Politechnika Krakowska

im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Katedra Energetyki

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Agata Kania

Budowa komunikacji cyfrowej w trybie ON-Line pomiędzy układami zasilania OFF-Grid obiektów sieciowych MPEC z systemem SCADA dla potrzeb monitoringu, diagnostyki i sterowania

Promotor:

prof. dr hab. inż. Jan Taler

Drugi promotor:

dr hab. inż. Dariusz Borkowski, prof. PK

Opiekun pomocniczy:

mgr inż. Marek Mazurek

Praca zrealizowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy,
umowa DWD/4/25/2020

Kraków, 2025

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE 7

2. CELE, TEZA, ZAKRES PRACY 9

2.1 CELE 9

2.2 TEZA 9

2.3 ZAKRES PRACY 10

3. PRZEGLĄD LITERATURY I PODSTAWY TEORETYCZNE 11

3.1. INTELIGENTNE SIECI CIEPŁOWNICZE (ISC) 12

3.2. SYSTEMY ZASILANIA OFF-GRID 17

3.3. SYSTEM SCADA 20

3.3.1. Rola systemów SCADA w systemach ciepłowniczych 23

3.3.2. Literatura - SCADA 23

3.4. STEROWNIKI PLC 24

3.4.1. Zastosowanie PLC w systemach ciepłowniczych 25

3.4.2. Literatura - PLC 27

3.5. PROTOKOŁY I TECHNOLOGIE KOMUNIKACYJNE 28

3.5.1. Literatura - technologie komunikacyjne 31

3.6. WIZUALIZACJA DANYCH W SYSTEMACH SCADA 32

3.7. PORÓWNANIE PROTOKOŁÓW KOMUNIKACYJNYCH MODBUS I LONWORKS POD KĄTEM OPÓŹNIEŃ TRANSMISJI DANYCH 34

3.8. PODSUMOWANIE 35

4. MIEJSKIE PRZEDSIĘBIORSTWO ENERGETYKI CIEPLNEJ W KRAKOWIE 37

4.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA SIECI CIEPŁOWNICZYCH 38

4.2. SIECI CIEPŁOWNICZE – PRZEBIEG PROCESU DYSTRYBUCJI CIEPŁA 39

4.3. RODZAJE SIECI CIEPŁOWNICZYCH 40

4.4. SPOSOBY WYKRYWANIA I NAPRAWY AWARII 42

5. TECHNOLOGIE I SYSTEMY AUTOMATYKI W CIEPŁOWNICTWIE 43

5.1. STOSOWANE DO TEJ PORY METODY TRANSMISJI DANYCH 43

5.2. OBECNIE STOSOWANY SYSTEM SCADA ORAZ STEROWNIKI PLC 52

5.3. WYKORZYSTYWANE PROTOKOŁY KOMUNIKACYJNE 55

5.3.1. Protokół M-Bus 55

5.3.2. Standard ModBus 56

5.3.3. System LonWorks 56

5.4. PODSUMOWANIE 57

6. ANALIZA PORÓWNAWCZA PROTOKOŁÓW LONWORKS I MODBUS 58

6.2. TECHNOLOGIA LONWORKS 58
6.2.1. Architektura sieci LonWorks i środowisko programistyczne 59
6.2.2. Media transmisyjne w systemie LonWorks 61
6.2.3. Protokół komunikacyjny LonTalk – mechanizmy transmisji danych i schemat adresowania 63
6.2.4. Struktura, konfiguracja i zarządzanie siecią LonWorks – narzędzia inżynierskie 64
6.2.5. Wykorzystanie sieci teleinformatycznych w integracji technologii LonWorks 65
6.3. TECHNOLOGIA MODBUS 67
6.3.1. Architektura sieci ModBus i środowisko programistyczne 68
6.3.2. Media transmisyjne w systemie ModBus 69
6.3.3. Protokół komunikacyjny ModBus – mechanizmy transmisji danych i schemat adresowania 70
6.3.4. Struktura, konfiguracja i zarządzanie siecią ModBus – narzędzia inżynierskie 72
6.3.5. Wykorzystanie sieci teleinformatycznych w integracji technologii ModBus 73
6.4. MODEL ISO/OSI – OGÓLNE INFORMACJE 74
6.4.1. Porównanie warstw modelu ISO/OSI w LonWorks i ModBus 76
6.5. PORÓWNANIE SYSTEMÓW LONWORKS I MODBUS 78

