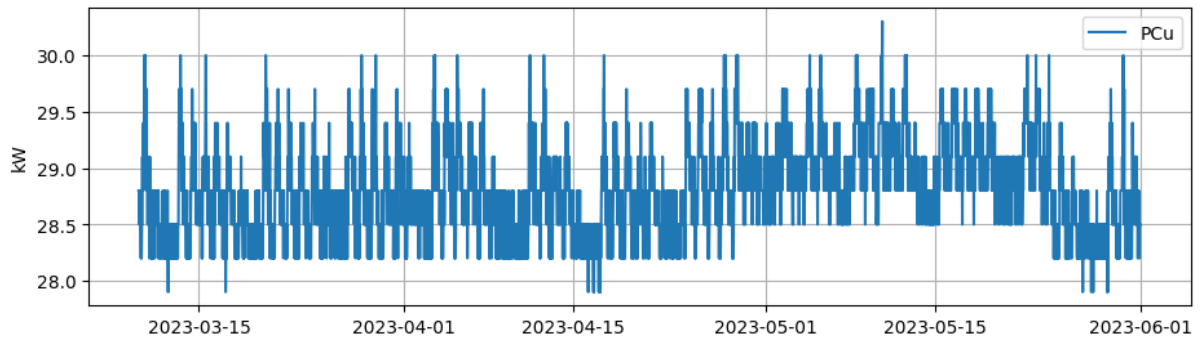
Układ klimatyzatorów pracuje w systemie 4x50%, tj. w danej chwili pracują jedynie 2 z czterech klimatyzatorów, a pozostałe dwa oczekują w rezerwie. W celu wyrównywania czasu pracy i optymalizacji zużycia urządzeń dwa razy na dobę następuje przełączenie między pracującymi, a rezerwowymi klimatyzatorami. Na przebiegach temperatury dla każdego klimatyzatora (za wyjątkiem nr 3) można wyróżnić przedziały czasu gdy dany klimatyzator pracuje – w tym czasie wartość jego temperatury regulowanej oscyluje wokół wartości zadanej 20°C. Wyjątkiem jest klimatyzator nr 3 co związane jest ze

szczególnym rozplywem powietrza przez szafy serwerowe. Bezpośrednio nad wylotem powietrza z tego klimatyzatora szafy mają najrzadszą zabudowę, co powoduje, że zimne powietrze tłoczone z innych klimatyzatorów ma łatwą drogę przez te serwery i silnie omywa pomiar nr 3 również wtedy, gdy klimatyzator nr 3 jest wyłączony.

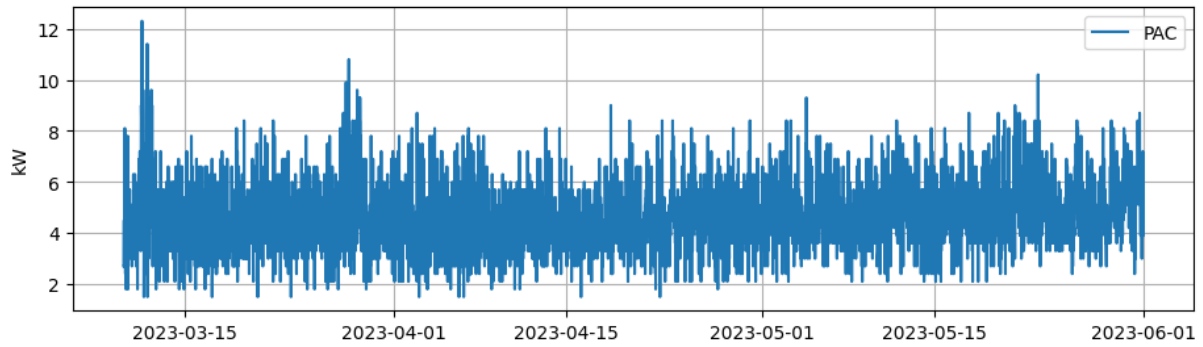
Na wykresie widać (rys. 83a), dla poszczególnych klimatyzatorów, małą wariancję temperatury rejestrowanej przez klimatyzatory. Z drugiej strony widać znaczną wariancję mocy klimatyzacji. Świadczy to o niewłaściwym sposobie pomiaru temperatury. Przyczyna tego stanu jest przede wszystkim mała reprezentatywności pomiaru temperatur. Oznacza to, że wpływ klimatyzatorów na czujniki mierzące te temperatury był ograniczony i porównywalny, tj. każdy z klimatyzatorów oddziaływał w porównywalnym stopniu na każdą z tych temperatur. Z tego powodu klimatyzatory musiały pracować dłużej i częściej się załączać, aby zmniejszyć temperatury. Było to jednocześnie powodem zwiększenia zużycia mocy. Efekt ten jest wyraźnie widoczny na przebiegach temperatur w korytarzach. W analizowanym okresie średnia temperatura w korytarzu zimnym wynosiła ok. 18°C, a temperatura zadana wynosiła 20°C. Odchyłka temperatury wynosiła aż 2°C (rys. 83h). Przedstawiona na rys. 84 analiza świadczy również o niskiej korelacji między analizowanymi parametrami. Jednak widać, że korelacja między mocą klimatyzacji, a mocą serwerów jest dodatnia (0,108), co oznacza, że wraz ze wzrostem mocy serwerów wzrasta moc klimatyzacji. Natomiast dla temperatury zewnętrznej ta korelacja podobnie jak na rys. 82b, ma ujemną wartość współczynnika i wynosi -0,257. Należy jednak podkreślić, że na ocenę tego współczynnika ma wpływ zakres występujących w tym okresie temperatur, który nie przekraczał 9°C. A przez znaczny okres przyjmowały wartości ujemne, a ze względu na ograniczenia pomiarowe wartości ujemne były rejestrowane jako równe 0°C. To ma duży wpływ na jakość korelacji.

Efektem tej analizy była zmiana odczytu temperatury przez czujniki klimatyzatorów. Przeprowadzono kilka wariantów, w których ulegała zmiana położenia czujników oraz warianty, w który stosowano różne osłony czujników. Analizy te dokonywano w okresie 3 (pomiędzy 24 lutym a 9 marca). Ostatecznie zdecydowano się umieścić czujniki temperatury w następujących lokalizacjach (rys. 55): K1-S2U25 (Szafa serwerowa 19" nr 2 półka U25), K2-S4U23 (Szafa serwerowa 19" nr 3 półka U23), K3-S7U40 (Szafa serwerowa 19" nr 7 półka U40), K4-S9U20 (Szafa serwerowa 19" nr 9 półka U20). Wyniki tej optymalizacji, przebiegi dla okresu 4, przedstawiono na wykresach rysunek 85.

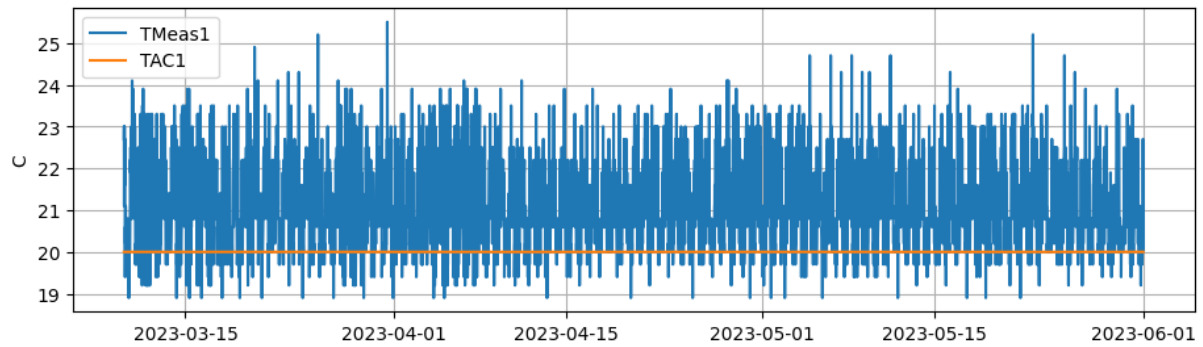
a)



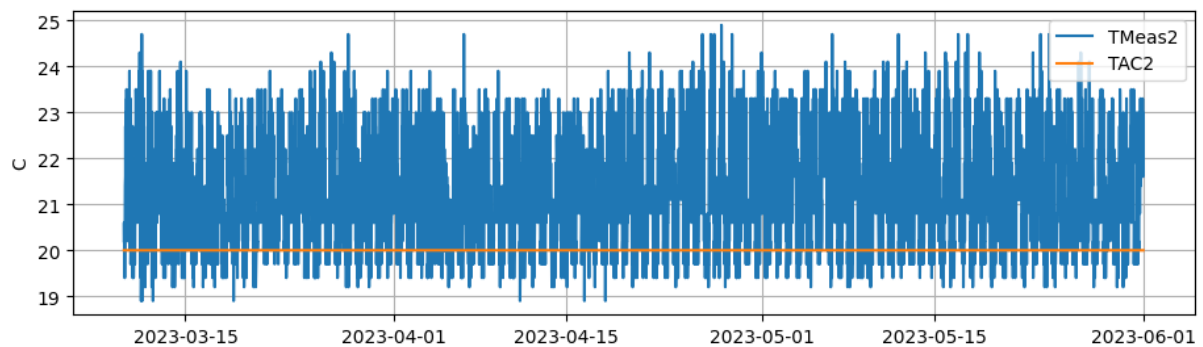
b)

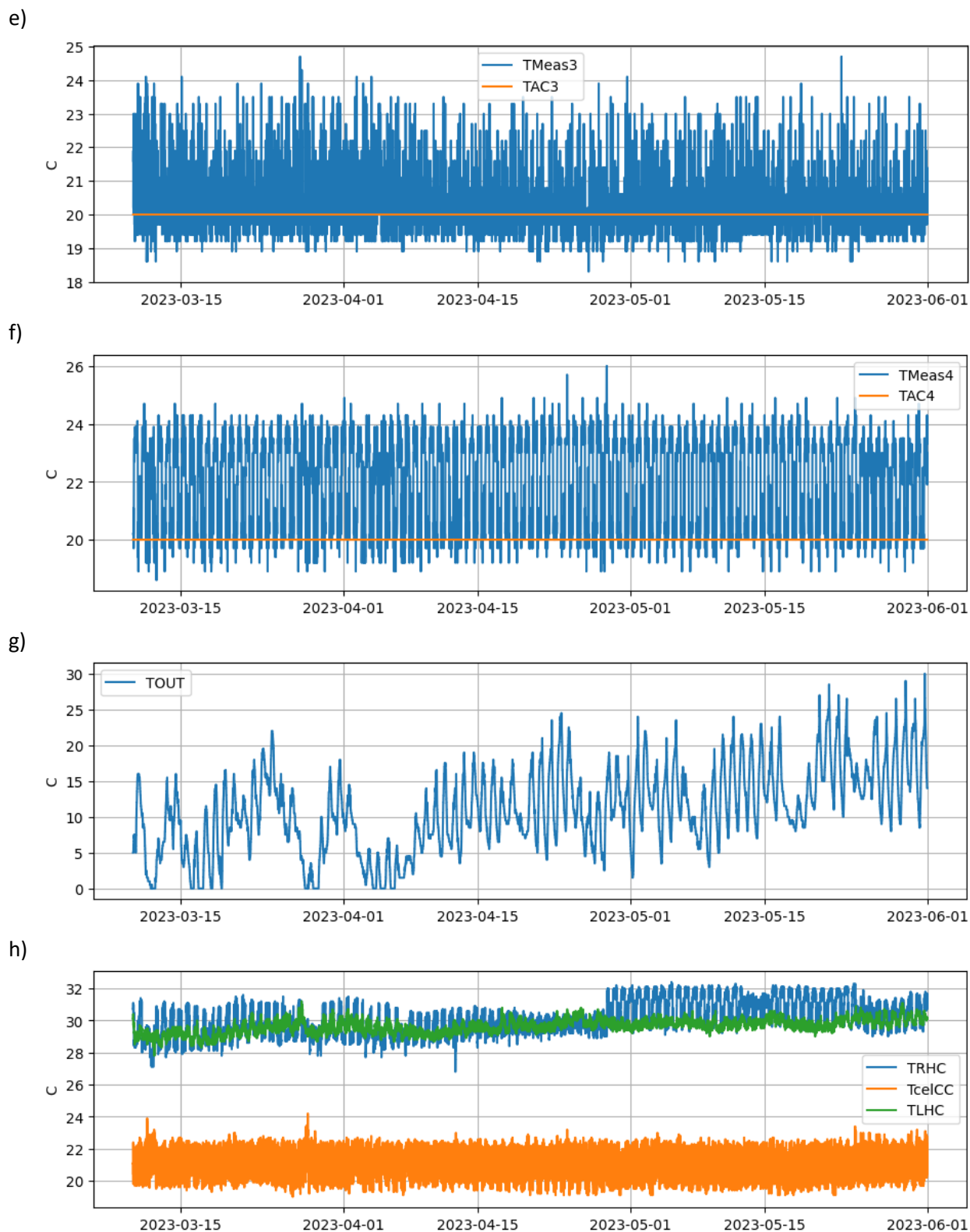


c)

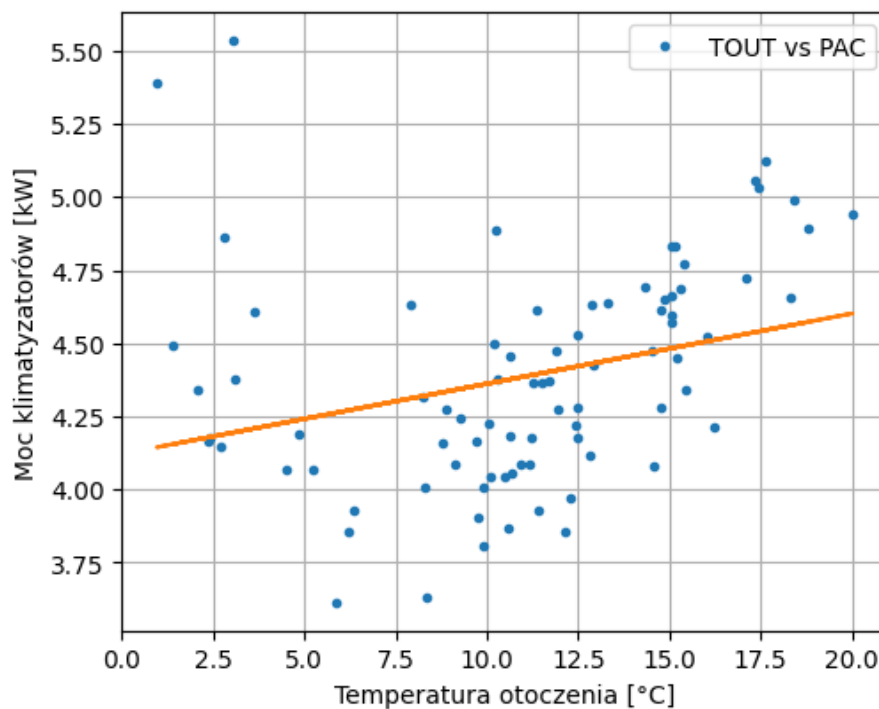
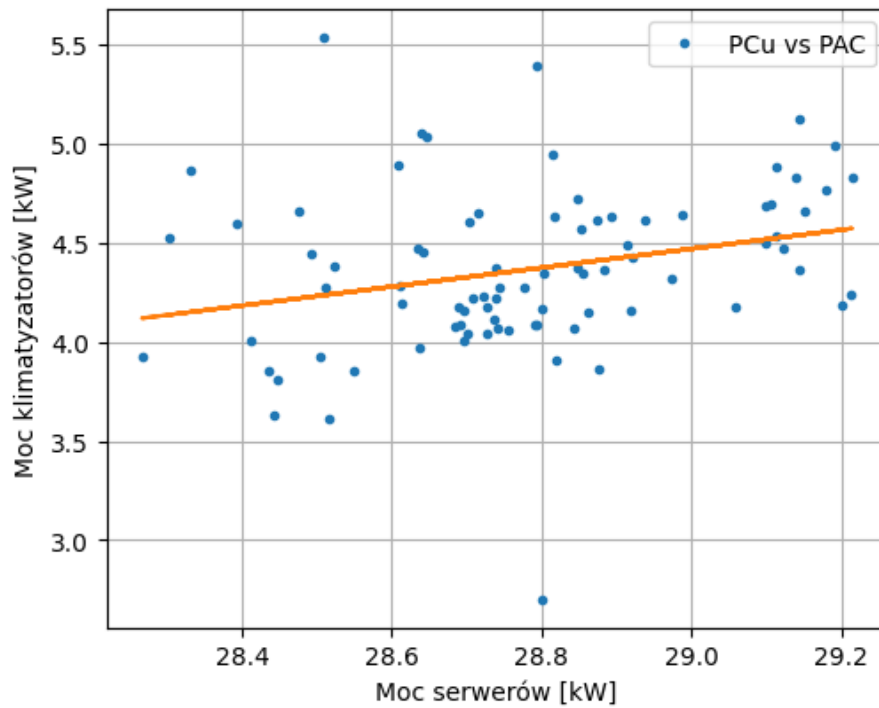


d)





Rysunek 85. Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych obejmujący O4, a)  $P_{Cu}$ , b)  $P_{AG}$ , c)  $T_{AC1}$ ,  $T_{Meas1}$ , d)  $T_{AC2}$ ,  $T_{Meas2}$ , e)  $T_{AC3}$ ,  $T_{Meas3}$ , f)  $T_{AC4}$ ,  $T_{Meas4}$ , g)  $T_{OUT}$ , h)  $T_{LHC}$ ,  $T_{RHc}$ ,  $T_{celCC}$

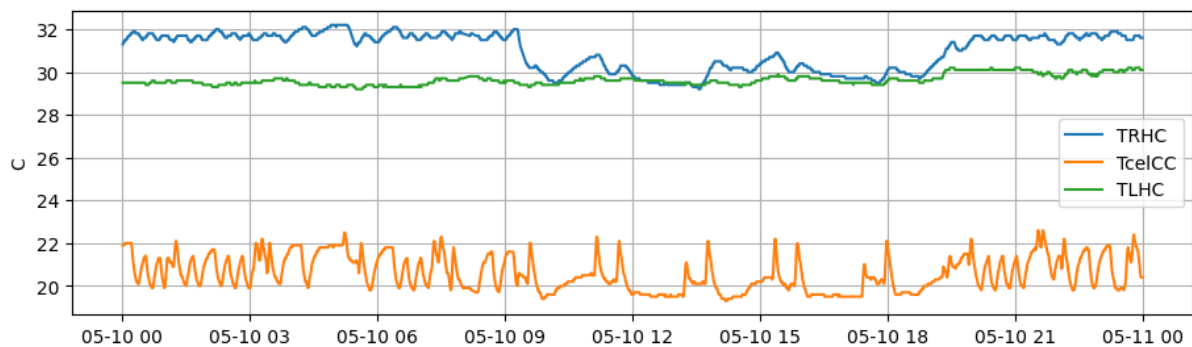


Rysunek 86. Korelacja między mocą klimatyzacji (dla O4 a: a) mocą serwerów (0,430), b) temperaturą zewnętrzną (0,436)

Zmiana położenia czujników pomiarów temperatury (O4) spowodowała, że średnia temperatura wynosiła ok. 20.5°C, czyli odchyłka od wartości zadanej się zmniejszyła i wynosiła jedynie 0,5°C. Natomiast pomiary temperatury w korytarzach „ciepłych” w okresie przed zmianami O2, miały znacznie niższe wartości i większą zmienność w cyklu dobowym niż po zmianach O4. Świadczy to o tym, że układ chłodzenia pracował z większą częstotliwością i wydajnością niż było to potrzebne do zapewnienia właściwej temperatury w serwerowni.