7. SYSTEMY PRACY W CZASIE RZECZYWISTYM I KOMUNIKACJA W INSTALACJACH OFF-GRID 80

7.1. SYNCHRONIZACJA CZASU W SYSTEMACH AUTOMATYKI 80
7.2. URZĄDZENIA Z PROTOKOŁAMI KOMUNIKACYJNYMI 84
7.3. ANALIZA POTRZEB OBIEKTÓW ZASILANYCH WYSPOWO (OFF-GRID) 85
7.3. ARCHITEKTURA SYSTEMU ROZPROSZONEGO 87
7.4. ANALIZA MODELU KOMUNIKACYJNEGO OBIEKTÓW ZASILANYCH SYSTEMEM OFF-GRID 88

8. STANOWISKA BADAWCZE I INSTALACJE OFF-GRID 90

8.1. STANOWISKO BADANIA GENERATORÓW 90
8.1.1. Integracja stanowiska badania generatorów z systemem SCADA 95
8.1.2. MPPT 97
8.1.3. Etapy ładowania akumulatorów przez regulator MPPT 98
8.1.4. Battery Protect 100
8.2. STANOWISKO BADANIA TURBIN 101
8.2.1. Integracja stanowiska badania turbin z systemem SCADA 109
8.3. INSTALACJA KOMORY CIEPŁOWNICZEJ ZASILANEJ W SPOSÓB OFF-GRID 111
8.3.1. Integracja komory o zasilaniu OFF-Grid z systemem SCADA 119

9. STANOWISKA BADANIA TRANSMISJI DANYCH 122

9.1. KONFIGURACJA STANOWISKA BADAWCZEGO 130
9.2. INTEGRACJA STANOWISKA BADANIA TRANSMISJI DANYCH Z SYSTEMEM SCADA 131

10. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO DO ANALIZY TRANSMISJI DANYCH 137

10.1. TOPOLOGIE SIECI 140

10.2. METODYKA BADAŃ I PARAMETRY SYGNAŁU STERUJĄCEGO 147

10.2.1. Wyniki badań i analiza przebiegów transmisji sygnałów sterujących 147

10.2.2 Podsumowanie i wnioski 171

10.3. METODYKA BADAŃ REAKCJA SIŁOWNIKA NA ZADANY SKOK JEDNOSTKOWY 174

10.3.1. Wyniki badań i analiza odpowiedzi siłowników 174

10.3.2 Podsumowanie i wnioski 182

10.4. METODYKA BADAŃ DYNAMIKI ODPOWIEDZI SIŁOWNIKA NA SYGNAŁ STERUJĄCY 182

10.4.1. Wyniki badań i analiza reakcji siłowników na wartość zadaną 183

10.4.2 Podsumowanie i wnioski 189

PODSUMOWANIE PRACY 191

SPIS LITERATURY 194

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój technologii w sektorze ciepłownictwa oraz rosnące wymagania w zakresie efektywności energetycznej i zrównoważonego rozwoju wymagają implementacji nowoczesnych rozwiązań technologicznych w sieciach ciepłowniczych. Budowa inteligentnych sieci ciepłowniczych (ISC, Intelligent Heating Networks lub Smart District Heating) wiąże się z koniecznością zbierania, przetwarzania i analizy ogromnej ilości danych pochodzących z różnych punktów rozproszonych w ramach sieci ciepłowniczej. Dane te stanowią podstawę do podejmowania decyzji dotyczących diagnostyki oraz sterowania systemem ciepłowniczym.