Można zatem zauważyć, że wyższa wariancja temperatur regulowanych po zmianie ich lokalizacji nie wynika z pogorszenia skuteczności regulacji temperatury. Wręcz przeciwnie, dzięki temu że dany pomiar jest wyraźnie powiązany z pracą odpowiedniego klimatyzatora (za wyjątkiem nr 3 – to zjawisko opisano wcześniej), regulacja ta jest bardziej skuteczna. To jednoznacznie przekłada się na zmniejszone zużycie energii (liczonej jako iloczyn mocy klimatyzacji i czasu jej pracy). Co więcej w okresie po zmianach zwiększyły się współczynniki korelacji i korelacja między mocą klimatyzacji, a mocą serwerów wynosi 0,43, a między mocą klimatyzacji a temperaturą zewnętrzną 0,436 (rys. 86). Należy jednak podkreślić, że zmienił się zakres temperatur od pojedynczych stopni do 20°C. Świadczy to o tym, że w analizowanym okresie jest już istotna korelacja między analizowanymi parametrami. Przebieg temperatur w korytarzach ciepłych (prawym i lewym) oraz w korytarzu zimnym, przedstawione na rys. 84h, pozwalają również ocenić pozytywnie wprowadzone zmiany. Zdecydowanie zmniejszyły się wariancje temperatur, przez co przebiegi charakteryzowały się mniejszą zmiennością. Dla dokładnej analizy pracy klimatyzatorów, wyniki przedstawiono (rys. 87) dla jednego wybranego dnia (10 maja 2023 r.).



Rysunek 87. Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych obejmujący jeden dzień,  $T_{LHC}$ ,  $T_{RHG}$ ,  $T_{celCC}$

Na przebiegach temperatury nadal występują chwilowe skoki, zarówno w górę jak i w dół. Jest to powiązane z dwupołożeniową pracą klimatyzatorów, co wyraźnie widać na przebiegu temperatury w korytarzu zimnym, który zaznaczono kolorem pomarańczowym na wykresie rys. 87. Dzięki wystarczająco gęstemu próbkowaniu na tym wykresie wyraźnie widać momenty uruchamiania i wyłączenia sprężarek w pracujących klimatyzatorach. Wyłączenie sprężarek w obu klimatyzatorach naraz powoduje szybki wzrost temperatury w korytarzu zimnym. Choć pojedyncze urządzenie trochę za niską moc aby utrzymać temperaturę w korytarzu zimnym na poziomie zadanej temperatury równej 20°C, a dwa urządzenia pracujące jednocześnie mają już zdecydowanie za wysoką tę moc, to takie przewymiarowanie zaprojektowano celowo. Wynika to z faktu bezpieczeństwa pracy serwerów. Taki układ pracy klimatyzatorów zapewnia pełną rezerwę w przypadku powstania nagłych awarii. Ponadto uruchomienie obu sprężarek na raz skutkuje szybkim (nagłym) spadkiem temperatury. Momenty, gdy pracuje sprężarka tylko w jednym urządzeniu można zidentyfikować przez charakterystyczne łuki inercyjnego wzrostu temperatury. Gdy temperatura wyłączonego klimatyzatora przekroczy 21°C, następuje jego uruchomienie, co powoduje szybki spadek temperatury w korytarzu, aż do momentu wyłączenia sprężarki w kolejnym urządzeniu. Należy

również pamiętać, że ze względu na zabezpieczenie chroniące sprężarki przed przegrzaniem jej uruchomienie i wyłączenie nie może następować częściej niż co 3 minuty. W przypadku, gdy obie sprężarki zostaną uruchomione lub wyłączone w podobnym momencie, następuje chwilowy, niekontrolowany pik lub spadek temperatury. Dlatego tak ważne jest aby urządzenia chłodnicze pracowały z jak najmniejszą liczbą załączeń i wyłączeń.

Z praktycznego punktu widzenia energia pobierana przez klimatyzatory powinna być proporcjonalna do ilości ciepła, które należy wypompować z pomieszczenia. Biorąc jednak pod uwagę, że wydajność klimatyzatora, będącego w istocie pompą ciepła, jest silnie zależna od warunków termodynamicznych na obu jego wymiennikach, nie można wyznaczyć jednej prostej zależności wiążącej moc serwerów z mocą zużywaną przez klimatyzatory. Należy również uwzględnić inne czynniki mogące wpływać na pracę urządzeń chłodzących, Analiza istotności przeprowadzana i opisana w rozdziale 6.3.5 pozwoliła wyłonić jeszcze drugi istotny czynnik jakim jest temperatura zewnętrzna. W przypadku gdy czynników wpływających na pracę urządzenia jest więcej to dużo większym utrudnieniem jest praca dwupołożeniowa klimatyzatorów. Uruchomienie sprężarki wiąże się z chwilowym wzrostem prądu rozruchowego jej silnika, co ograniczane jest dzięki zastosowaniu falownika, ale kosztem wydłużenia czasu, w którym pracuje ona z obniżoną sprawnością. W efekcie każdorazowe uruchomienie sprężarki to okres czasu, gdy pobiera ona moc elektryczną, ale nie generuje chłodu lub generuje go ze znacznie obniżoną sprawnością. Jeżeli więc w danym okresie czasu dochodzi do częstszych przełączeń sprężarek, to ich zużycie energii będzie wyższe niż w porównywalnym okresie czasu o tej samej średniej mocy serwerów i średniej temperaturze zewnętrznej.

W celu znalezienia korelacji obu czynników na moce klimatyzacji przeprowadzono kolejną analizę. Na rysunku 88 przedstawiono kod pozwalający określić korelację trzech zmiennych: moc serwerów i temperatura zewnętrzna na moc klimatyzacji.

```
: fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(projection='3d')
fig.set_size_inches(6,5)

ax.scatter(x1,x2,y)

ax.grid()
ax.set_xlabel('Temperatura otoczenia [°C]')
ax.set_ylabel('Moc serwerów [kW]')
ax.set_zlabel('Moc klimatyzatorów [kW]')

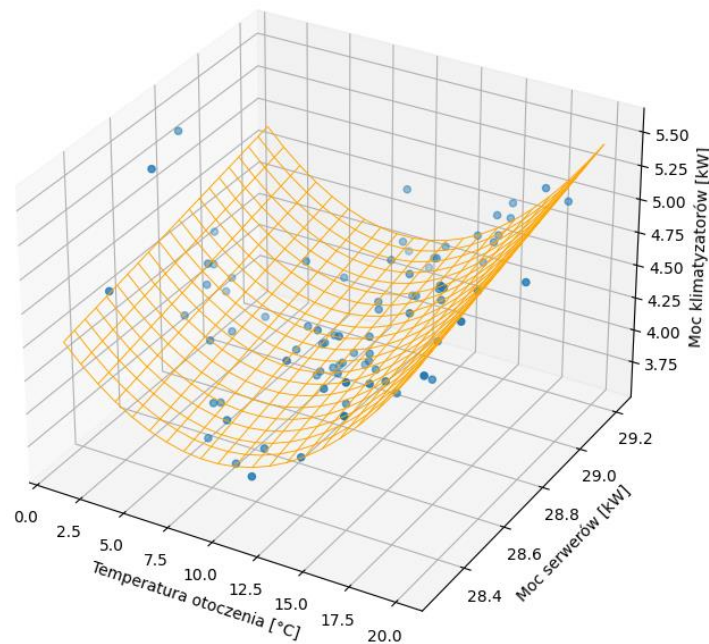
# LMS - model z wielomianami kwadratowymi
U = np.vstack([x1, x1**2, x2, x2**2, np.ones(len(x1))]).T
beta = np.dot((np.dot(np.linalg.inv(np.dot(U.T,U)),U.T)),y)

ym = x1*beta[0]+x1**2*beta[1]+x2*beta[2]+x2**2*beta[3]+beta[4]

ax.plot_wireframe(x1m, x2m, ym, linewidth=0.7, color='orange');
beta
```

Rysunek 88. Kod programu służący do określenia korelacji między mocą klimatyzatorów a mocą serwerów i temperaturą zewnętrzną

Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 89.



Rysunek 89. Korelacja między mocą klimatyzacji (dla O4) a mocą serwerów i temperaturą zewnętrzną

Na wykresie 89 przedstawiono próbę dopasowania do danych pomiarowych płaszczyzny, która reprezentuje zależność mocy klimatyzatorów od mocy serwerów i temperatury zewnętrznej. Na wykresie widać charakterystyczne minimum dla temperatury zewnętrznej wynoszącej ok. 8,5°C i mocy serwerów wynoszącej 28,5 kW. Takie zestawienie danych może zostać wykorzystane do szacowania zapotrzebowania na moc elektryczną układu chłodzenia w przypadku przyszłych zmian mocy serwerów. Jednak ze względu na swoją niepewność, nie może ona zastąpić klasycznych metod doboru urządzeń chłodniczych w przypadku potrzeby przeprowadzenia modernizacji i/lub rozbudowy układu chłodzenia.

#### 6.4.5 Podsumowanie

Wyniki badań zaprezentowane w rozdziale 6 pozwoliły dokonać oceny działania systemu chłodzenia w pomieszczeniu serwerowni (Data Center), znajdującego się w budynku biurowym firmy KAMSOFT S.A. (oznaczenie budynku K-133). Oceny dokonano w dwóch płaszczyznach:

- Ocena pracy działania systemu chłodzenia, w czasie pracy serwerowni. Przeprowadzenie analizy z wykorzystaniem modeli: predykcyjnego i automatyki sterowania. Wprowadzenie zmian w systemie i ocena ich skutków.
- Ocena zużycia energii w czasie pracy serwerowni.

Ocenę pracy serwerowni dokonano na dwa sposoby. W pierwszym porównano wyniki uzyskane dzięki wykorzystaniu informatycznego modelu predykcji, przedstawionego w rozdziale 6.2.5.

Jako funkcję błędu oceny jakości modelu predykcyjnego wykorzystano pierwiastek z błędu średniokwadratowego. Zebrane dane obejmowały okres od 2022-09-13 do 2023-05-31 (podzielone na

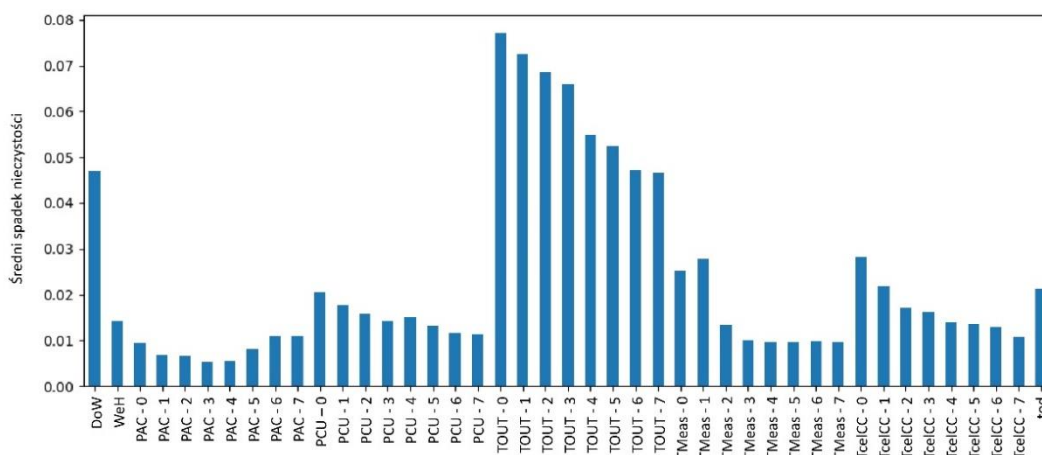
okresy przedstawione w rozdziale 6.2.5). Wyniki analizy dla poszczególnych okresów przedstawiono w tabeli 15. Na podstawie uzyskanych wyników, które przedstawiono w rozdziale 6.3.5 analizy dokonano z wykorzystaniem algorytmu Random Forest, a uzyskane wyniki są efektem badań z wykorzystaniem testu krzyżowego dla  $q=5$ .

Tabela 15. Wyniki NRMSE uzyskane w poszczególnych okresach

Nr okresu	Okres analizy	Std RMSE	NRMSE
O1-O4	13.09.2022 - 31.05.2023	0.12645	0.35127
O1	13.09.2022 - 31.12.2022	0.12655	0.3501
O2	01.01.2023 - 31.01.2023	0.31889	0.38672
O3	01.02.2023 - 09.03.2023	0.11262	0.39888
O4	10.03.2023 - 31.05.2023	0.05471	0.17294

Wyniki zaprezentowane w tabeli 15 dowodzą, że zmiany wprowadzone w systemie klimatyzacji dały pożądany efekt. Miarą oceny jakości modelu predykcyjnego był znormalizowany błąd RMSE. W okresie 4 wartość tego błędu wyniosła 0,17294, i była mniejsza niż w okresie 2 (przed zmianami), gdzie ten błąd wyniósł 0,38672.

Drugim elementem porównania była analiza istotności atrybutów przeprowadzona dla okresu O4. Przedstawione na wykresie wyniki (rys. 90) wskazują, że istotnymi atrybutami są temperatury zewnętrzna, moc serwerów i temperatura w kanale zimnym. W porównaniu do okresu 2 (opis przedstawiono w rozdziale 6.3.5), po którym nastąpiły istotne zmiany w układzie sterowania klimatyzacją, zupełnie inny jest rozkład zmiennych (rys. 66).



Rysunek 90. Wykres istotności atrybutów uzyskanych z algorytmu lasu losowego z wykorzystaniem algorytmu MDI (O4)

Co istotne największymi wartościami z najistotniejszych atrybutów ( $P_{CU}$ ,  $T_{OUT}$ ,  $T_{celCC}$ ) cechują się zmienne o współczynniku 0. Jedynie dla temperatury regulacji największą wartość ma zmienna -1.

Przeprowadzone badania wskazały, że predykcja temperatury w kanale ciepłym jest możliwa, a co więcej uzyskane wyniki pozwalają na jej predykcje z relatywnie dużą dokładnością. Ponadto analiza istotności atrybutów wykazała poprawność opracowanego modelu, wskazując że uzyskane wyniki są zgodne z wiedzą ekspercką i temperatura w kanale ciepłym głównie zależy od zużycia energii elektrycznej przez jednostki obliczeniowe. Dlatego w badaniach przyjęto, że moc serwerów i temperatura zewnętrzna będą atrybutami istotnymi wpływającymi na moc i pracę klimatyzacji.

W pracy pokazano, że jednym z kluczowych zagadnień w budynku biurowym wyposażonym w serwerownię (Data Center) jest zużycie energii przez klimatyzację. Jak wskazano, gęstość energii wykorzystywanej w serwerowni jest o kilka rzędów wielkości większa w porównaniu do części biurowej budynku. Okazuje się, że najprostszym sposobem na zmniejszenie zapotrzebowania na energię jest zmniejszenie zużycia energii przez system chłodzenia centrum danych. Aby to osiągnąć, przedstawiono proces budowy modelu predykcyjnego prognozującego temperaturę w kanale ciepłym układu chłodzenia w serwerowni. Dokładne przewidywanie temperatury w kanale ciepłym jest niezwykle istotne z punktu widzenia możliwości regulacji temperatury w systemie klimatyzacyjnym, w tym potencjalnego wzrostu temperatury napływającej do szaf rack 19", co zmniejsza zapotrzebowanie na energię.

Potwierdzeniem tego wniosku jest porównanie zużycia energii w serwerowni w okresie przed zmianą ustawień klimatyzacji od 5 do 8 marca 2023 r. (data graniczna zmian 9.03.2023 r.) z okresem po zmianie ustawień klimatyzacji od 10 do 13 marca 2023 r. W pierwszym okresie zużycie energii elektrycznej serwerowni wyniosło 2529,52 kWh, natomiast w drugim 2403,25 kWh. Jak widać zużycie energii zmniejszyło się o 4,99%. W analizowanym okresie średnia wartość temperatury zewnętrznej była podobna i wyniosła w odpowiednio 3,93°C przed zmianami, natomiast po zmianach 6,47°C. Moc serwerów w analizowanych okresach była stała i wynosiła 28,8 kW. Natomiast sumaryczna moc serwerowni (serwery plus klimatyzacja) została zmniejszona do 36,6 kW, z 43,65 kW okresie przed zmianami. Stąd zmniejszenie zapotrzebowania na moc o 16,15%. Przedstawione wyniki potwierdzają uzyskane oszczędności w wyniku wprowadzonych w układzie sterowania klimatyzacją usprawnień.

## **6.5 Projekt i wdrożenie rozwiązania instalacji PV i magazynu energii**

### *6.5.1 Zużycie energii elektrycznej w budynku biurowym wyposażonym w CPD*

W tej części pracy przedstawiono projekt i analizę pracy instalacji fotowoltaicznej (PV) przygotowanej dla budynku biurowego K-133 wyposażonego w CPD. Analiza obejmowała badania dwóch wariantów instalacji wraz z trzema wariantami magazynów energii wybranych producentów. Instalacje dobrano do zapotrzebowania budynku na energię elektryczną uwzględniając obciążenie serwerowni po zastosowanych zmianach (opisanych w rozdziałach 6.1-6.3).

### 6.5.2 Projekt instalacji PV – opis wariantów

Planowaną instalację PV zlokalizowano w siedzibie firmy KAMSOF T S.A. w Katowicach (KS-133). Wszystkie projekty i symulacje pracy instalacji wykonywane były za pomocą programu PV\*SOL premium produkcji firmy Valentin Software [155]. Przeprowadzono analizę opłacalności budowy instalacji dla dwóch wariantów:

1. Instalacja fotowoltaiczna o mocy 150 kWp.,
2. Instalacja o większej mocy 250 kWp.

O wartościach mocy analizowanych wariantów instalacji PV decydowało:

- codzienne zapotrzebowanie budynku na energię elektryczną,
- ograniczenie budowy w dostępnym terenie przyległym do budynku,
- do 2023 r. istniała jedynie możliwość wybudowania mikroinstalacji fotowoltaicznej „bez pozwolenia” tylko do 50 kWp. Po zmianie przepisów prawa budowlanego od października 2023 r. zwiększono wartość mocy do 150 kWp.,
- mniejsze koszty corocznego podatku od nieruchomości, w tym przypadku jest to 2% wartości budowlanej,
- ograniczenie mocy przyłączeniowej budynku 250 kW po stronie niskiego napięcia – dla większych mocy należałoby przeprowadzić kosztowną inwestycję w przebudowę przyłącza.

Ze względu na dużą moc zaproponowanych instalacji zdecydowano o budowie jej na gruncie. Analiza jej usytuowania i wykonania uwzględniała przeszkody powodujące zacienienie paneli PV oraz wykonana została z zachowaniem zasad zawartych w normie [156]. Zacienienie powoduje niejednorodne napromieniowanie paneli fotowoltaicznych i tym samym ma wpływ na zmniejszenie produkcji energii elektrycznej z systemu fotowoltaicznego.

Pierwszy wariant małej instalacji fotowoltaicznej do 150 kWp. wykonano jako rozbudowa istniejącej mikroinstalacji o mocy 49,8 kWp. W tym wariantcie zastosowano 120 paneli PhonoSolar PS415M4-22WH o mocy STC 415 W o łącznej mocy 49,8 kWp. podłączonych do dwóch inwerterów trójfazowych SolarEdge SE25K o mocy 25 kW oraz 183 paneli JinkoSolar JKM545M-72HL4-V o mocy STC 545 W podłączonych do 3 inwerterów trójfazowych SolarEdge SE33,3K o mocy 33,3 kW. Sumaryczna moc instalacji fotowoltaicznej to 149,535 kWp.