W celu realizacji koncepcji ISC, sieci ciepłownicze muszą być wyposażone w zaawansowane technologie umożliwiające monitoring parametrów pracy oraz lokalne i zdalne sterowanie ich elementami. W sieciach ciepłowniczych kluczowe znaczenie mają obiekty, takie jak komory ciepłownicze i przepompownie, które umożliwiają instalację aparatury niezbędnej do wdrożenia funkcji ISC.

Przepompownie, zaprojektowane z uwzględnieniem dostępu do sieci elektroenergetycznej, już od wielu lat są integrowane z systemami nadzorującymi, takimi jak SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Dzięki temu możliwe jest skuteczne monitorowanie ich pracy oraz zdalne zarządzanie procesami. Niemniej jednak, w kontekście sieci ciepłowniczej przepompownie stanowią jedynie małą część wszystkich obiektów – znacznie większą liczbę stanowią komory ciepłownicze, które zazwyczaj nie mają dostępu do zasilania z sieci elektroenergetycznej.

Brak dostępu do energii elektrycznej w systemie ON-Grid w wielu punktach sieci ciepłowniczej wymusza stosowanie alternatywnych źródeł energii, które zapewniają lokalne wytwarzanie energii elektrycznej w trybie wyspowym (OFF-Grid). Takie rozwiązania bazują m.in. na turbinach współpracujących z generatorami elektrycznymi oraz na instalacjach fotowoltaicznych. Wdrożenie takich systemów zasilania, zwłaszcza w kontekście obiektów należących do Miejskiego Przedsiębiorstwa Energetyki Cieplnej S.A. w Krakowie (MPEC), wymaga jednoczesnej implementacji niezawodnych rozwiązań cyfrowej komunikacji z systemem SCADA, w tym odpowiednich sterowników oraz urządzeń wykonawczych, takich jak np. siłowniki wyposażone w protokoły komunikacyjne umożliwiające pozyskiwanie większej ilości danych o ich stanie i pracy. Komunikacja

ta jest kluczowa dla monitorowania, diagnostyki oraz sterowania zarówno poszczególnymi obiektami, jak i całym systemem ISC, umożliwiając jednocześnie integrację sterowników oraz urządzeń wykonawczych.

W ramach doktoratów wdrożeniowych realizowanych w Krakowskim Miejskim Przedsiębiorstwie Energetyki Cieplnej przeprowadzono kompleksową analizę rozwiązań technologicznych związanych z budową inteligentnych sieci ciepłowniczych. Zakres tych prac obejmuje m.in.:

- wdrożenie turbin współpracujących z generatorami elektrycznymi w obiektach sieciowych,
- wykonanie obliczeń hydraulicznych sieci ciepłowniczej dla turbin w układzie zasilania wyspowego,
- wdrożenie układu zasilania wyspowego OFF-Grid zasilanego przez generator elektryczny napędzany turbiną bądź przez instalację fotowoltaiczną dla obiektów sieciowych,
- analiza komunikacji cyfrowej pomiędzy obiektami sieciowymi zasilanymi w systemie OFF-Grid z systemem SCADA dla potrzeb monitoringu, diagnostyki i sterowania

Celem niniejszej pracy jest analiza standardów komunikacyjnych wykorzystywanych do tej pory w przedsiębiorstwie, ze szczególnym uwzględnieniem stosowanych protokołów ModBus i LonWorks. Analiza i opracowanie rozwiązań umożliwiających komunikację cyfrową pomiędzy układami zasilania OFF-Grid w obiektach ciepłowniczych a systemem SCADA. Praca obejmie również stworzenie koncepcji stanowisk laboratoryjnych do badania turbin i generatorów elektrycznych, jak i integrację stanowisk badawczych i instalacji zasilania OFF_Grid z systemem SCADA. Efektem realizacji będzie model komunikacji cyfrowej, który umożliwi monitorowanie, sterowanie i diagnostykę pracy inteligentnych sieci ciepłowniczych.