Drugi wariant instalacji fotowoltaicznej o mocy 250 kWp. wykonano również jako rozbudowa istniejącej mikroinstalacji o mocy 49,8 kWp. W tym wariantcie zastosowano 120 szt. paneli PhonoSolar PS415M4-22WH o mocy STC 415 W o łącznej mocy 49,8 kWp. podłączonych do dwóch inwerterów trójfazowych SolarEdge SE25K o mocy 25 kW (instalacja już działająca na obiekcie) oraz 366 szt. paneli JinkoSolar JKM545M-72HL4-V o mocy STC 545 podłączonych do 6 inwerterów trójfazowych SolarEdge SE33,3K o mocy 33,3 kW. Sumaryczna moc instalacji fotowoltaicznej to 249,270 kWp.

### 6.5.3 Dobór magazynu energii – opis wariantów

Dla obu wariantów instalacji fotowoltaicznej została przeprowadzona analiza doboru magazynu energii elektrycznej o pojemności od 56 kWh do 1128 kWh. Tak szeroki zakres pozwolił znaleźć optymalne, ze względu na moc instalacji i charakterystykę zużycia energii elektrycznej budynku, rozwiązanie.

Aktualne roczne zużycie energii elektrycznej przez analizowany budynek biurowy jest na poziomie 550 MWh. Dla takiego profilu zużycia energii elektrycznej optymalny jest dobór magazynu energii o następujących parametrach:

- moc 160 kW,
- zalecane godzinowe zużycie energii elektrycznej HTW: 550 kWh/h,
- średniodobowe zużycie energii elektrycznej: 1507 kWh/24h,
- maksymalne dobowe zużycie energii elektrycznej: 1615 kWh/24h.

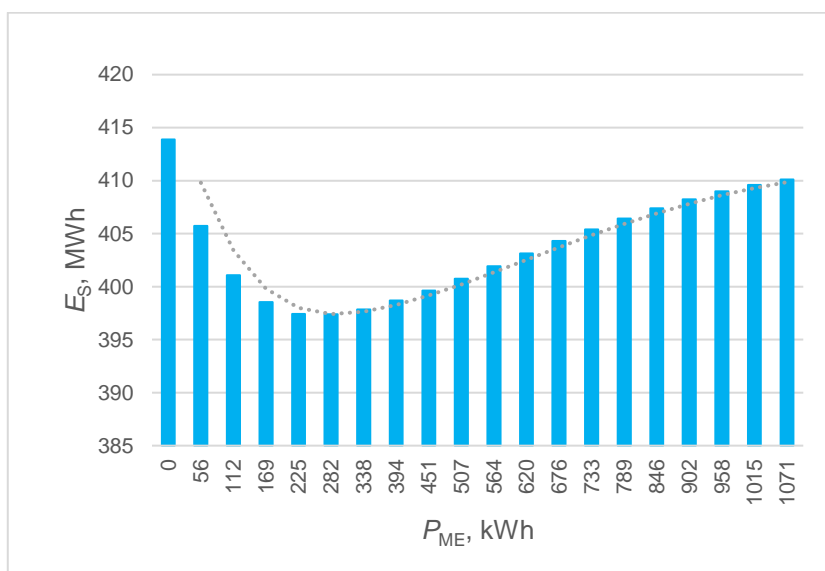
Dla obu wariantów instalacji przeprowadzono analizę opłacalności magazynów energii trzech producentów, firm M-TEC Energy Systems GmbH [157], Neoom International GmbH [158] oraz ELSTA sp. z o.o. [159].

#### **Wariant 1:**

##### Instalacja 150 kWp. - M-TEC Energy Systems GmbH.

Na rysunku 91 zostało przedstawiono zużycie energii elektrycznej z sieci (rys. 91a), wykorzystanie energii z magazynu energii (rys. 91b) oraz przepływ energii z instalacji PV do magazynu energii (rys. 91c) w zależności od pojemności magazynu energii Gewerbespeicher Energy Block firmy M-TEC Energy Systems GmbH.

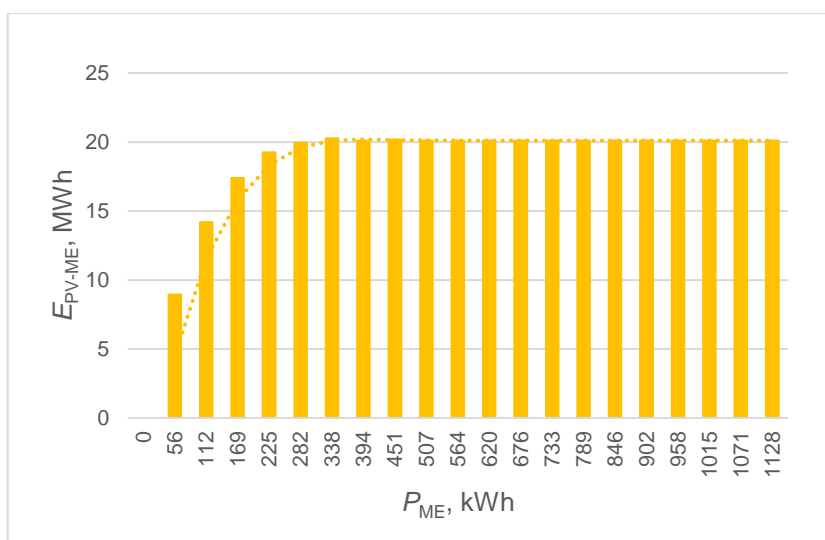
a)



b)



c)

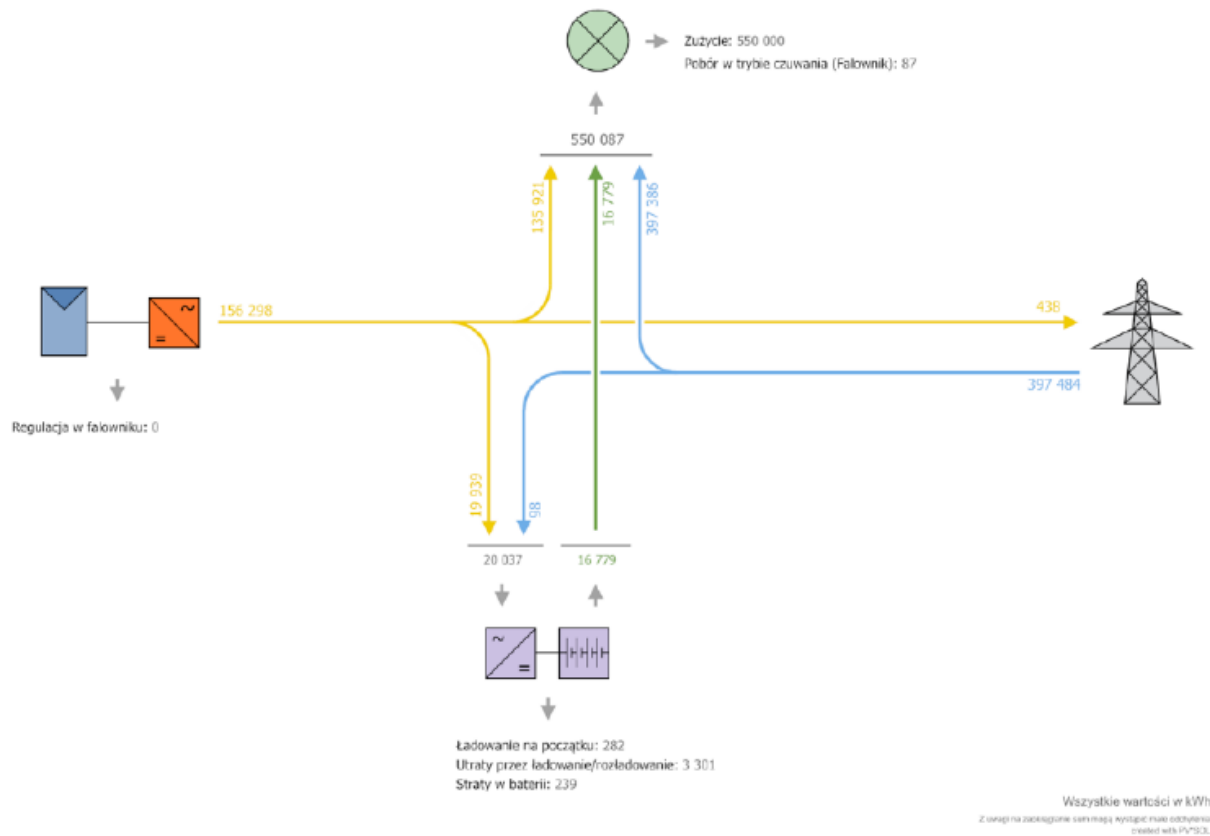


Rysunek 91. a) Zużycie energii z sieci elektrycznej –  $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii –  $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii –  $E_{PV-ME}$  w zależności od pojemności magazynów energii –  $P_{ME}$  firmy M-TEC Energy Systems GmbH

Na podstawie analizy wykresów (rys. 91) optymalnym rozwiązaniem pozwalającym na minimalizację opłat za energię elektryczną jest magazyn Gewerbespeicher Energy Block o pojemności 282 kWh. Dla tej pojemności widoczne jest minimum zużycia energii z sieci, a jednocześnie maksimum wykorzystania energii z magazynu energii i maksymalny przepływ energii z instalacji PV do magazynu energii.

Na rysunku 92 został pokazany schemat przepływu energii dla wybranej instalacji fotowoltaicznej o mocy 150 kWp. i magazynu energii Gewerbespeicher Energy Block firmy M-TEC Energy Systems GmbH o pojemności 282 kWh.



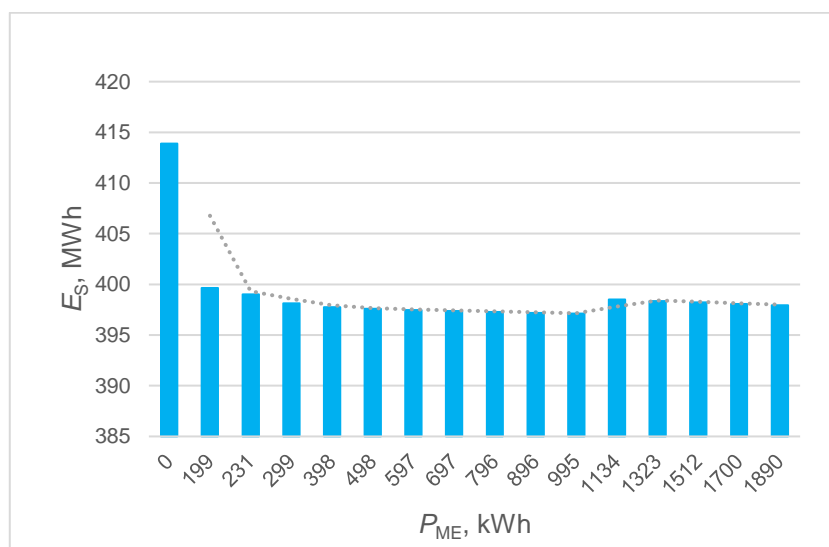


Rysunek 92. Schemat przepływu energii dla Gewerbespeicher Energy Block 282 kWh

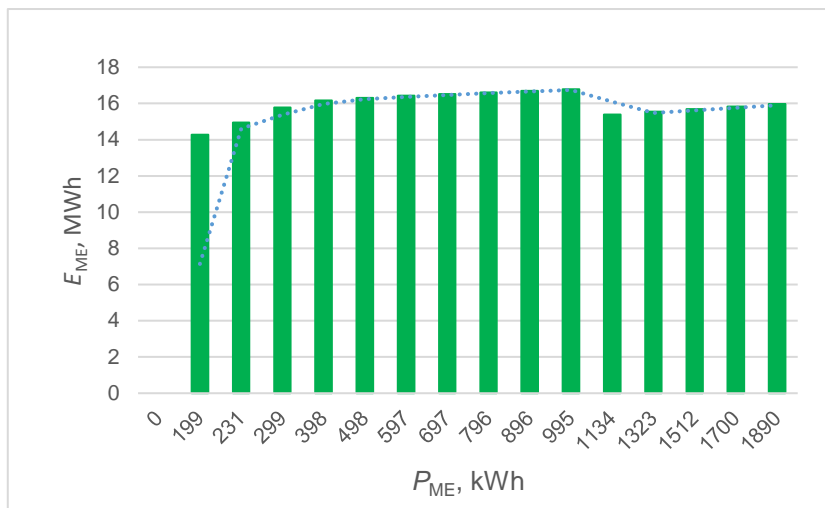
Instalacja 150 kWp. - Neoom International GmbH.

Kolejnym analizowanym magazynem energii był NEOOM BLOKK 160 kW firmy Neoom International GmbH. Podobnie jak dla firmy M-TEC na rysunku 93 przedstawiono zależności poszczególnych energii w zależności od pojemności magazynu.

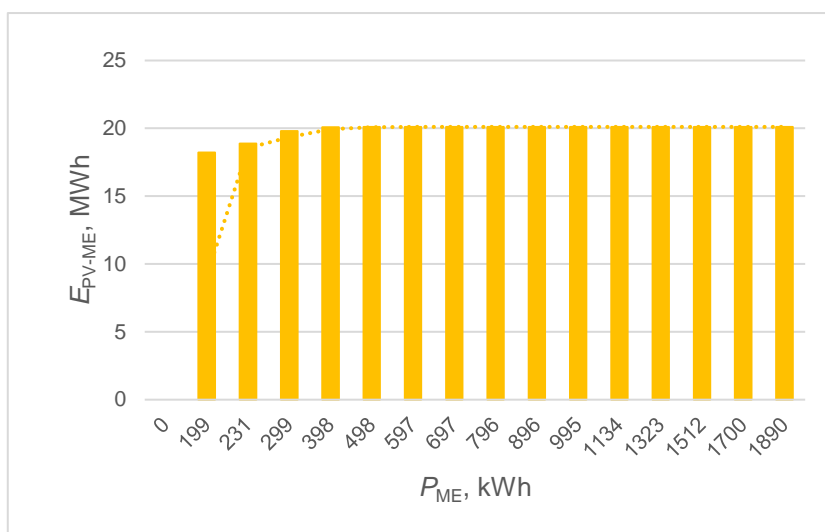
a)



b)



c)



Rysunek 93.a) Zużycie energii z sieci elektrycznej –  $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii –  $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii –  $E_{PV-ME}$  w zależności od pojemności magazynów energii –  $P_{ME}$  firmy Neoom International GmbH

Dla firmy Neoom International GmbH i instalacji fotowoltaicznej o mocy 150 kWp. nie można jednoznacznie powiedzieć, które rozwiązanie jest optymalnym. W tym celu znaleziono minimalną wartość zależności (5). Wyniki przedstawiono w tabeli 16.

$$f(E)_{\min}: E = E_s - E_{ME} - E_{PV-ME} \quad (5)$$

gdzie:

$E_s$  - zużycie energii z sieci elektrycznej, kWh,

$E_{ME}$  - przepływ energii z magazynu energii, kWh,

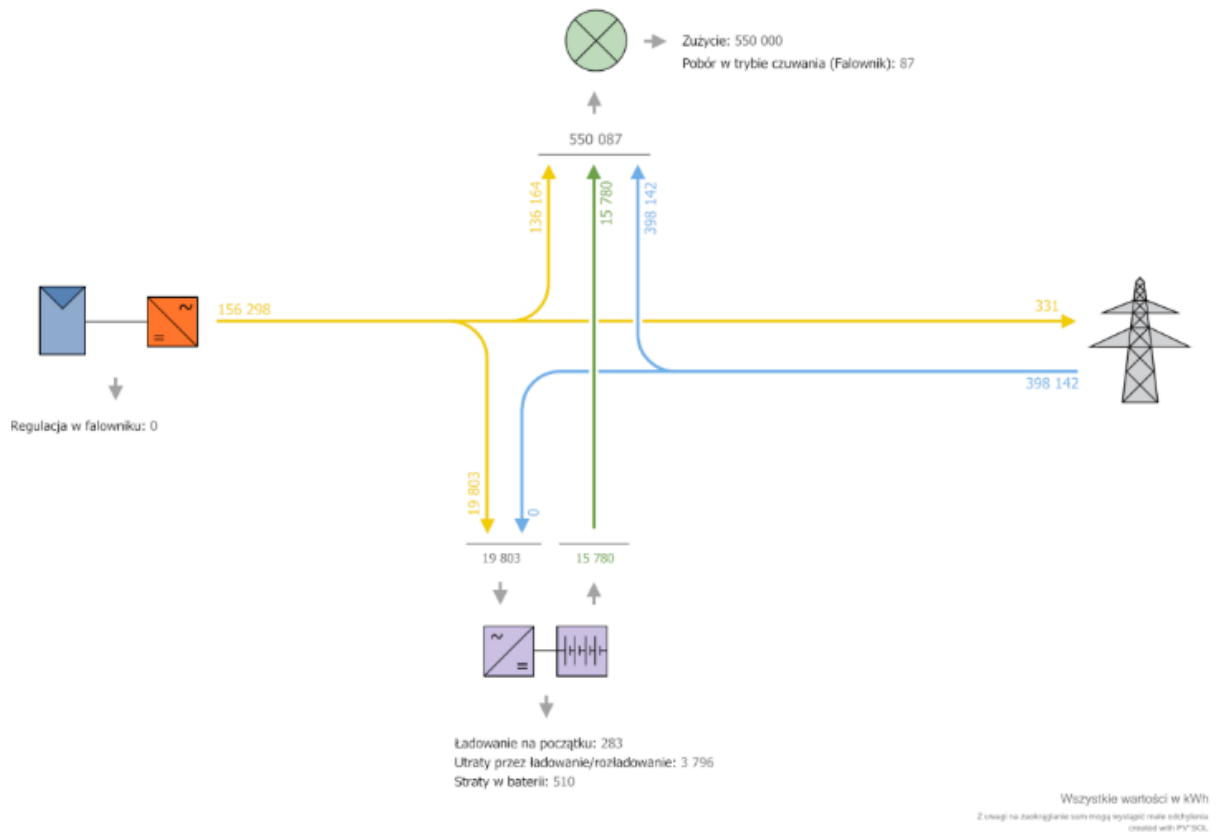
$E_{PV-ME}$  - przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii, kWh.

Tabela 16. Zestawienie oszczędności energii wynikających z zastosowania magazynów o różnych pojemnościach dla firmy Neoom International GmbH

$P_{ME}$ , kWh	$E$ , MWh
0	413,90
199	367,17
231	365,18
299	362,56
398	361,51
498	361,16
597	360,94
697	360,74
796	360,56
896	360,38
995	360,21
1134	363,00
1323	362,71

Optymalnym rozwiązaniem wynikającym z minimalizacji zakupu energii elektrycznej jest magazyn NEOOM BLOKK 160kW o pojemności 995 kWh. Jednak różnice w oszczędnościach energii między pojemnościami 299 a 995 MWh są na poziomie 0,6%, a szacowany koszt magazynu energii rośnie o ok. 66%. Dlatego do dalszej analizy wybrano magazynu energii NEOOM BLOKK 160 kW o pojemności 299 kWh.

Na rysunku 94 został pokazany schemat przepływu energii dla wybranej instalacji fotowoltaicznej o mocy 150 kWp. i magazynu energii NEOOM BLOKK firmy Neoom International GmbH o pojemności 299 kWh.

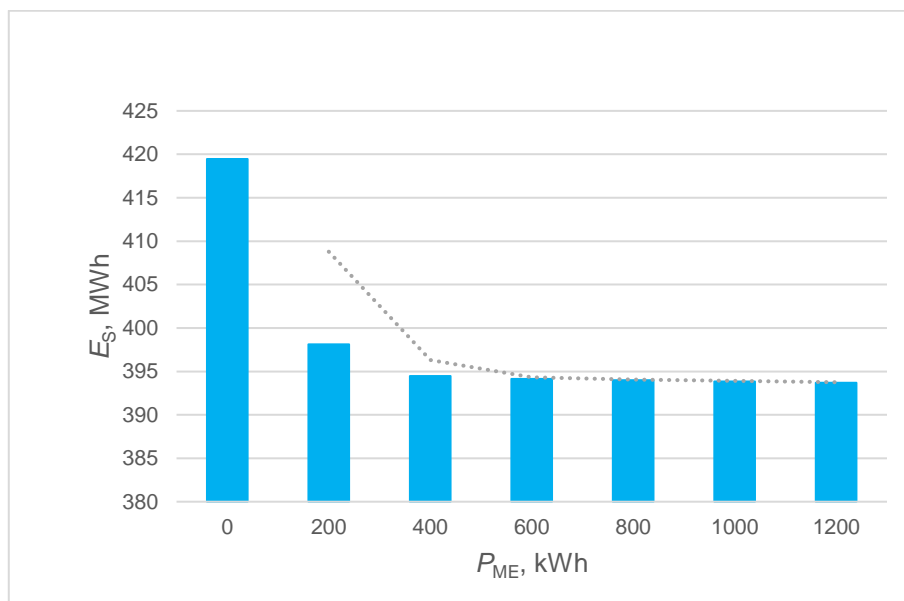


Rysunek 94. Schemat przepływu energii dla NEOOM BLOKK 160kW 299 kWh

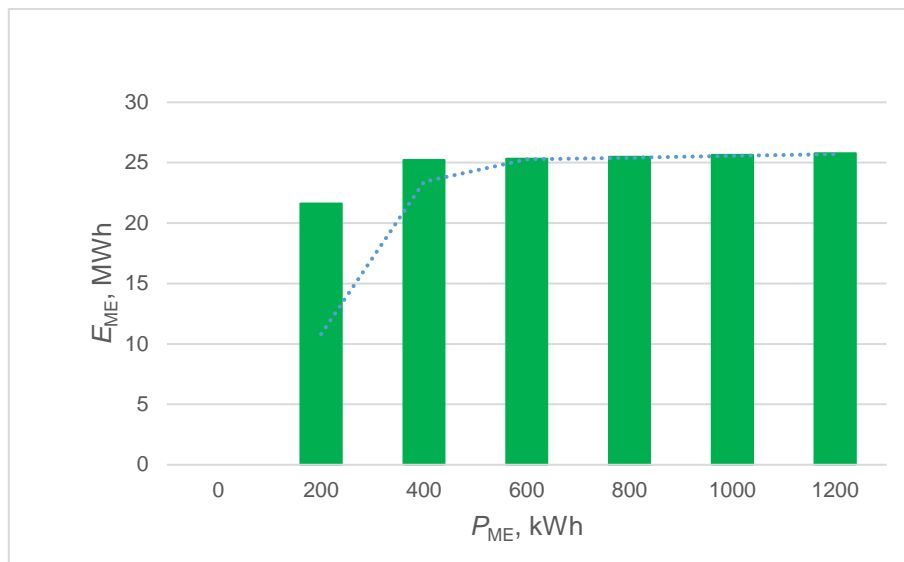
Instalacja 150 kWp. – ELSTA sp. z o.o.

Kolejnym analizowanym magazynem energii był modułowy układ BESS-250/0,2-1,2 firmy ELSTA sp. z o.o. o mocy 250 kW. Na rysunku 95 przedstawiono zależności poszczególnych energii w zależności od pojemności magazynu.

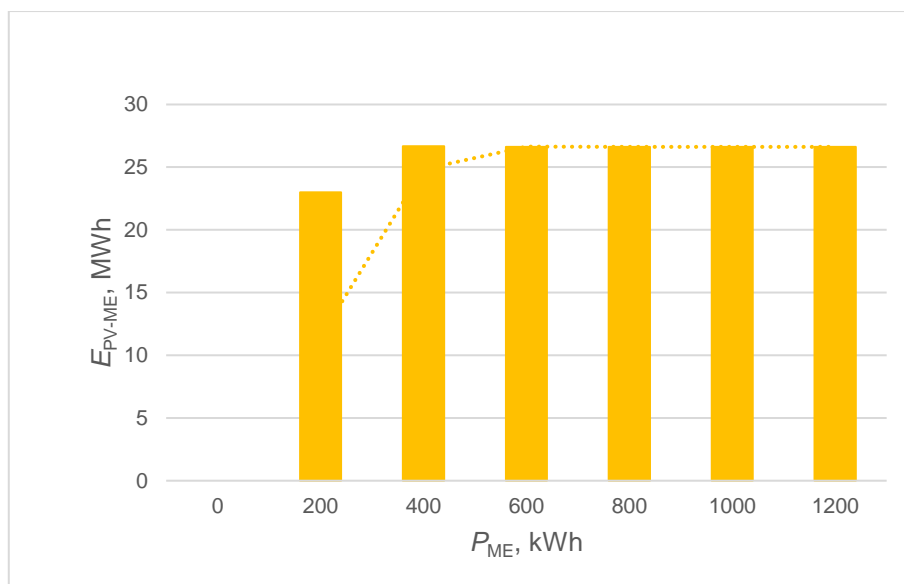
a)



b)

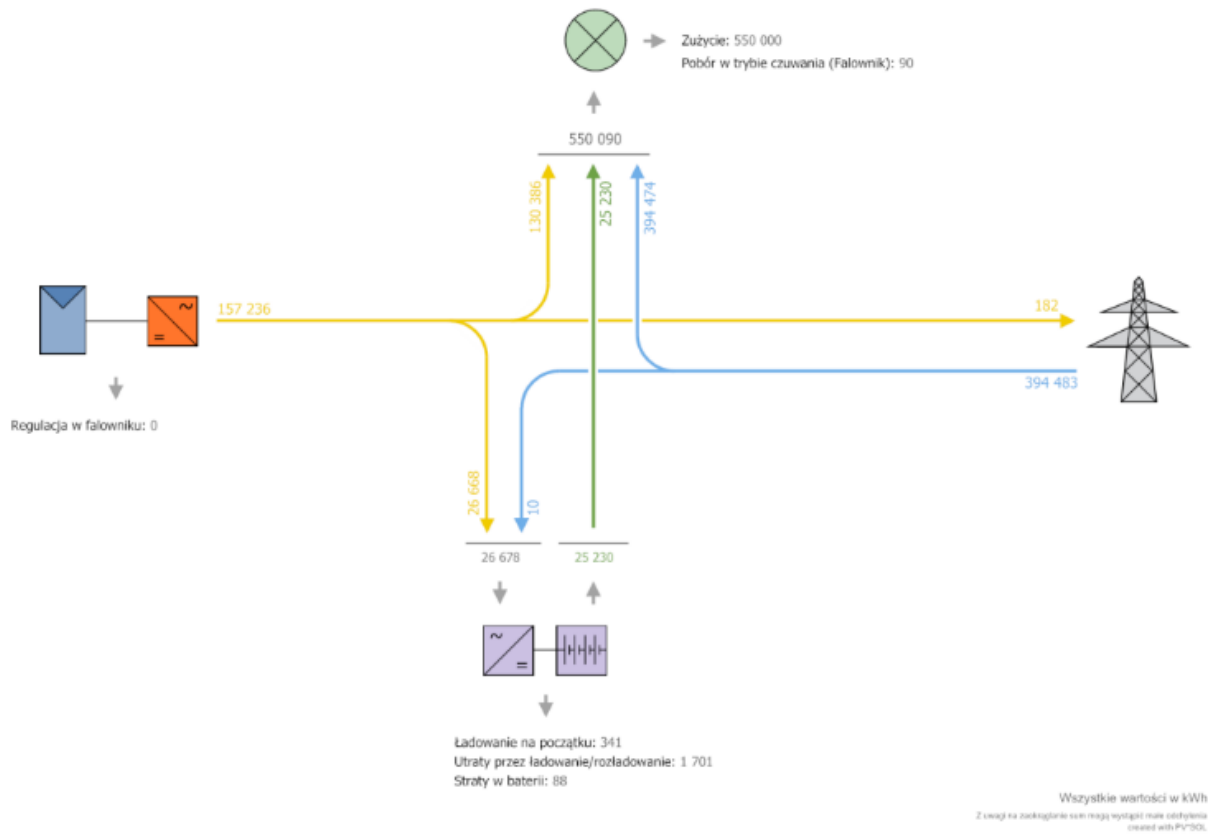


c)



Rysunek 95.a) Zużycie energii z sieci elektrycznej –  $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii –  $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii –  $E_{PV-ME}$  w zależności od pojemności magazynów energii BESS-250/0,2-1,2 –  $P_{ME}$  firmy ELSTA sp. z o.o.

Dla firmy ELSTA sp. z o.o. i instalacji fotowoltaicznej o mocy 150 kWp. również nie można jednoznacznie określić optymalne rozwiązanie. Na podstawie zależności (5) i kosztów inwestycyjnych wybrano magazyn o pojemności 400 kWh. Na rysunku 96 został pokazany schemat przepływu energii dla wybranej instalacji.



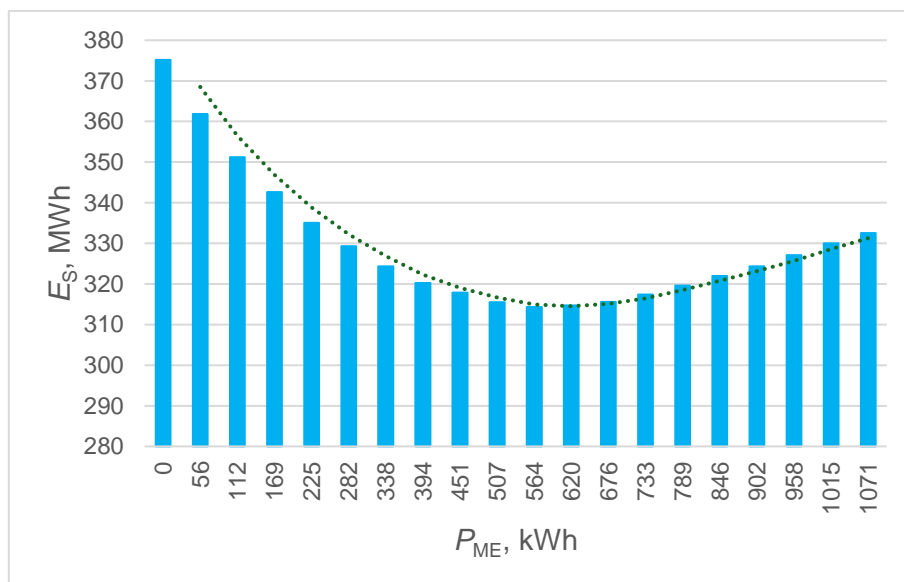
Rysunek 96. Schemat przepływu energii dla ELSTA sp. z o.o. 150kW o pojemności 400 kWh

**Wariant 2:**

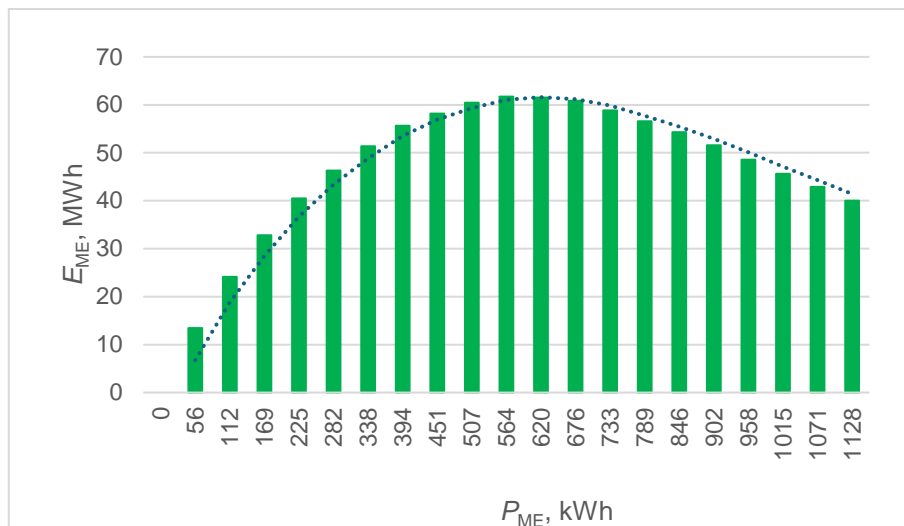
Instalacja 250 kWp. - M-TEC Energy Systems GmbH.

Na rysunku 97 przedstawiono wykresy wyznaczonych energii dla magazynu Gewerbespeicher Energy Block firmy M-TEC Energy Systems GmbH.

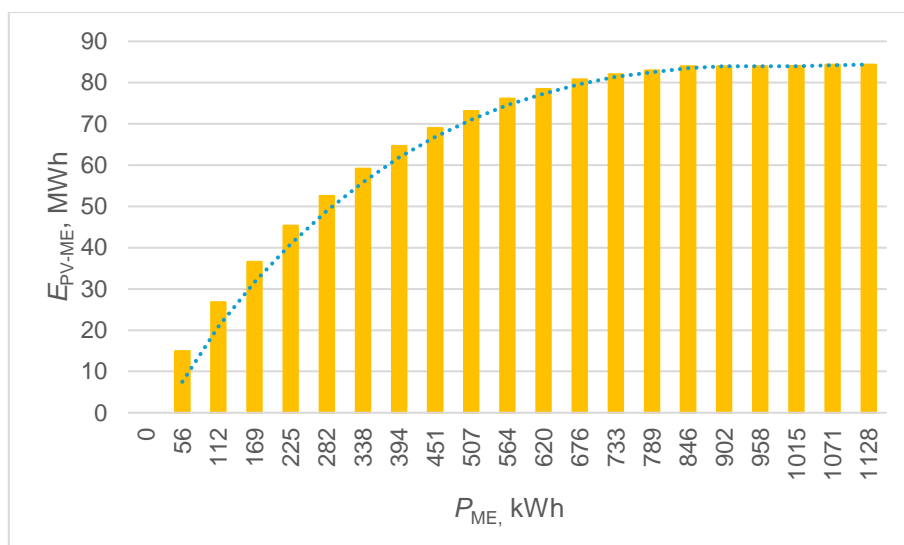
a)



b)

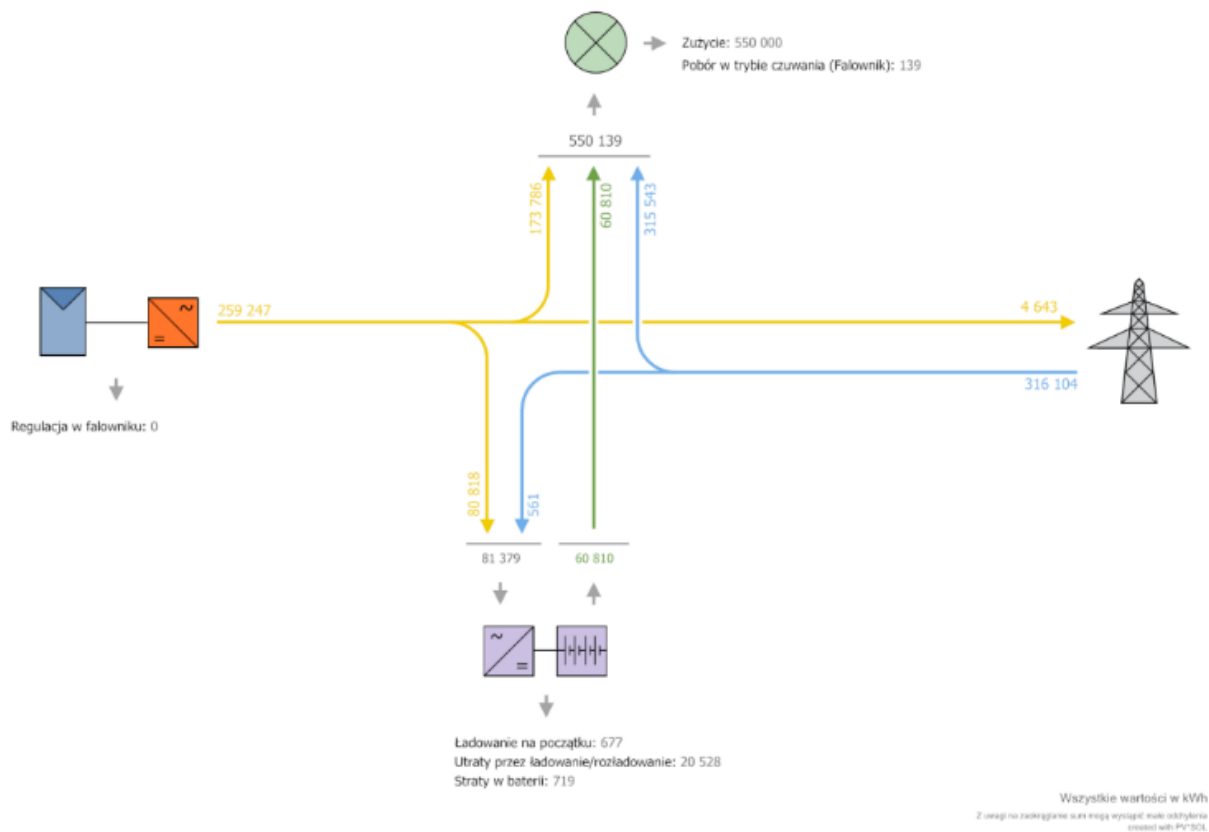


c)



Rysunek 97. a) Zużycie energii z sieci elektrycznej –  $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii –  $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii –  $E_{PV-ME}$  w zależności od pojemności magazynów energii – PME firmy M-TEC Energy Systems GmbH

W przypadku instalacji fotowoltaicznej o mocy 250 kWp. i magazynu energii firmy M-TEC Energy Systems GmbH. optymalnym rozwiązaniem pozwalającym minimalizację zakupu energii elektrycznej jest magazyn Gewerbespeicher Energy Block o pojemności 676kWh. Na rysunku 98 został pokazany schemat przepływu energii dla tej instalacji fotowoltaicznej o mocy 250 kWp. i magazynu energii Gewerbespeicher Energy Block firmy M-TEC Energy Systems GmbH. o pojemności 676 kWh.