2. CELE, TEZA, ZAKRES PRACY

2.1 CELE

Celem doktoratu jest:

A. Cele badawcze:
   - Analiza i ocena różnych rozwiązań komunikacji cyfrowej stosowanych w MPEC w kontekście ich integracji z systemem SCADA.

B. Cele wdrożeniowe:
   - Opracowanie i implementacja stanowisk laboratoryjnych turbin TRC (turbinowy regulator ciśnienia, w pracy stosowany zamiennie ze skrótem PaT – ang. Pump as Turbine) i generatorów w celu prowadzenia badań i analiz.
   - Zaprojektowanie stanowiska laboratoryjnego do badania generatorów elektrycznych napędzanych turbinami umożliwiających analizę działania generatorów i systemów MPPT w zasilaniu OFF-Grid.
   - Integracja stanowisk laboratoryjnych badających turbiny i generatory elektryczne oraz testowanych obiektów ciepłowniczych z systemem SCADA MPEC.
   - Opracowanie schematów synoptycznych oraz wdrożenie systemu archiwizacji danych w SCADA, umożliwiającego monitorowanie i analizę pracy obiektów ciepłowniczych.

2.2 TEZA

Teza 1: Analiza komunikacji cyfrowej w różnych konfiguracjach (topologiach) pozwala na efektywne wyznaczenie czasów transmisji informacji i diagnostykę procesu sterowania instalacji automatyki infrastruktury ciepłowniczej.

Teza 2: Zastosowanie komunikacji cyfrowej w trybie on-line pomiędzy układami zasilania OFF-Grid obiektów sieciowych komór ciepłowniczych a systemem SCADA umożliwia skuteczny monitoring, diagnostykę i sterowanie sieci ciepłowniczej, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej niezawodności i dynamiki odpowiedzi

systemów wykonawczych na sygnały sterujące, co jest kluczowe dla bezpiecznej i efektywnej pracy infrastruktury ciepłowniczej zasilanej w sposób wyspowy.

2.3 ZAKRES PRACY

A. Analiza standardów komunikacyjnych

   W ramach tego etapu przeprowadzona zostanie szczegółowa analiza standardów komunikacyjnych ModBus i LonWorks. Skoncentrowano się na zastosowaniu tych rozwiązań w ciepłownictwie, identyfikując kluczowe cechy, zalety oraz ograniczenia. Analiza obejmie strukturę protokołów, sposoby wymiany danych, możliwości integracyjne oraz kompatybilność z systemami automatyki stosowanymi w sektorze energetycznym.

B. Kompleksowa analiza potrzeb obiektów zasilanych w sposób OFF-Grid

   W tej części pracy zostaną określone kluczowe wymagania funkcjonalne dla systemów pracujących niezależnie od sieci energetycznej.

C. Analiza modelu komunikacyjnego w systemach OFF-Grid

   Zostanie opracowany model komunikacji pomiędzy urządzeniami wykonawczymi, sterownikami PLC oraz systemem SCADA. Analiza obejmie również aspekty niezawodności oraz opóźnień transmisji danych w różnych konfiguracjach systemowych.

D. Projekt koncepcji stanowiska badawczego

   W ramach tego etapu zostanie opracowana koncepcja stanowiska badawczego dla generatorów stosowanych w instalacjach OFF-Grid. Projekt obejmie dobór odpowiednich komponentów systemu, sposób ich integracji oraz założenia funkcjonalne dla przeprowadzanych badań.

E. Przeprowadzenie badań komunikacji

   Kolejnym etapem pracy będzie analiza przesyłu danych w różnych konfiguracjach komunikacyjnych. Badania obejmą sprawdzenie czasu przesyłanych danych. Wyniki tych badań posłużą do oceny zastosowanych rozwiązań w ciepłownictwie

F. Integracja z systemem SCADA

   Ostatni etap pracy obejmie integrację stanowisk badawczych oraz instalacji OFF-Grid z systemem SCADA.