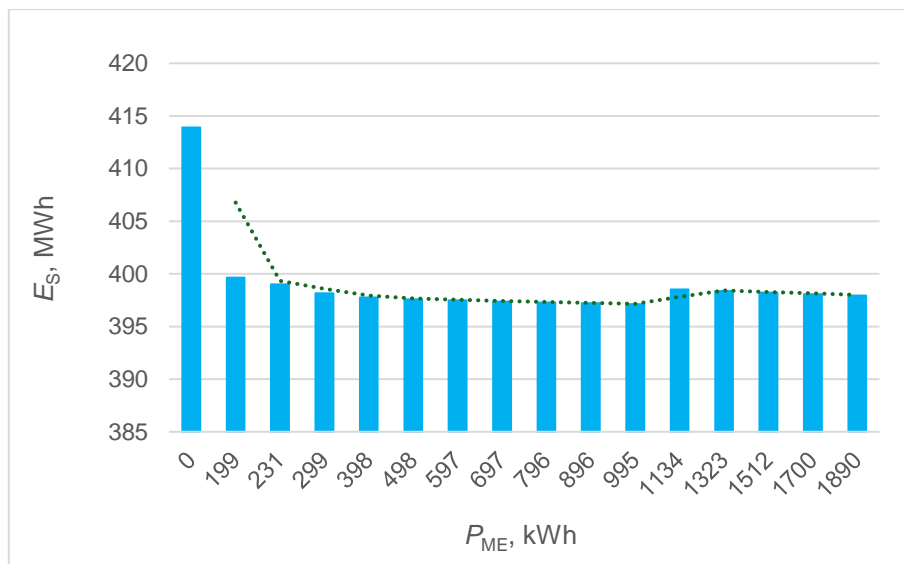


Rysunek 98. Schemat przepływu energii dla Gewerbespeicher Energy Block 676 kWh

Instalacja 250 kWp. - Neom International GmbH.

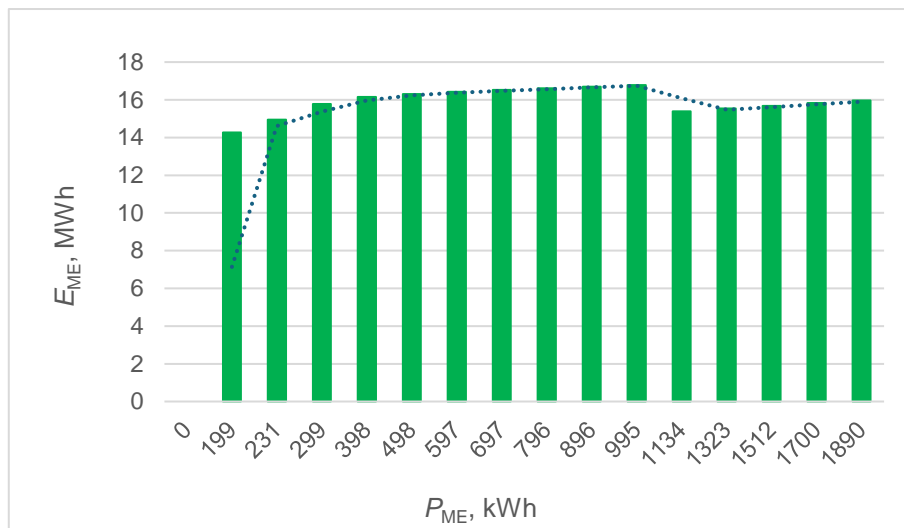
Na rysunku 99 przedstawione zależności poszczególnych energii dla magazynu energii NEOOM BLOKK 160 kW.

a)

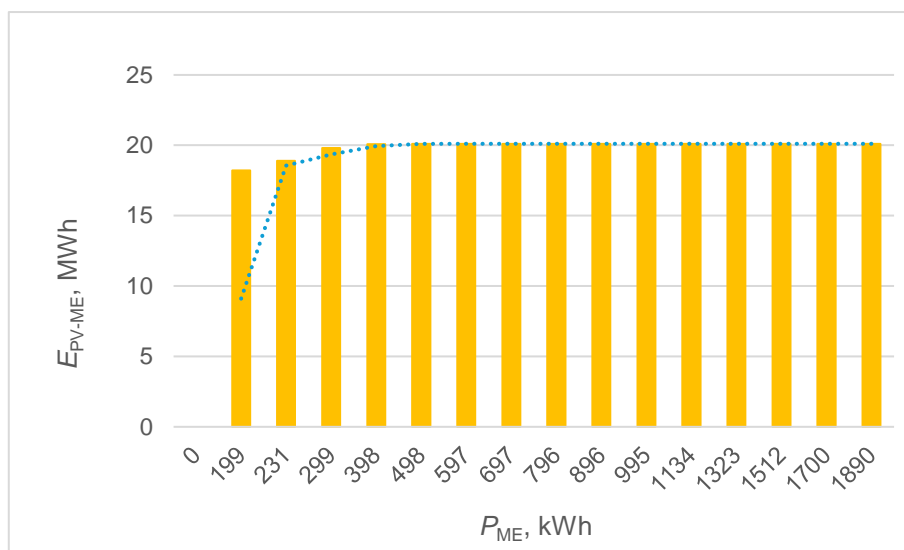




b)

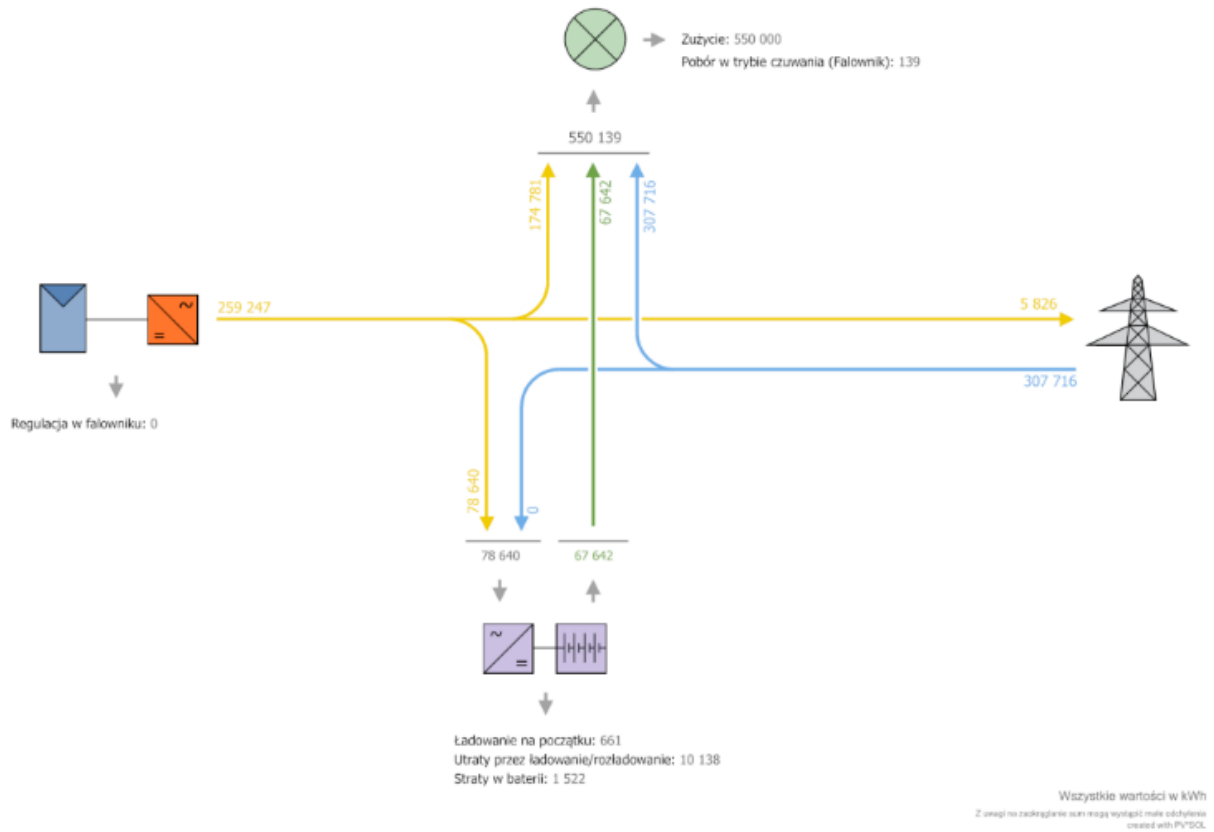


c)



Rysunek 99. a) Zużycie energii z sieci elektrycznej –  $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii –  $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii –  $E_{PV-ME}$  w zależności od pojemności magazynów energii – PME firmy Neoom International GmbH

W przypadku tej instalacji również trudno określić optymalne rozwiązanie. Korzystając z zależności (5), zdecydowano się na magazyn NEOOM BLOKK o pojemności 676 kWh. Na rysunku 100 został pokazany schemat przepływu energii dla tej instalacji fotowoltaicznej o mocy 250 kWp. i magazynu energii NEOOM BLOKK 160 kW firmy Neoom International GmbH o pojemności 697 kWh.

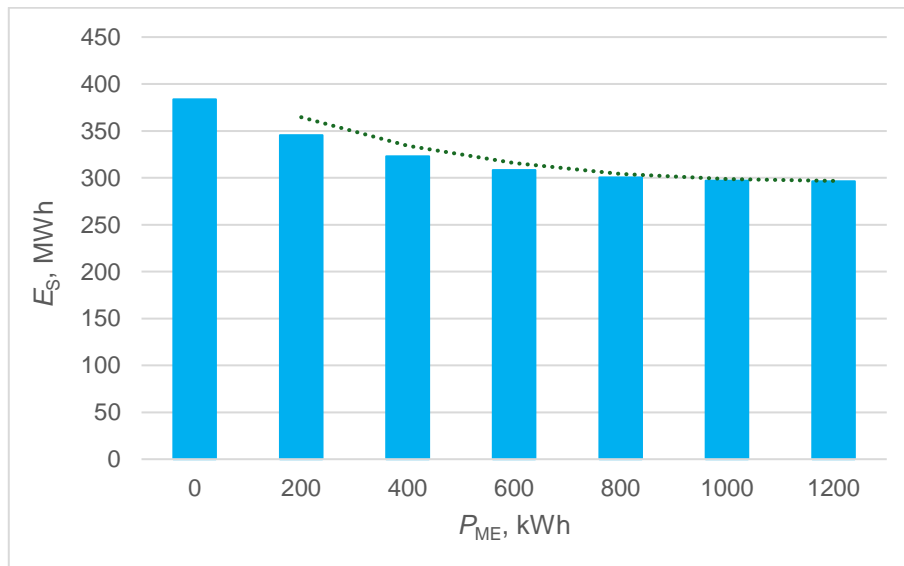


Rysunek 100. Schemat przepływu energii dla NEOOM BLOKK 160 kW 697 kWh

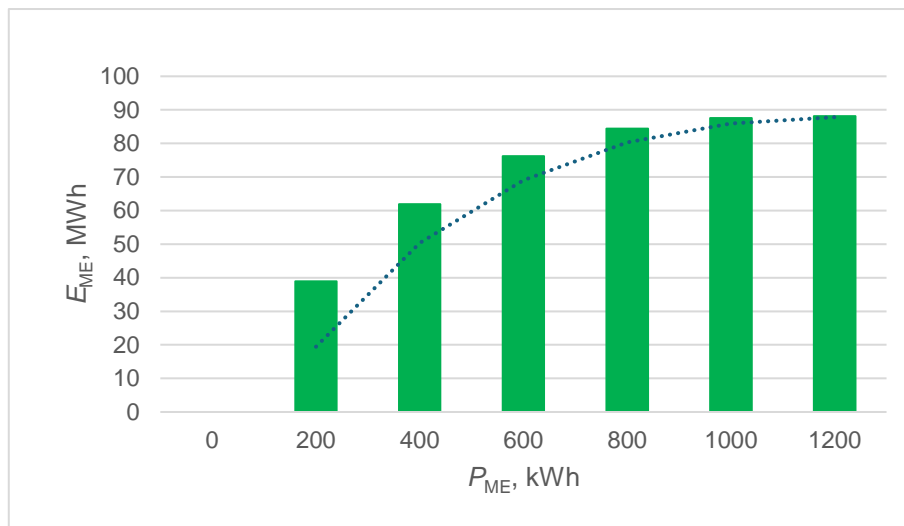
Instalacja 250 kWp. – ELSTA sp. z o.o.

Ostatnim analizowanym magazynem energii był modułowy układ BESS-250/1,2 firmy ELSTA sp. z o.o. o mocy 250 kW. Na rysunku 101 przedstawiono zależności poszczególnych energii w zależności od pojemności magazynu.

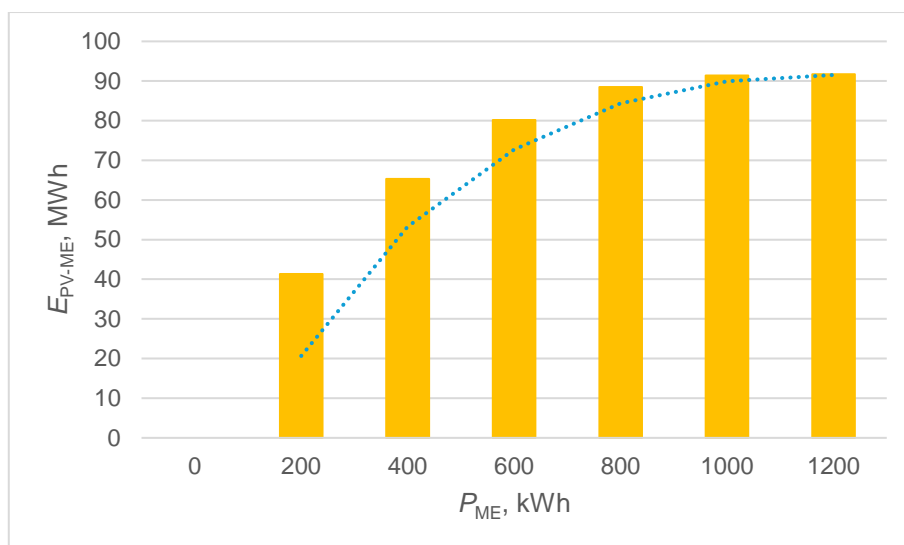
a)



b)

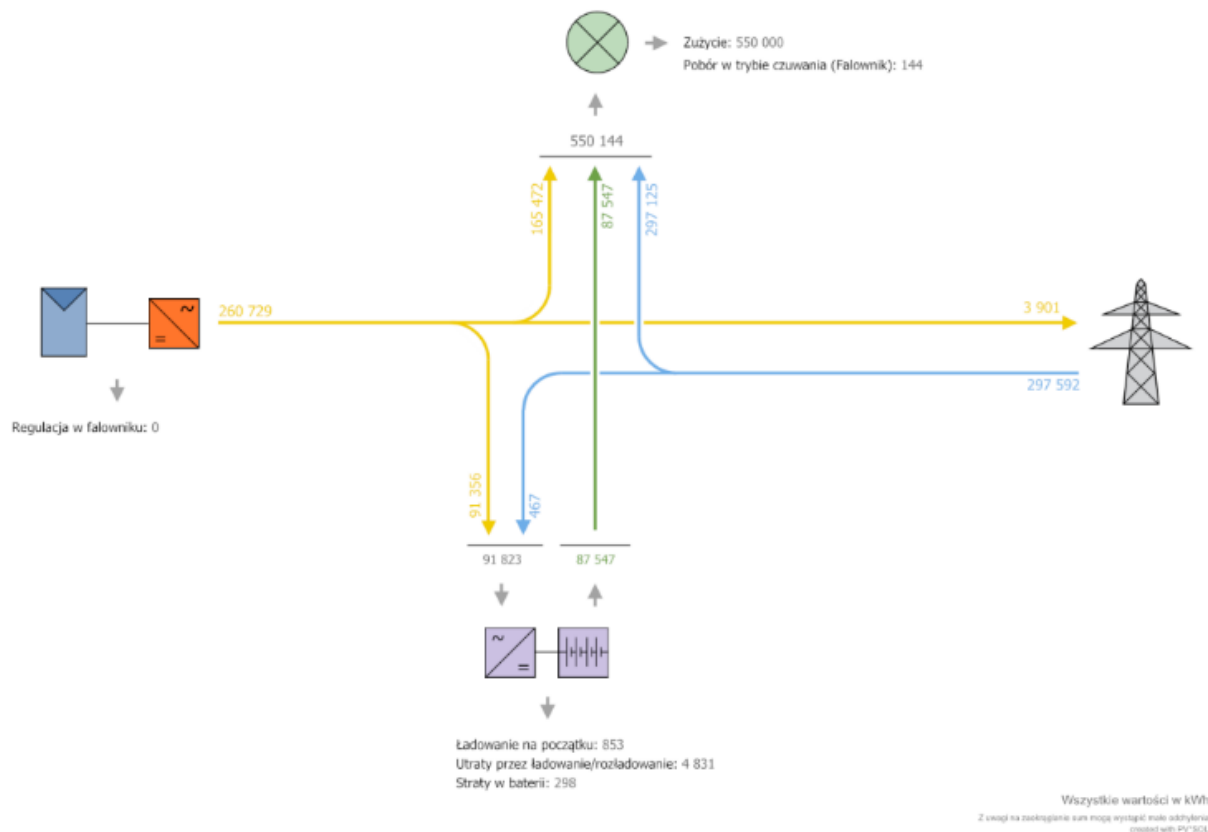


c)



Rysunek 101. a) Zużycie energii z sieci elektrycznej –  $E_S$ , b) przepływ energii z magazynu energii –  $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii –  $E_{PV-ME}$  w zależności od pojemności magazynów energii –  $P_{ME}$  firmy ELSTA sp. z o.o.

Dla firmy ELSTA sp. z o.o. i instalacji fotowoltaicznej o mocy 250 kWp. również nie można jednoznacznie określić optymalne rozwiązanie. Na podstawie zależności (5) i kosztów inwestycyjnych wybrano magazyn o pojemności 1000 kWh. Na rysunku 102 został pokazany schemat przepływu energii dla wybranej instalacji.



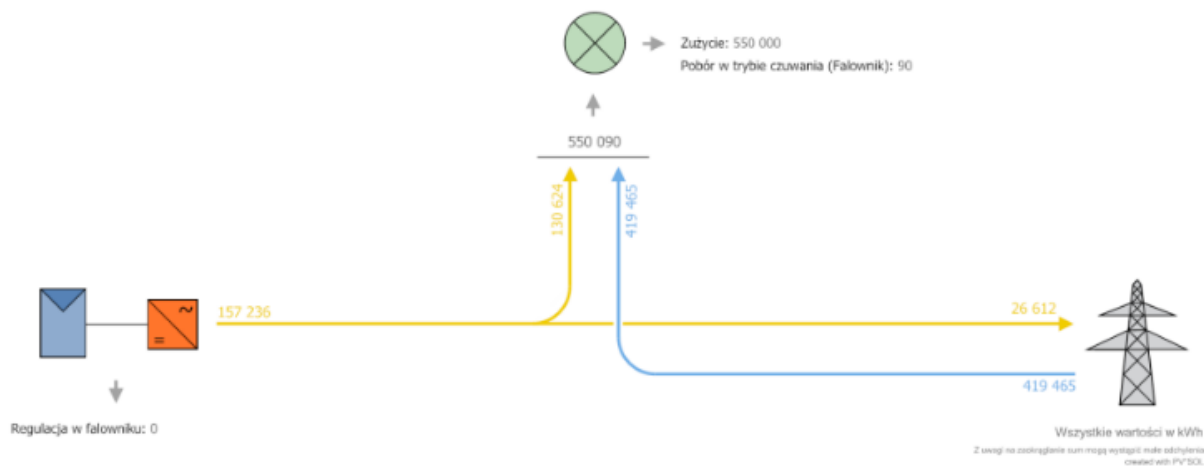
Rysunek 102. Schemat przepływu energii dla ELSTA sp. z o.o. o pojemności 1000 kWh

#### 6.5.4 Analiza opłacalności inwestycji

W przeprowadzonej analizie opłacalności uruchomienia instalacji fotowoltaicznej uwzględnione zostały:

- faktyczne zużycie energii elektrycznej,
- aktualny koszt energii elektrycznej,
- szacowany wzrost cen energii elektrycznej wynikający z cen na TGE,
- roczny spadek mocy modułów,
- koszt wykonania instalacji.