3. PRZEGLĄD LITERATURY I PODSTAWY TEORETYCZNE

Rozwój inteligentnych sieci ciepłowniczych (ISC) wymusza wdrażanie nowoczesnych rozwiązań w zakresie komunikacji i sterowania. Większość obiektów w sieci ciepłowniczej nie posiada zasilania, dlatego kluczowym zagadnieniem jest implementacja układów OFF-Grid, zapewniających im energię elektryczną. Istotnym elementem tego procesu jest integracja tych obiektów z systemami nadzoru i zarządzania, takimi jak SCADA.

W literaturze [28], [30], [39] podkreślono, że systemy SCADA odgrywają kluczową rolę w monitorowaniu i sterowaniu infrastrukturą techniczną, umożliwiając szybkie reagowanie na zmiany parametrów pracy. Praca [35] opisuje ich zastosowanie w zarządzaniu produkcją i dystrybucją ciepła, zwracając uwagę na cyfryzację sieci i integrację z systemami IT. W [32] przedstawiono nowoczesne protokoły komunikacyjne dla SCADA, takie jak ModBus, DNP3.

Mathias Björk i Johan Westö [5] opisują strukturę systemu SCADA do sterowania OFF-Gridowymi rozwiązaniami energetycznymi na wyspach, a artykuł "SCADA Development for an Islanded Microgrid" [14] przedstawia narzędzie do zarządzania inteligentną mikrosiecią. Komunikacja między układami OFF-Grid a SCADA może odbywać się przewodowo (Ethernet, światłowody) lub bezprzewodowo (LTE, 5G, LoRaWAN). Analiza porównawcza tych technologii znajduje się w [27], gdzie wskazano LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT) jako optymalne rozwiązanie dla rozproszonych systemów zasilania. Praca [4] opisuje potencjał 5G w sterowaniu sieciami energetycznymi.

Rozwój inteligentnych systemów zarządzania wiąże się z zagrożeniami cybernetycznymi. Praca [44] omawia ataki na SCADA i metody zabezpieczeń, takie jak MFA oraz szyfrowanie TLS/SSL. W literaturze opisano także wdrożenia integracji OFF-Grid z SCADA – w [31] przedstawiono monitoring komór ciepłowniczych zasilanych turbinami TRC, a w [6] zastosowanie sztucznej inteligencji (AI) do analizy danych SCADA w elektrowniach fotowoltaicznych, umożliwiające przewidywanie usterek i optymalizację konserwacji.

Wdrożenie układów zasilania wyspowego OFF-Grid w sieciach ciepłowniczych jest nie tylko możliwe, ale także przyniesie wymierne korzyści w zakresie stabilności pracy sieci oraz autonomii energetycznej obiektów. Integracja obiektów sieci ciepłowniczej opartych na zasilaniu typu OFF-Grid z systemami SCADA jest

kluczowa dla rozwoju inteligentnych sieci ciepłowniczych. W literaturze podkreśla się rolę cyfryzacji, wykorzystanie nowoczesnych protokołów komunikacyjnych oraz znaczenie zabezpieczeń przed cyberatakami. Badania wskazują, że LPWAN i 5G mogą być optymalnymi technologiami komunikacyjnymi, a AI może wspierać analizę danych SCADA, poprawiając efektywność zarządzania energią cieplną w sieciach ciepłowniczych.

3.1. INTELIGENTNE SIECI CIEPŁOWNICZE (ISC)

Sieć ciepłownicza to system infrastrukturalny służący do dostarczania ciepła – najczęściej w postaci gorącej wody lub pary – do budynków i obiektów na danym obszarze. Stanowi kluczowy element systemu centralnego ogrzewania w większych aglomeracjach. Sieci ciepłownicze umożliwiają efektywne i bezpieczne dostarczanie energii cieplnej do systemów grzewczych, ciepłej wody użytkowej oraz procesów technologicznych.