Koszty budowy instalacji fotowoltaicznej na gruncie o mocy 150 kWp. wynoszą ok. 525 000 zł netto co daje 3 500 zł netto na 1 kWp. Dla budynku biurowego KS-133 podpisana jest umowa na dostawę energii elektrycznej w tzw. SPOT czyli Rynku Dnia Następnego (RDN). W ramach RDN energii elektrycznej dostępne są kontrakty godzinowe i blokowe (bazowe, szczytowe oraz poza szczytem). Zmiany na RDN obrazowane są obecnie przez 6 indeksów cenowych odnoszących się do dnia oraz pory dnia dostawy. Sumaryczna średnia cena zakupu energii elektrycznej (z opłatami dystrybucyjnymi) w 2023 r. wynosiła 982,25 zł netto/MWh, natomiast średnia cena sprzedaży w systemie rozliczeń Net-billing wynosiła 448 zł netto/MWh. Net-billing to funkcjonujący obecnie system prosumencki, opierający się na wartości energii w chwili wytworzenia. Korzystający z niego prosumenci “odsprzedają energię” do sieci – według tzw. RCEm (rynkowej ceny energii elektrycznej – miesięcznej). Na rysunku 103 został pokazany schemat przepływu energii dla instalacji 150 kWp. bez magazynu energii.



Rysunek 103. Schemat przepływu energii dla instalacji fotowoltaicznej 150 kWp

Dzięki uruchomieniu instalacji fotowoltaicznej o mocy 150 kWp. jej szacowana produkcja wynosi rocznie 157,236 MWh, z czego zakup energii elektrycznej będzie mniejszy o 130,624 MWh, którą należałoby zakupić po cenie 0,98225 zł/kWh oraz dodatkowo będzie można sprzedać 26,612 MWh nadwyżki energii elektrycznej po cenie 0,448 zł/kWh, co daje razem rocznie 140 227 zł oszczędności (rys. 103). Stąd koszt budowy instalacji wynoszący 525 000 zł zwraca się po trzech latach i dziewięciu miesiącach. W przypadku uruchomienia instalacji fotowoltaicznej z magazynem energii BESS-150/0,4 firmy ELSTA sp. z o.o. o pojemności 400 kWh, zakup energii elektrycznej będzie mniejszy o 155,559 MWh, koszt zwrotu wynosi 0,98225 zł/kWh. Przy jednoczesnej nadwyżce energii elektrycznej 0,182 MWh, którą będzie można sprzedać w cenie 0,448 zł/kWh (rys. 96). Uzyskane roczne oszczędności są szacowane na 152 700 zł. Przy koszcie budowy instalacji wynoszącej ok. 2 175 000 zł instalacja zwraca się po czternastu latach i trzech miesiącach. Po uzyskaniu wysokiego dofinansowania do budowy instalacji w wysokości 60% okres zwrotu budowy instalacji skraca się do pięciu lat i dziewięciu miesięcy.

W tabeli 17 zestawiono roczne oszczędności oraz stopę zwrotu inwestycji dla firmy ELSTA sp. z o.o. (tylko dla tej firmy udało się uzyskać koszty inwestycji). Zestawienie stopy zwrotu przygotowano również po uzyskaniu dofinansowania w wysokości 60%.

Tabela 17. Zestawienie kosztów dla wybranych instalacji PV i magazynu energii firmy ELSTA

PV	ME, ELSTA	Koszt budowy, tys. zł	Zysk, MWh	Zysk, tys. zł	Stopa zwrotu,	Stopa zwrotu 60%
150 kWp	-	525	157,236	140,227	3 lata, 9 m-cy	1 rok, 6 m-cy
150 kWp.	150/400 kWh	2 175	155,559	152,700	14 lat, 3 m-ce	5 lat 8 m-cy
250 kWp.	250/1000 kWh	3 175	255,470	248,851	12 lat, 9 m-cy	5 lat, 1 m-c

Przewidywana żywotność magazynu energii elektrycznej, która jest zależna od liczby cykli pracy (przy 6000 cyklach) wynosi ona ok. 10-16 lat. Oczywiście wielkość instalacji fotowoltaicznej decyduje o koszcie magazynu energii i jego stopie zwrotu. W celu znalezienia optymalnego rozwiązania przeprowadzono analizę przepływu energii w instalacjach fotowoltaicznych o mocach od 150kWp. do 450kWp. współpracujących z modułowym magazynem energii BESS-500/1,2 polskiego producenta ELSTA Sp. z o.o. (rys. 104) [160].



Rysunek 104. Modułowy magazyn energii BESS-500/1,2 [160]

## 7 Podsumowanie i wnioski

Polska dopiero rozpoczyna swoją transformację energetyczną. Zwiększająca się liczba instalacji OZE m.in. fotowoltaicznych pozwoliła na osiągnięcie ponad 17 GW mocy, z czego 95% to instalacje niezależne od energetyki zawodowej, a prawie 60% to mikroinstalacje prosumenckie. Działania na rzecz zwiększenia efektywności energetycznej w przedsiębiorstwie mogą przynieść wymierne korzyści zarówno w kontekście oszczędności energii, jak i ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko. To jeden z najlepszych sposobów na sprostanie wyzwaniom, przed którymi stoi Polska, a które wynikają z coraz bardziej ograniczonych zasobów energetycznych oraz rosnącego uzależnienia od importu energii z zagranicy. Zwiększenie udziału energii wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii przyczynia się również do zwiększenia świadomości społecznej dotyczącej efektywności energetycznej. Pojawiające się w przestrzeni publicznej dyskusje poruszają problemy wybranych zagadnień związanych z efektywnością energetyczną budynków (również w zakresie bezpieczeństwa dostaw energii i bezpieczeństwa środowiskowego). Kluczowy wpływ na poprawę efektywności energetycznej budynków mają instalacje energetyczne, wykorzystujące odnawialne źródła energii.

W pracy przedstawiono system sterowania Inteligentnym budynkiem biurowym wyposażonym w Centrum Przetwarzania Danych (Data Center). Projekt ten został wdrożony w istniejącym budynku biurowym, dla którego wybudowano serwerownię (Data Center).

Na podstawie zarejestrowanych danych oraz ich analizy stwierdzono:

1. Rozwój automatyki budynku pokazuje, jak nowoczesne technologie mogą poprawić jakość życia i zrównoważony rozwój. Dzięki nowoczesnym rozwiązaniom, można budować budynki, które są nie tylko efektywne energetycznie, ale również bardziej komfortowe i bezpieczne dla ich użytkowników. Nowoczesne instalacje niskoprądowe są nieodłącznym elementem współczesnych budynków, zapewniając bezpieczeństwo, komfort, efektywność energetyczną i łatwość zarządzania. Dzięki integracji z zaawansowanymi technologiami, takimi jak: internet rzeczy (IoT) i sztuczna inteligencja (AI), instalacje te stanowią fundament inteligentnych budynków przyszłości. Pomimo wyzwań związanych z kosztami i bezpieczeństwem cybernetycznym, korzyści płynące z ich zastosowania są znaczące i przekładają się na zrównoważony rozwój i lepszą jakość życia użytkowników budynków.
2. KNX jest systemem, który dobrze się sprawdza w przypadku budynków biurowych wyposażonych w Data Center. Dostarcza on inteligentne rozwiązania, które są uniwersalne, bezpieczne i pozwalają na integrację wielu instalacji. Jest to solidny standard, który zapewnia interoperacyjność, wysoką jakość i elastyczność w różnych zastosowaniach i typach budynków.

3. Analiza wyników badań wstępnych pozwoliła określić zapotrzebowanie na energię elektryczną pomieszczeń skierowanych w różne strony świata oraz udział ciepła w pomieszczeniach, którego źródłem jest promieniowanie słoneczne. Bezpośrednie promieniowanie słoneczne, szczególnie w pomieszczeniach skierowanych na południe jest przyczyną wzrostu temperatury w pomieszczeniu ponad wartości przekraczające temperatury maksymalne wynikające z komfortu cieplnego. Na podstawie zarejestrowanych temperatur dla pomieszczenia 104 (strona południowa) stwierdzono, że średnia temperatura tego pomieszczenia jest o ponad 1,5°C wyższa niż w pomieszczeniu znajdującym się w północnej stronie budynku.
4. Czynniki ustawienia okna w stosunku do promieniowania słonecznego należy uwzględniać w systemie ogrzewania budynku. Jest możliwe opracowanie dokładnych modeli termicznych dla pojedynczych pomieszczeń. Modele te mogą również uwzględniać wpływ głównego źródła ciepła oraz wpływ dodatkowej energii pochodzącej z zewnętrznego okna wystawionego na działanie promieniowania słonecznego. Stosując dokładne modele termiczne pomieszczeń, można uniknąć przekroczenia nastawionej temperatury w pomieszczeniu, a także na podstawie prognozy temperatury zewnętrznej i nasłonecznienia można obniżyć koszty zużycia.
5. W budynkach biurowych wyposażonych w serwerownie z Centrami Przetwarzania Danych udział pobieranej energii na rzecz serwerowni to około 40 do 50%.
6. Stosowanie modeli predykcyjnych wykorzystujących narzędzia informatyczne pozwalają dokonać oceny działania systemu ogrzewania i chłodzenia w budynku. Na podstawie analizy istotności atrybutów, przeprowadzonej dla budynku biurowego wyposażonego w CPD, stwierdzono, że istotnymi zmiennymi są temperatura zewnętrzna, moc serwerów i temperatura w kanale zimnym. Te informacje były podstawą do wprowadzenia zmian w systemie chłodzenia pomieszczenia serwerowni. Wyniki zaprezentowane w tabeli 15 dowodzą, że zmiany wprowadzone w systemie klimatyzacji dały pożądany efekt. Znormalizowany błąd RMSE, w okresie 4 (po zmianach), wynosi 0,17294 i był mniejszy niż dla okresu 2 (przed zmianami), gdzie ten błąd wyniósł 0,38672.
7. Dokładne przewidywanie temperatury w kanale ciepłym jest niezwykle istotne z punktu widzenia możliwości regulacji temperatury w systemie klimatyzacyjnym. Wzrost temperatury powietrza napływającego do szaf serwerów zmniejsza zużycie energii.
8. Przed wyborem instalacji PV z lub bez magazynu energii dla budynku należy przeprowadzić analizę opłacalności. Dla wybranego budynku biurowego wyposażonego w Centrum Przetwarzania Danych (CPD) zysk w układzie bez magazynu, a z magazynem to od 140 do 248 tys. zł. Wysokie koszty zakupu magazynu energii powodują, że należy bardzo dokładnie przeanalizować dobór jego pojemności w stosunku do jego możliwości zmniejszenia zakupów energii dla danej instalacji. Średnioroczna produkcja energii z instalacji fotowoltaicznej



wyposażonej w magazyn energii o mocy 150 kWp., w przypadku analizowanego budynku pozwala na oszczędność energii o ok. 20%. Budowa takiej instalacji fotowoltaicznej jest inwestycją, która zwraca się po trzech latach i dziewięciu miesiącach, a w przypadku uzyskania dofinansowania w wysokości 60% po roku i sześciu miesiącach. Dalsza rozbudowa tej instalacji o magazyn energii elektrycznej o pojemności 400 kWh zwraca się w okresie 89% granicy żywotności magazynu energii elektrycznej, a po uzyskaniu 60% dofinansowania zwraca się w okresie 36% granicy żywotności magazynu energii elektrycznej.

9. Ze względu na dużą różnicę ceny pomiędzy zakupioną energią elektryczną, a sprzedawaną do operatora należy maksymalnie zwiększać zużycie na potrzeby własne i wykorzystanie magazynu energii. W projektowaniu instalacji PV z magazynem energii należy uwzględnić funkcjonalność sterującej automatyki EMS (dedykowany system zarządzania energią) o możliwość magazynowania energii przy jak najniższych cenach zakupu energii elektrycznej i jej sprzedaży przy wysokich dziennych cenach sprzedaży.
10. Porównanie zużycia energii w serwerowni w okresie między 5 a 8 marca 2023 r. (przed zmianą ustawień klimatyzacji) z okresem między 10 a 13 marca 2023 r. (po zmianie ustawień klimatyzacji), pozwoliło ocenić skutek podjętych działań. W pierwszym okresie zużycie energii elektrycznej serwerowni wyniosło 2529,52 kWh, natomiast w drugim 2403,25 kWh. Zużycie energii zmniejszyło się o ok. 5%. Moc serwerów w obu analizowanych okresach była stała i wynosiła 28,8 kW. Natomiast sumaryczna moc serwerowni (moc serwerów i moc systemu chłodzenia) została zmniejszona z 43,65 kW do 36,6 kW. Co spowodowało zmniejszenie zapotrzebowania na moc o 16,15%. Przedstawione wyniki potwierdzają uzyskane oszczędności w wyniku wprowadzonych w układzie sterowania klimatyzacją usprawnień.

Inteligentne budynki reprezentują przyszłość zarządzania nieruchomościami, oferując szeroki zakres korzyści, takich jak oszczędność energii, zwiększony komfort użytkowników, bezpieczeństwo i zrównoważony rozwój. Choć wdrożenie tych technologii wiąże się z pewnymi wyzwaniami, korzyści wynikające z ich zastosowania są znaczące. Dzięki ciągłemu rozwojowi technologii, inteligentne budynki będą odgrywać coraz większą rolę w tworzeniu bardziej zrównoważonych, efektywnych i komfortowych środowisk życia i pracy. Systemy Automatyki Budynkowej oferują znaczące korzyści, w tym poprawę efektywności energetycznej, komfortu użytkowników oraz bezpieczeństwa. Jednakże, ich wdrożenie wiąże się również z wyzwaniami, takimi jak wysokie koszty początkowe, złożoność techniczna oraz potencjalne zagrożenia cybernetyczne. W przyszłości, rozwój technologii oraz spadek kosztów instalacji mogą sprawić, że systemy automatyki budynkowej staną się standardem w zarządzaniu budynkami.

Biorąc pod uwagę wyniki badań przedstawionych w rozprawie można stwierdzić, że cel pracy: *opracowanie i wdrożenie systemu sterowania w budynku biurowym wyposażonym w Data Center, który umożliwi współdziałanie znajdujących się w nim instalacji. Tak zaprojektowany system pozwoli ograniczyć zużycie energii, poprawić bezpieczeństwo oraz jakość ergonomiczną środowiska pracy* został osiągnięty. Udowodniona została również postawiona teza, mówiąca że: *można opracować i wdrożyć system sterowania, który reaguje odpowiednio na potrzeby użytkownika budynku biurowego wyposażonego w Centrum Przetwarzania Danych (Data Center)*. Obniżenie zużycia energii będzie następstwem nie tylko kompleksowego sterowania instalacjami w budynku biurowym wyposażonym w Data Center, ale także instalacją OZE wyposażoną w magazyny energii.

## 8 Literatura

- [1] Lund H., Mathiesen B.V. Energy system analysis of 100% renewable energy systems-The case of Denmark in years 2030 and 2050. *Energy*, 34, 2009. 524–531.
- [2] Seungkeun Y., Hakpyeong K., Taehoon H., Minhyun L. Determining the optimal window size of office buildings considering the workers' task performance and the building's energy consumption. *Build. Environ.*, 177, 2020. 106872.
- [3] Lakruwan T., Karunaratne W., De Silva N. Demand-side energy retrofit potential in existing office buildings. *Built Environ. Proj. Asset Manag.*, 9, 2019. 426–439
- [4] Hong T., Yan D., D'Oca S., Chen C. Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. *Build. Environ.*, 114, 2017. 518–530.
- [5] Mahdavi A., Mohammadi A., Kabir E., Lambeva L. Occupants' operation of lighting and shading systems in office buildings. *J. Build. Perform. Simul.*, 1, 2008. 57–65.
- [6] Peng Y., Rysanek A., Nagy Z., Schlüter A. Occupancy learning-based demand-driven cooling control for office spaces. *Build. Environ.*, 122, 2017. 145–160.
- [7] Masoso O.T., Grobler L.J. The dark side of occupants' behaviour on building Energy use. *Energy Build.*, 42, 2010. 173–177.
- [8] Mofidi F., Akbari H. . Intelligent buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 223, 2020. 1–24.
- [9] Mendizabal M., Heidrich O., Feliu E., García-Blanco G., Mendizabal A. Stimulating urban transition and transformation to achieve sustainable and resilient cities. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 94, 2018. 410–418.
- [10] Wei Y., Zhang X., Shi Y., Xia L., Pan S., Wu J., Han M., Zhao X. A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 82, 2018. 1027–1047.
- [11] Yang L., Yan H., Lam J.C. Thermal comfort and building energy consumption implications—A review. *Appl. Energy*, 115, 2014. 164–173.
- [12] Kula A., Smalcerz A., Sajkowski M., Kamiński Z. Analysis of Office Rooms Energy Consumption Data in Respect to Meteorological and Direct Sun Exposure Conditions. *Energies* 2021, 14, 7590.
- [13] Fumo N. A review on the basics of building energy estimation. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 31, 2014. 53–60.
- [14] Pan S., Wang X., Wie Y., Zhang X., Gal C., Ren G., Yan D., Shi Y., Wu J., Xia L. Cluster analysis for schedule based electricity load patterns in buildings: A case study in Shanghai residences. *Build. Simul.*, 10, 2017. 889–898.
- [15] De Nadai M., Van Someren M. Short-term anomaly detection in gas consumption through ARIMA and Artificial Neural Network forecast. In *Proceedings of the 2015 IEEE Workshop on*

- Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS) Proceedings, Trento, Italy, 9–10 July 2015, IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2015, 250–255.
- [16] Wang J.Q., Du Y., Wang J. LSTM based long-term energy consumption prediction with periodicity. *Energy*, 197, 2020. 117197.
- [17] Li Z., Dai J., Chen H., Lin B. An ANN-based fast building energy consumption prediction method for complex architectural form at the early design stage. *Build. Simul.*, 12, 2019. 665–681.
- [18] Ahmad A.S., Hassan M.Y., Abdullah M.P., Rahman H.A., Hussin F., Abdullah H., Saidur R. A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 33, 2014. 102–109.
- [19] Zhao H.X., Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16, 2012. 3586–3592.
- [20] Wang Z., Hong T., Piette M.A. Building thermal load prediction through shallow machine learning and deep learning. *Appl. Energy*, 263, 2020. 114683.
- [21] Fan C., Xiao F., Zhao Y. A short-term building cooling load prediction method using deep learning algorithms. *Appl. Energy*, 195, 2017. 222–233.
- [22] Sendra-Arranz R., Gutiérrez A. A long short-term memory artificial neural network to predict daily HVAC consumption in buildings. *Energy Build.*, 216, 2020. 109952.
- [23] Zhou C., Fang Z., Xu X., Zhang X., Ding Y., Jiang X. Using long short-term memory networks to predict energy consumption of air-conditioning systems. *Sustain. Cities Soc.* 2020, 55, 102000.
- [24] Satre-Meloy A., Diakonova M., Grünwald P. Cluster analysis and prediction of residential peak demand profiles using occupant activity data. *Appl. Energy*, 260, 2020. 114246.
- [25] Kim T.Y., Cho S.B. Predicting residential energy consumption using CNN-LSTM neural networks. *Energy*, 182, 2019. 72–81.
- [26] Huang L., Wang J. Global crude oil price prediction and synchronization based accuracy evaluation using random wavelet neural network. *Energy* 151, 2018. 875–888.
- [27] Li X., Wen J. Review of building energy modeling for control and operation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37, 2014. 517–537.
- [28] Li Q., Meng Q., Cai J.; Yoshino, H.; Mochida, A. Applying support vector machine to predict hourly cooling load in the building. *Appl. Energy*. 86, 2009. 2249–2256.
- [29] Liu D., Chen Q. Prediction of building lighting energy consumption based on support vector regression. In *Proceedings of the 2013 9th Asian Control Conference, Istanbul, Turkey, 23–26 June 2013*; 1–5.
- [30] Borges C.E., Peña Y.K., Fernández I.; Prieto J.; Bretos O. Assessing tolerance-based robust short-term load forecasting in buildings. *Energies*, 6, 2110. 2013.