Kluczowe komponenty sieci ciepłowniczej to:

- Komory ciepłownicze – pełniące funkcję punktów kontrolnych i rozdzielczych.
- Przepompownie – zapewniające odpowiednie ciśnienie i umożliwiające dostarczanie ciepła na większe odległości.
- Wymiennikownie ciepła – miejsca przekazywania ciepła z sieci głównej do indywidualnych odbiorców.

System ciepłowniczy przeważnie składa się z centralnego źródła energii cieplnej, węzłów cieplnych (odbiorców ciepła) oraz rurociągów ciepłowniczych, łączących źródło ciepła z odbiorcami. Sieci te mogą mieć różne układy topologiczne, z których najczęściej spotykanym jest układ mieszany, zapewniający największe bezpieczeństwo dostaw.

Obecnie ciepłownictwo systemowe w dużej mierze opiera się na paliwach kopalnych, co prowadzi do emisji gazów cieplarnianych i negatywnego wpływu na klimat [33], [34]. Unia Europejska konsekwentnie wdraża programy wspierające bardziej efektywne i niskoemisyjne systemy ciepłownicze. Coraz bardziej rygorystyczne normy środowiskowe zmuszają przedsiębiorstwa ciepłownicze do modernizacji

infrastruktury poprzez wdrażanie innowacyjnych technologii i automatyzację procesów [43].

Inteligentne sieci ciepłownicze (ISC) to zaawansowane systemy, których koncepcja nawiązuje do inteligentnych sieci elektroenergetycznych. Główne cele ISC to:

- Zarządzanie infrastrukturą sieciową – optymalizacja pracy sieci w czasie rzeczywistym.
- Efektywne wykorzystanie energii – w tym integracja odnawialnych źródeł energii (OZE).
- Interoperacyjność systemów energetycznych – możliwość współpracy z innymi infrastrukturami.

Zgodnie z raportem Komisji Europejskiej (2011), inteligentne sieci ciepłownicze charakteryzują się [36], [51]:

- Elastycznością – dostosowaniem do zmieniających się warunków i zapotrzebowania odbiorców.
- Dostępnością – możliwością integracji lokalnych i odnawialnych źródeł energii.
- Niezawodnością – zapewnieniem stabilności dostaw i wysokiej jakości ciepła.
- Ekonomicznością – redukcją kosztów dzięki optymalizacji zarządzania i wykorzystaniu nowoczesnych technologii.

Inteligentne sieci ciepłownicze opierają się na optymalizacji w czasie rzeczywistym i wykorzystują:

- Zaawansowane systemy telemetrii i automatyzacji - umożliwiające monitoring parametrów sieci w czasie rzeczywistym.
- Analizę danych i algorytmy predykcyjne - pozwalające na prognozowanie obciążenia cieplnego i regulację dostaw.
- Integrację z odnawialnymi źródłami energii - takimi jak instalacje solarne, geotermalne i pompy ciepła.
- Magazynowanie energii cieplnej - zapewniające stabilizację systemu i efektywne wykorzystanie nadwyżek energii.
- Interakcję z odbiorcami - umożliwiającą dynamiczne dostosowanie parametrów sieci do rzeczywistych potrzeb użytkowników.

W Polsce rośnie liczba przedsiębiorstw wdrażających inteligentne rozwiązania w ciepłownictwie. Najczęściej stosowane technologie obejmują:

- Monitoring i sterowanie siecią za pomocą systemów telemetrii.

- Automatyzację pracy węzłów cieplnych.
- Prognozowanie zapotrzebowania na ciepło z wykorzystaniem danych pogodowych.
- Zastosowanie systemów SCADA i GIS do optymalizacji zarządzania siecią.

Według raportów, już 62% lokalnych przedsiębiorstw ciepłowniczych w Polsce wdrożyło systemy automatyki i telemetrii [42], [47]. Ich popularność jest największa w dużych miastach, takich jak Warszawa, Kraków i Wrocław, ale coraz częściej sięgają po nie także mniejsze ośrodki, np. Siedlce, Łomża czy Przemyśl.