- [31] Xuemei L., Jinhu L., Lixing D., Gang X., Jibin L. Building cooling load forecasting model based on LS-SVM. In Proceedings of the 2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing, Shenzhen, China, 18–19 July 2009; IEEE: Piscataway, NJ, USA, Volume 1, 2009. 55–58.
- [32] Peña Y.K., Borges C.E., Agote D., Fernández I. Short-term load forecasting in airconditioned non-residential buildings. In Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, Poland, 27–30 June 2011; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2011; 1359–1364.
- [33] Platon R., Dehkordi V.R., Martel J. Hourly prediction of a building's electricity consumption using case-based reasoning, artificial neural networks and principal component analysis. *Energy Build.* 92, 2015. 10–18.
- [34] Jain R.K., Damoulas T., Kontokosta C.E. Towards data-driven energy consumption forecasting of multi-family residential buildings: Feature selection via The Lasso. *Comput. Civ. Build. Eng.* 2016, 1675–1682.
- [35] Hou Z., Lian Z., Yao Y., Yuan X. Cooling-load prediction by the combination of rough set theory and an artificial neural-network based on data-fusion technique. *Appl. Energy* 83, 2006. 1033–1046.
- [36] Fan C., Xiao F., Wang S. Development of prediction models for next-day building energy consumption and peak power demand using data mining techniques. *Appl. Energy* 127, 2014. 1–10.
- [37] Chou J.-S., Bui D.-K. Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design. *Energy Build.* 82, 2014. 437–446.
- [38] Li Q., Meng Q., Cai J., Yoshino H., Mochida A. Predicting hourly cooling load in the building: A comparison of support vector machine and different artificial neural networks. *Energy Convers. Manag.* 50, 2009. 90–96.
- [39] Li Q., Ren P., Meng Q. Prediction model of annual energy consumption of residential buildings. In Proceedings of the 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering, Beijing, China, 19–20 June 2010; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2010. 223–226.
- [40] Instalacje Niskoprądowe – Rodzaje i Zastosowanie Infomech (<https://monitoring.infomech.pl/instalacje-domowe/instalacje-niskopradowe/>)
- [41] Czym są instalacje niskoprądowe oraz gdzie się je stosuje? Teldata (<https://teldata.pl/oferta/instalacje-nisko-pradowe>)
- [42] Główne właściwości i zastosowanie instalacji niskoprądowych Ampertech (<https://www.ampertech.pl/blog/w-jakim-celu-stosuje-sie-instalacje-niskopradowe>)
- [43] Instalacje niskoprądowe – Atende (<https://atende.pl/pl/instalacje-niskopradowe>)

- [44] Vanus J., Gorjani O.M., Bilik P., Novel Proposal for Prediction of CO<sub>2</sub> Course and Occupancy Recognition in Intelligent Buildings within IoT, *Energies*, 12, 2019, 1-25, doi:10.3390/en12234541
- [45] Markiewicz P., Smart project & building” – projektowanie budynków energooszczędnych w standardzie BIM, *Housing Environment*, 21 nr 5, 2017. 72-82, Doi: 10.4467/25438700SM.17.070.7927
- [46] Lee S., Karava P. . Towards smart buildings with self-tuned indoor thermal environments – A critical review. *Energy and Buildings*. 224, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110172>.
- [47] Farrokhifar M., Momayyezi F., Sadoogi N., Safari A.. Real-time based approach for intelligent building energy management using dynamic price policies. *Sustainable Cities and Society*. 37, 2018, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.011>.
- [48] Younus M.U.,Islam S., Ali I., Khan S., Khan M.K.. A survey on software defined networking enabled smart buildings: Architecture, challenges and use cases. *Journal of Network and Computer Applications*. 137, 2019, 62–77.
- [49] The Edge, Amsterdam - Case Study (<https://bregroup.com/case-studies/the-edge-amsterdam>) [dostęp 02.03.2024]
- [50] Smart building case studies five of the world’s most intelligent buildings an intelligent building europe 2020 ebook. (<https://s33644.pcdn.co/wp-content/uploads/2020/06/Intelligent-Building-Top-5-Smart-Buildings-ebook.pdf>)
- [51] Jean Nouvel, Bertram Beissel, Case Study: One Central Park, Sydney, *CTBUH Journal*, Issue IV, 2014.
- [52] Intelligent Buildings - Definition and Characteristics - [<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317303797> dostęp 12.05.2024 r.].
- [53] Role of IoT in Intelligent [<https://www.iottechexpo.com> dostęp 12.05.2024 r.].
- [54] AI in Building Management Systems- [<https://www.ai-techpark.com/ai-in-building-management-systems-bms/> dostęp 12.05.2024 r.].
- [55] Sustainability and Smart Buildings-[ <https://www.greentechmedia.com/articles/category/smart-homes> dostęp 12.05.2024 r.].
- [56] Jia M., Komeily A., Wang Y., Srinivasan R.S. . Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Automation in Construction*. 101, 2019. 111–126. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.023>.

- [57] Zeng, A.; Liu, S.; Yu, Y. Comparative study of data driven methods in building electricity use prediction. *Energy Build.* 194, 2019. 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.029>.
- [58] IEA. Buildings 2022. <https://www.iea.org/reports/buildings> [dostęp 1.03.2024].
- [59] Rahaman, A., Noor, K., Abir, T., Rana, S., Ali, M. Design and Analysis of Sustainable Green Data Center with Hybrid Energy Sources, *Journal of Power and Energy Engineering* 9, 2021. 76-88. doi: 10.4236/jpee.2021.97006.
- [60] Harun, H., Analysis of Barriers to Green Data Centers Implementation in Malaysia, using Interpretive Structural Modelling (ISM), *Information Management and Business Review* 15 (4), 2023. 411-419, DOI:10.22610/imbr.v15i4(SI).3616
- [61] Ramli, S., Jambari, D.I., Mokhtar, U.A. A framework design for sustainability of green data center, 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), November 2017, DOI:10.1109/ICEEI.2017.8312372
- [62] Harish, VSKV., Kumar, A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 56, 2016. 1272–1292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>.
- [63] Negendahl, K. Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Autom Constr* 54, 2015. 39–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.002>.
- [64] Østergård, T., Jensen, R.L., Maagaard, S.E. Building simulations supporting decision making in early design – A review. *Renew Sustain Energy Rev* 61, 2016. 187–201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.045>.
- [65] Bass, B., New, J., Clinton, N., Adams, M., Copeland, B., Amoo, C. How close are urban scale building simulations to measured data? Examining bias derived from building metadata in urban building energy modeling. *Appl Energy* 327, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120049>.
- [66] Huang, S., Lin, Y., Chinde, V., Ma, X., Lian, J. Simulation-based performance evaluation of model predictive control for building energy systems. *Appl Energy* 281. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116027>.
- [67] Coakley, D., Raftery, P., Keane, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renew Sustain Energy Rev* 37, 2014. 123–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- [68] Nguyen, T.A.; Aiello, M. Energy intelligent buildings based on user activity: A survey. *Energy Build.*, 56, 2013. 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.005>
- [69] Farzaneh, H., Malehmirchegini, L., Bejan, A., Afolabi, T., Mulumba, A., Daka, P.P. Artificial Intelligence Evolution in Smart Buildings for Energy Efficiency. *Appl. Sci.* 11, 763, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11020763>

- [70] Du, M. Research on AI-Smart Building. *J. Inf. Technol. Civ. Eng. Archit.* 2018, 10, 1–6.
- [71] Xu, X.; Wu, Z.; Fu, B. Key Technologies for Driving Innovative Application of Intelligent Building. *Build. Electr.* 10, 2019. 57–61.
- [72] Minoli, D., Sohraby, K., Occhiogrosso, B. IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings—Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems. *IEEE Int. Things J.*, 4, 2017. 269–283. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2647881
- [73] Shaikh, P.H., Nor, N.B.M., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., Ibrahim, T. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34, 2014. 409–429. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.027>
- [74] Valinejadshoubi, M.; Moselhi, O.; Bagchi, A.; Salem, A. Development of an IoT and BIM-based automated alert system for thermal comfort monitoring in buildings. *Sustain. Cities Soc.* 66, 2020. DOI:10.1016/j.scs.2020.102602
- [75] Blachnik, M., Walkowiak, S., Kula, A. Large scale, mid term wind farms power generation prediction. *Energies*, 16, 5. 2023. DOI:10.3390/en16052359
- [76] Mahjoub, S., Alaoui, L.C., Marhic B., Delahoche, L. Predicting energy consumption using LSTM, multi-layer GRU and drop-GRU neural networks. *Sensors* 22, 11: 2022. <https://doi.org/10.3390/s22114062>
- [77] Clements-Croome A. *Intelligent Buildings: An Introduction*. Routledge, 2013. <https://www.routledge.com/Intelligent-Buildings-An-Introduction/Clements-Croome/p/book/9780415685330>
- [78] Vercellotti T. The Potential of Building Automation Systems in Energy Management. *Energy Policy*, vol. 67, 2014. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.014>
- [79] Ruano R., Silva S., Ferreira M., de Almeida A. Building automation: Control strategies, performance analysis and theoretical limits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, 2013. 999-1008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.016>
- [80] Pérez-Lombard P.A., Ortiz J., Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, 2008. 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- [81] Akilli H., Pipattanasomporn A. M., Rahman S. Analysis of the Virtual Energy Storage Allocation in Smart Buildings. *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 9, 2011. 2268-2277 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.021>
- [82] Global Market Insights - Building Automation Systems Market, Building Automation System Market Size, Analysis & Forecast 2032, MRFR ([marketresearchfuture.com](http://marketresearchfuture.com)) [dostęp 12.08.2024 r.]



- [83] Fortune Business Insights - Building Automation System Market Size, Share & Industry Analysis.  
[<https://www.fortunebusinessinsights.com/building-automation-systems-market-107861>  
dostęp 12.08.2024 r.]
- [84] <https://www.knx.org/knx-en/for-professionals/What-is-KNX/A-brief-introduction/index.php>  
[dostęp 10.09.2024 r.]
- [85] <https://buildings.honeywell.com/us/en> [dostęp 10.09.2024 r.]
- [86] [https://automatyka-siemens.pl/synco-living/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw3bm3BhDJARIsAKnHoVX2cmQLXvqJSUAUSIQy1L7qj8aWJc wYNx2yl26zW4fypmYKZru5WYwaAjAJEALw\\_wcB](https://automatyka-siemens.pl/synco-living/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw3bm3BhDJARIsAKnHoVX2cmQLXvqJSUAUSIQy1L7qj8aWJc wYNx2yl26zW4fypmYKZru5WYwaAjAJEALw_wcB) [dostęp 10.09.2024 r.]
- [87] <https://www.se.com/pl/pl/product-range/62143-wiser-for-knx/#overview> [dostęp 10.09.2024 r.]
- [88] <https://www.fibaro.com/pl/> [dostęp 10.09.2024 r.]
- [89] <https://www.crestron.com/> [dostęp 10.09.2024 r.]
- [90] <https://www.loxone.com/plpl/> [dostęp 10.09.2024 r.]
- [91] <https://trane.eu/pl/hvac-solutions/3-system-optimization.html> [dostęp 10.09.2024 r.]
- [92] <https://www.lutron.com/en-US/pages/default.aspx#> [dostęp 10.09.2024 r.]
- [93] <https://new.abb.com/low-voltage/pl/produkty/automatyka-domowa-i-budynkowa> [dostęp 10.09.2024 r.]
- [94] Pelco <https://www.pelco.com/blog/smart-building-technology> [dostęp 10.08.2024 r.]
- [95] Zenatix - Intelligent Buildings: A Comprehensive Guide [dostęp 10.08.2024 r.]
- [96] BuilderSpace - 11 Different Types of Smart Buildings Compared [dostęp 10.08.2024 r.]
- [97] <https://www.knx.org/knx-en/for-professionals/community/> [dostęp 20.09.2024 r.]
- [98] <https://my.knx.org> [dostęp 1.04.2024 r.]
- [99] Dechnik M., Moskwa S. Smart House - inteligentny budynek - idea przyszłości, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9, 2017. 1-10,.
- [100] Manic M., Amarasinghe K., Rodriguez-Andina J. J. i Rieger C. Intelligent Buildings of the Future: Cyberaware, Deep Learning Powered, and Human Interacting, IEEE Industrial Electronics Magazine, tom 10, nr 4, 2016. 32-49.
- [101] PN-EN 12464-1 "Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy" Praca przy komputerze 500 lx na stanowisku pracy.
- [102] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. Nr 75, poz. 690).
- [103] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz. U. z 2018r. poz. 1202 z późn. zm.) i §209 określającym klasyfikację pożarową i zagrożenia ludzi.
- [104] PN-82/B- 02402 „Ogrzewnictwo. Temperatury ogrzewanych pomieszczeń w budynkach”.

- [105] Darakdjian Q., Billé S., Inard C. Data mining of building performance simulations comprising occupant behaviour modelling. *Adv. Build. Energy Res.* 2017. 1–17. doi: 10.1080/17512549.2017.1421099.
- [106] Januszewicz P. Architectonic aspects of building effective security systems applied for the protection of people and property, 3rd International Congress on Intelligent Buildings Systems, Cracow, 2004.
- [107] Giraldo-Soto C., Erkoreka A., Mora L., Uriarte I., del Portillo L.A. Monitoring System Analysis for Evaluating a Building's Envelope Energy Performance through Estimation of Its Heat Loss Coefficient. *Sensors.* 18 (7). 2018.
- [108] Briones A.G., Chamoso P., De La Prieta F., Demazeau Y., Corchado J.M. Agreement Technologies for Energy Optimization at Home., *Sensors.* 18 (5). 2018.
- [109] Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków (Dz.U.2024.101).
- [110] Programy Audytor OZC do obliczania projektowego obciążenia cieplnego pomieszczeń oraz określania sezonowego zapotrzebowania na energię cieplną i chłodniczą budynków.
- [111] Program ETS <https://www.knx.org/knx-en/for-professionals/software/ets6/> [dostęp 09.09.2024].
- [112] Ustawa z dnia 24 sierpnia 1991 r. o ochronie przeciwpożarowej (Dz.U.2024.275).
- [113] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów.
- [114] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 2 grudnia 2015 r. w sprawie uzgadniania projektu budowlanego pod względem ochrony przeciwpożarowej
- [115] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie wykazu wyrobów służących zapewnieniu bezpieczeństwa publicznego lub ochronie zdrowia i życia oraz mienia, a także zasad wydawania dopuszczenia tych wyrobów do użytkowania.
- [116] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 11 września 2020 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego (Dz. U. z 2022 r. poz. 1679, z późn. zm.).
- [117] PN-EN 54-16:2011 - Systemy sygnalizacji pożarowej -- Część 16: Centrale dźwiękowych systemów ostrzegawczych.
- [118] PN-EN 54-4:2001 - Systemy sygnalizacji pożarowej -- Część 4: Zasilacze.
- [119] PN-EN 54-24:2008 - Systemy sygnalizacji pożarowej -- Część 24: Dźwiękowe systemu ostrzegawcze – Głośniki.
- [120] CEN/TS 54-32:2015 - Systemy wykrywania i alarmowania przeciwpożarowego – Planowanie, projektowanie, instalacja, uruchomienie i konserwacja dźwiękowych (głosowych) systemów ostrzegawczych.

- [121] Rozporządzenie Ministra infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych.
- [122] PN-92/E 012000 Symbole graficzne stosowane w schematach.
- [123] BN-65/8984 – 11 Telekomunikacyjne sieci kablowe miejscowe. Instalacje wewnętrzne.
- [124] PN-EN 50133-2-1:2000 Systemy alarmowe. Systemy kontroli dostępu. Wymagania systemowe.
- [125] PN-EN 50133-7:2002 (U) Systemy alarmowe. Systemy kontroli dostępu stosowane w zabezpieczeniach, Część 2-1: Wymagania dla podzespołów PN-EN 50133-7:2002(U) Systemy alarmowe. Systemy kontroli dostępu stosowane w Zabezpieczeniach i Część 7:Zasady stosowania.
- [126] PN-EN 61008-1:2002(U) Sprzęt elektroinstalacyjny. Wyłączniki różnicowoprądowe bez Wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB). Część 1: Postanowienia ogólne.
- [127] PN-EN 61008-1:2002(U) Sprzęt elektroinstalacyjny. Wyłączniki różnicowoprądowe bez Wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB). Część 2-1: Stosowanie postanowień ogólnych do wyłączników RCCB o działaniu niezależnym od napięcia sieci.
- [128] PN-IEC 60364-4-442:1999 instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed przepięciami. Ochrona instalacji niskiego napięcia przed przejściowymi przepięciami uszkodzeniami przy doziemieniach w sieciach wysokiego napięcia.
- [129] PN-IEC/TS 61312-2:2003 Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym (LEMP). Część2: Ekranowanie obiektów, połączenia wewnątrz obiektów i uziemienia.
- [130] Rutkowski, L. Metody i techniki sztucznej inteligencji. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. 2019.
- [131] Breiman, L. Classification and Regression Trees. Routledge 2017.
- [132] Indyk P., Motwani, R. Approximate nearest neighbors: towards removing the curse of dimensionality. Proceedings of the thirtieth annual ACM symposium on Theory of computing. 1998.
- [133] Kuncheva L.I. Fuzzy classifier design. Vol. 49. Physica, 2012.
- [134] Kumar P., Kumar D. Decision tree classifier: a detailed survey. International Journal of Information and Decision Sciences 12.3. 2020. 246-269.
- [135] Bishop, C.M., Hugh B.. Deep learning: Foundations and concepts. Springer Nature, 2023.
- [136] Candice B., Csörgő A., alo Martínez-Muñoz G. A comparative analysis of gradient boosting algorithms. Artificial Intelligence Review 54. 2021. 1937-1967.
- [137] Biswas, S.K. "Hybrid expert system using case based reasoning and neural network for classification." Biologically Inspired Cognitive Architectures 9. 2014. 57-70.

- [138] Chatchai K., Sukkerd N, Hathorn C. Large-Scale Instance Selection Using a Heterogeneous Value Difference Matrix. *Sensor Networks and Signal Processing: Proceedings of the 2nd Sensor Networks and Signal Processing (SNSP 2019)*, 19-22 November 2019, Hualien, Taiwan. Springer Singapore, 2021.
- [139] Sutura A., Louppe G., Huynh-Thu V.A., Wehenkel L., Geurts P. From global to local MDI variable importances for random forests and when they are Shapley values. *35th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021)*.
- [140] Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.; *Wymiana Ciepła*, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2009.
- [141] Wiśniewski S.; *Termodynamika Techniczna*, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2005.
- [142] Salamon P., Nulton J.D., Siragusa G., Andersen T.R., Limon A.; Principles of control thermodynamics, *Energy* 26, 2001, 307–319.
- [143] Wilmański K.; *Continuum Thermodynamics*, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra, 2006
- [144] Gessing R.; *Podstawy automatyki*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- [145] Gruber M., Trüschel A., Dalenbäck J.-O.; Alternative strategies for supply air temperature control in office buildings, *Energy and Buildings*, Volume 82. 2014.406-415.
- [146] Perera D.W.U., Pfeiffer C. F., Skeie N.O.; Control of temperature and energy consumption in buildings - A review, *International Journal Of Energy And Environment*, Volume 5, Issue 4, 2014. 471-484.
- [147] Instrukcja serwisowa Mitsubishi 14-PAC-SM-215 service manual\_FDC-FDU200\_250VG.pdf.
- [148] Blevins T.L.; PID Advances in Industrial Control, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 45, Issue 3, 2012. 23-28.
- [149] Purwanto F.H., Utami E., Pramono E.; Implementation and Optimization of Server Room Temperature and Humidity Control System using Fuzzy Logic Based on Microcontroller, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1140, 2018.
- [150] Mantovani G., Ferrarini L.; Temperature Control of a Commercial Building With Model Predictive Control Techniques, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 4, 2015.
- [151] Ngarambe J., Young Yun G., Santamouris M.; The use of artificial intelligence (AI) methods in the prediction of thermal comfort in buildings: energy implications of AI-based thermal comfort controls, *Energy & Buildings*, No. 211, 2020.
- [152] Onibonoje M.O., Bokoro P.N., Nwulu N.I., Gbadamosi S.L.; An IoT-Based Approach to Real-Time Conditioning and Control in a Server Room, *IEEE 15th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, 2023.
- [153] Shtembari M.; Heat Pump system control strategies: comparison of two system layouts and evaluation of the energy saving potential from human behaviour and weather information, *Polytechnic University of Turin*, 2018.

- [154] Fahlén, P.; Capacity control of heat pumps, REHVA Journal, Issue 05, 2012.
- [155] <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/> [dostęp 10.04.2024].
- [156] PN-HD 60364-7-712:2016 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania.
- [157] <https://www.mtec-systems.com/en/products/energy-block/> [dostęp 08.05.2024].
- [158] <https://neoom.com/en/products/blokk> [dostęp 08.05.2024].
- [159] <https://www.elsta.pl/oferta/produkcja/bess-elsta/> [dostęp 08.05.2024].
- [160] [https://www.elsta.pl/wp-content/uploads/2023/09/BESS\\_Elsta\\_PL-katalog-min.pdf](https://www.elsta.pl/wp-content/uploads/2023/09/BESS_Elsta_PL-katalog-min.pdf) [dostęp 16.09.2024].

## 9 Spis rysunków

Rysunek 1. Emisje energii z budynków w 2021 roku [58] .....	21
Rysunek 2. Inwestycje w rozwiązania czystej energii dla start-upów budynków, lata 2015-2021 [58]	22
Rysunek 3. Trend prezentujący liczbę inteligentnych budynków (w milionach) na świecie w latach od 2022 do 2026 roku [95] .....	27
Rysunek 4. Wykres popularność systemów inteligentnych budynków [96] .....	27
Rysunek 5. Logotypy centrów normalizacyjnych .....	29
Rysunek 6. Możliwości połączeń urządzeń w systemie KNX .....	29
Rysunek 7. Schemat połączeń urządzeń KNX w liniach i obszarach .....	30
Rysunek 8. Zrzut z ekranu prezentującego działanie programu ETS .....	31
Rysunek 9. Przykładowe pomieszczenie biurowe [opracowanie własne] .....	37
Rysunek 10. Widok budynku GLON .....	39
Rysunek 11. Rozmieszczenie analizowanych pomieszczeń w budynku, a) parter, b) 1 piętro .....	41
Rysunek 12. Usytuowanie stacji pogody .....	42
Rysunek 13. Procedura zbierania danych pomiarowych z budynku biurowego [opracowanie własne]	43
Rysunek 14. Widok ekranu do zarządzania danymi (Data logger) dla bramki ISE .....	44
Rysunek 15. Zrzut ekranu prezentujący proces importu, dekodowania i zapisu danych w stworzonym programie Knx Data Extractor .....	45
Rysunek 16. Schemat blokowy przedstawiający sposób działania stworzonego programu Knx Data Extractor [opracowanie własne] .....	48
Rysunek 17. Kod programu realizujący funkcję dekodowania danych [opracowanie własne] .....	52
Rysunek 18. Wykres wybranych parametrów dla pomieszczenia 140 .....	52
Rysunek 19. Średnie dzienne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 220 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej .....	53
Rysunek 20. Średnie dzienne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 124 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej .....	54
Rysunek 21. Średnie dzienne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 140 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej .....	54
Rysunek 22. Średnie dzienne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 104 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej .....	55
Rysunek 23. Dwudziestoczworogodzinne średnie godzinne średnie temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 220 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej .....	56

Rysunek 24. Dwudziestoczegodzinne średnie godzinne średnie temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 124 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej .....	57
<i>Rysunek 25. Dwudziestoczegodzinne średnie godzinne średnie temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 140 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej .....</i>	<i>57</i>
Rysunek 26. Dwudziestoczegodzinne średnie godzinne temperatury wewnętrznej dla pomieszczenia 104 odnoszące się do położenia zaworu grzewczego, nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej ...	58
Rysunek 27. Zależność temperatury wewnętrznej dla pomieszczeń 104, 124, 140 i 220 od nasłonecznienia .....	59
Rysunek 28. Dokumentacja projektowa Budynku CRON Centrum Rozwoju Nauki .....	63
Rysunek 29. Wizualizacje otoczenia i Budynku CRON Centrum Rozwoju Nauki .....	64
Rysunek 30. Wizualizacje pomieszczeń Budynku CRON Centrum Rozwoju Nauki .....	64
Rysunek 31. Schemat ideowy Dźwiękowego Systemu Ostrzegawczego DSO Ambient System .....	70
Rysunek 32. Instalacja KNX dla przykładowego 6 piętra Budynku CRON a) pomieszczenia 6P09-6P13, b) pomieszczenia 6P07-6P18, c) pomieszczenia 6P00-6P06, d) pomieszczenia 6P02-6P05 .....	72
Rysunek 33. Aktuator RM16T produkcji Theben .....	73
Rysunek 34. Sensor MTN 6212-0325 produkcji Schneider Electric .....	74
Rysunek 35. Aktuator ogrzewania HM 6T produkcji Theben .....	75
Rysunek 36. Aktuator klimakonwektora FCA 2 produkcji Theben .....	75
Rysunek 37. Czujnik CO2 AMUN 716 S produkcji Theben .....	76
Rysunek 38. Zewnętrzna Stacja pogodowa Meteodata 140 S GPS produkcji Theben .....	76
Rysunek 39. Serwer SLEDGEHAMMER CC-SH-1 produkcji ComfortClick .....	77
Rysunek 40. Przykładowy schemat ideowy instalacji elektrycznej i automatyki pomieszczenia biurowego 5L08 a) oświetlenie, b) gniazda zasilające Data, klimakonwektor i kontrola dostępu .....	78
Rysunek 41. Przykładowy rysunek montażowy rozdzielnic w przykładowym pomieszczeniu biurowym 5L08 .....	78
Rysunek 42. Przykładowe rozmieszczenie gniazd i oświetlenia standardowego piętra biurowego .....	79
Rysunek 43. Program ETS Struktura adresacji grupowej i numery urządzeń .....	79
Rysunek 44. Schemat połączeń kontrola wejścia i wyjścia z ewakuacją realizowaną przez urządzenie EKS-4001 .....	82
Rysunek 45. Rozwiązania OZE Fotowoltaiki Budynku CRON Centrum Rozwoju Nauki .....	83
Rysunek 46. Budynek CRON Układ Paneli 2x(4x4x4+9x4x5) Moc 161,04 kWp .....	83
Rysunek 47. Budynek CRON Układ Paneli 2x(13x2x7) Moc 120,12 kWp .....	84
Rysunek 48. Budynek CRON Układ Paneli 2x(7x26) Moc 120,12 kWp .....	84

Rysunek 49. Projekt wykonawczy wybranego układu paneli fotowoltaicznych .....	84
Rysunek 50. Widok przyziemia – rozkład pomieszczeń serwerowni .....	86
Rysunek 51. Instalacja Chłodu-Klimatyzacji .....	87
Rysunek 52. Schemat węzła chłodniczego i ciepłego całego budynku CRON .....	88
Rysunek 53. a) Rozmieszczenie szaf serwerowych S1 do S10 w DataBox, b) zimny korytarz Databox .	89
Rysunek 54. Rozmieszczenie szaf i urządzeń klimatyzacyjnych w: a) rzut poziomy; b) rzut pionowy ...	90
Rysunek 55. Rozmieszczenie urządzeń w szafach S1 do 10 wraz z rozmieszczeniem miejsc pomiaru temperatury (kolor czerwony) .....	91
Rysunek 56. Zużycie energii elektrycznej w budynkach biurowych KAMSOFT S.A. w latach 2019 – 2024 .....	92
Rysunek 57. Zużycie mocy czynnej w kW, a) dla budynku KS-133 (z serwerownią), b) dla urządzeń IT w Data Center, c) dla klimatyzacji w Data Center .....	93
Rysunek 58. a) Procentowy udział w zużyciu energii elektrycznej przez Data Center w biurowcu; b) Procentowy udział w zużyciu energii elektrycznej przez klimatyzację Data Center w biurowcu.....	94
Rysunek 59. Zapotrzebowanie na moc układu klimatyzacji.....	98
Rysunek 60. Zapotrzebowanie na moc jednostek obliczeniowych .....	99
Rysunek 61. Wykres zmienności temperatury zewnętrznej .....	100
Rysunek 62. Wykres zmienności temperatury regulacji .....	100
Rysunek 63. Wykres zmienności temperatury pod sufitem w korytarzy zimnym .....	101
Rysunek 64. Wykres zmienności temperatury w korytarzu ciepłym .....	102
Rysunek 65. Porównanie wyników predykcji czterech modeli predykcyjnych .....	108
Rysunek 66. Wykres istotności atrybutów uzyskanych z algorytmu lasu losowego z wykorzystaniem algorytmu MDI (O2).....	109
Rysunek 67. Schemat ideowy zamkniętego układu regulacji [opracowanie własne na podstawie 144] .....	111
Rysunek 68. Charakterystyka regulatora dwupołożeniowego histereza przełączania [opracowanie własne na podstawie 144].....	114
Rysunek 69. Charakterystyka regulatora dwupołożeniowego przebieg sterowania i odpowiedzi układu [opracowanie własne], T – temperatura, S – stan, $T_{wz}$ - wartość zadana, $T_g$ - temperatura górna, $T_d$ - temperatura dolna .....	114
Rysunek 70. Sterowanie dwupołożeniowe z opóźnieniem w obiekcie [opracowanie własne] .....	115
Rysunek 71. Zasada działania dwupołożeniowego regulatora temperatury w sterowniku RC-EX1A [opracowanie własne na podstawie 147].....	117
Rysunek 72. Uproszczony schemat bilansu mocy pompy ciepła [opracowanie własne].....	120
Rysunek 73. Uproszczony schemat ideowy pompy ciepła [opracowanie własne] .....	121



Rysunek 74.Cykl Lindego, jednostopniowy obieg w układzie lg p-h [opracowanie własne na podstawie 144].....	122
Rysunek 75.Schemat ideowy budowy wewnętrznej klimatyzatora FDU250VSAVG [opracowanie własne na podstawie 147].....	123
Rysunek 76.Kod programu do wczytywania danych.....	128
Rysunek 77.Kod programu pozwalający na wyświetlanie danych obejmujący cały okres analizy .....	128
Rysunek 78. Kod programu służący do określenia korelacji między mocą klimatyzatorów a mocą serwerów.....	129
Rysunek 79.Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych obejmujące cały analizowany okres, a) $P_{Cu}$ , b) $P_{AC}$ , c) $T_{AC1}$ , $T_{Meas1}$ , d) $T_{AC2}$ , $T_{Meas2}$ , e) $T_{AC3}$ , $T_{Meas3}$ , f) $T_{AC4}$ , $T_{Meas4}$ , g) $T_{OUT}$ , h) $T_{LHC}$ , $T_{RHC}$ , $T_{celCC}$ .....	131
Rysunek 80. Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych – uśredniane w okresach 1 godzinnych - obejmujące cały analizowany okres, a) $P_{Cu}$ , b), $P_{AC}$ , c) $T_{AC1}$ , $T_{Meas1}$ , d) $T_{AC2}$ , $T_{Meas2}$ , e) $T_{AC3}$ , $T_{Meas3}$ , f) $T_{AC4}$ , $T_{Meas4}$ , g) $T_{OUT}$ , h) $T_{LHC}$ , $T_{RHC}$ , $T_{celCC}$ .....	133
Rysunek 81. Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych – uśredniane w okresach 24 godzinnych - obejmujące cały analizowany okres, a) $P_{Cu}$ b), $P_{AC}$ , c) $T_{AC1}$ , $T_{Meas1}$ , d) $T_{AC2}$ , $T_{Meas2}$ , e) $T_{AC3}$ , $T_{Meas3}$ , f) $T_{AC4}$ , $T_{Meas4}$ , g) $T_{OUT}$ , h) $T_{LHC}$ , $T_{RHC}$ , $T_{celCC}$ .....	135
Rysunek 82. Korelacja między mocą klimatyzacji, a: a) mocą serwerów (-0,189), b) temperaturą zewnętrzną (-0,166).....	137
Rysunek 83.Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych obejmujący O2, a) $P_{Cu}$ , b), $P_{AC}$ c) $T_{AC1}$ , $T_{Meas1}$ , d) $T_{AC2}$ , $T_{Meas2}$ , e) $T_{AC3}$ , $T_{Meas3}$ , f) $T_{AC4}$ , $T_{Meas4}$ , g) $T_{LHC}$ , $T_{RHC}$ , $T_{celCC}$ .....	139
Rysunek 84.Korelacja między mocą klimatyzacji (dla O2) a: a) mocą serwerów (0,108), b) temperaturą zewnętrzną (-0,257) .....	140
Rysunek 85.Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych obejmujący O4, a) $P_{Cu}$ , b), $P_{AC}$ , c) $T_{AC1}$ , $T_{Meas1}$ , d) $T_{AC2}$ , $T_{Meas2}$ , e) $T_{AC3}$ , $T_{Meas3}$ , f) $T_{AC4}$ , $T_{Meas4}$ , g) $T_{OUT}$ , h) $T_{LHC}$ , $T_{RHC}$ , $T_{celCC}$ .....	143
Rysunek 86.Korelacja między mocą klimatyzacji (dla O4 a: a) mocą serwerów (0,430), b) temperaturą zewnętrzną (0,436).....	144
Rysunek 87. Przebiegi rejestrowane odstępach 15 minutowych obejmujący jeden dzień, $T_{LHC}$ , $T_{RHC}$ , $T_{celCC}$ .....	145
Rysunek 88.Kod programu służący do określenia korelacji między mocą klimatyzatorów a mocą serwerów i temperaturą zewnętrzną.....	146
Rysunek 89.Korelacja między mocą klimatyzacji (dla O4) a mocą serwerów i temperaturą zewnętrzną .....	147
Rysunek 90.Wykres istotności atrybutów uzyskanych z algorytmu lasu losowego z wykorzystaniem algorytmu MDI (O4).....	148

Rysunek 91.a) Zużycie energii z sieci elektrycznej – $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii – $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii – $E_{PV-ME}$ w zależności od pojemności magazynów energii – $P_{ME}$ firmy M-TEC Energy Systems GmbH .....	152
Rysunek 92.Schemat przepływu energii dla Gewerbespeicher Energy Block 282 kWh .....	153
Rysunek 93.a) Zużycie energii z sieci elektrycznej – $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii – $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii – $E_{PV-ME}$ w zależności od pojemności magazynów energii – $P_{ME}$ firmy Neoom International GmbH .....	154
Rysunek 94.Schemat przepływu energii dla NEOOM BLOKK 160kW 299 kWh .....	156
Rysunek 95.a) Zużycie energii z sieci elektrycznej – $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii – $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii – $E_{PV-ME}$ w zależności od pojemności magazynów energii BESS-250/0,2-1,2 – $P_{ME}$ firmy ELSTA sp. z o.o. ....	157
Rysunek 96.Schemat przepływu energii dla ELSTA sp. z o.o. 150kW o pojemności 400 kWh.....	158
Rysunek 97.a) Zużycie energii z sieci elektrycznej – $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii – $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii – $E_{PV-ME}$ w zależności od pojemności magazynów energii – $P_{ME}$ firmy M-TEC Energy Systems GmbH .....	159
Rysunek 98. Schemat przepływu energii dla Gewerbespeicher Energy Block 676 kWh.....	160
Rysunek 99. a) Zużycie energii z sieci elektrycznej – $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii – $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii – $E_{PV-ME}$ w zależności od pojemności magazynów energii – $P_{ME}$ firmy Neoom International GmbH .....	161
Rysunek 100.Schemat przepływu energii dla NEOOM BLOKK 160 kW 697 kWh.....	162
Rysunek 101.a) Zużycie energii z sieci elektrycznej – $E_s$ , b) przepływ energii z magazynu energii – $E_{ME}$ , c) przepływ energii uzyskanej z paneli PV do magazynu energii – $E_{PV-ME}$ w zależności od pojemności magazynów energii – $P_{ME}$ firmy ELSTA sp. z o.o. ....	163
Rysunek 102.Schemat przepływu energii dla ELSTA sp. z o.o. o pojemności 1000 kWh .....	164
Rysunek 103.Schemat przepływu energii dla instalacji fotowoltaicznej 150 kWp .....	165
Rysunek 104.Modułowy magazyn energii BESS-500/1,2 [160].....	166

## 10 Spis tabel

Tabela 1.Zestawienie wybranych producentów BAS .....	26
Tabela 2.Bilans cieplny budynku .....	40
Tabela 3.Oznaczenie i charakterystyka wybranych pomieszczeń .....	41
Tabela 4.Zestawienie strat ciepła dla pomieszczeń badanych .....	42
Tabela 5.Przykładowa struktura danych .....	46
Tabela 6.Parametry statystyki grzewczej w pomieszczeniach .....	55
Tabela 7.Współczynniki korelacji między ogrzewaniem, a aktualną wartością temperatury w pomieszczeniach.....	59
Tabela 8.Przykładowy wykaz urządzeń KNX dla wybranego pomieszczenia znajdującego się na 6 piętrze zaprojektowanego budynku biurowego.....	80
Tabela 9.Strefy bezpieczeństwa .....	81
Tabela 10.Zmienne zarejestrowane do analizy .....	96
Tabela11 .Wykaz zmiennych wykorzystanych w modelowaniu temperatury .....	98
Tabela 12.Zestaw parametrów wykorzystany w procedurze optymalizacji modelu .....	107
Tabela 13.Wyniki uzyskane przez poszczególne modele predykcyjne wykorzystane w badaniu.....	108
Tabela 14. Zależność wydajności chłodzenia $Q_1$ od temperatury otoczenia na zewnątrz budynku oraz temperatury powietrza w chłodzonym pomieszczeniu .....	124
Tabela 15.Wyniki NRMSE uzyskane w poszczególnych okresach .....	148
Tabela 16. Zestawienie oszczędności energii wynikających z zastosowania magazynów o różnych pojemnościach dla firmy Neoom International GmbH .....	155
Tabela 17.Zestawienie kosztów dla wybranych instalacji PV i magazynu energii firmy ELSTA.....	165