Wprowadzenie inteligentnych sieci ciepłowniczych ma przynieść liczne korzyści, m.in.:

- Redukcję emisji CO_2 – dzięki integracji odnawialnych źródeł energii.
- Oszczędności ekonomiczne – poprzez efektywne zarządzanie systemem i zmniejszenie strat ciepła.
- Bezpieczeństwo energetyczne – dzięki bieżącemu monitorowaniu i szybkiemu wykrywaniu nieprawidłowości.
- Zrównoważony rozwój – wspieranie celów polityki klimatycznej UE.

Rozwój technologii prowadzi do powstawania sieci ciepłowniczych 4. i 5. generacji, które charakteryzują się [10], [38], [46]:

- Niskotemperaturowym przesyłem ciepła – co ogranicza straty energii,
- Integracją z odnawialnymi źródłami energii,
- Magazynowaniem energii cieplnej – co zwiększa stabilność dostaw.

W Polityce Energetycznej Polski do 2040 roku podkreśla się konieczność dalszego rozwoju ISC, co przyczyni się do modernizacji i unowocześnienia systemów ciepłowniczych.

Inteligentne sieci ciepłownicze (ISC) opierają swoje funkcjonowanie na trzech kluczowych filarach:

A. Automatyzacja i cyfryzacja: Integracja systemów SCADA, sterowników PLC oraz technologii IoT (Internet of Things) umożliwia zbieranie i przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym, co pozwala na efektywne zarządzanie siecią ciepłowniczą [50].
B. Integracja z odnawialnymi źródłami energii: Wykorzystanie technologii OFF-Grid, takich jak turbiny i instalacje fotowoltaiczne, pozwala na zasilanie kluczowych obiektów sieciowych, zwłaszcza w miejscach niedostępnych dla sieci elektroenergetycznej (ON-Grid) [31], [48].

C. Zrównoważone zarządzanie energią: Optymalizacja przepływów ciepła i energii w sieci opiera się na zaawansowanych algorytmach analitycznych oraz modelach predykcyjnych, co prowadzi do zwiększenia efektywności energetycznej i minimalizacji strat [41].

Te filary współpracują ze sobą, tworząc nowoczesne i efektywne systemy ciepłownicze, które odpowiadają na współczesne wyzwania związane z efektywnością energetyczną i zrównoważonym rozwojem.

Na świecie istnieje wiele przykładów wdrożenia ISC:

- Dania: Publikacja "Danish Sustainable Living 2012" przedstawia zorganizowany system ciepłowniczy w Danii, który pozwala na zmniejszenie emisji CO_2 oraz oferowanie konkurencyjnych cen [49].
- Niemcy: Raport "Dobre praktyki ciepłownicze z Danii i Niemiec. Wnioski dla Polski" opisuje doświadczenia Niemiec w modernizacji sektora ciepłownictwa, które mogą być inspiracją dla Polski [37].
- Polska: Artykuł "Elektryfikacja ciepłownictwa – wytwarzanie ciepła i integracja z systemem energetycznym" omawia perspektywy elektryfikacji ciepłownictwa w Polsce oraz integracji z systemem energetycznym [45].

ISC obejmują systemy sterowania i automatyki przemysłowej, w tym SCADA, DCS (Distributed Control Systems) i sterowniki PLC. Poniżej przedstawiono przykłady publikacji i materiałów dotyczących ISC, obejmujące standardy, technologie, bezpieczeństwo i zastosowania.

Międzynarodowe normy i standardy bezpieczeństwa ISC:

- IEC 62443 – „Security for industrial automation and control systems” [56]
  Zestaw norm dotyczących bezpieczeństwa systemów sterowania przemysłowego, opracowany przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną (IEC).
- NIST SP 800-82 – „Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security” [57]
  Przewodnik amerykańskiego instytutu NIST dotyczący bezpieczeństwa systemów sterowania przemysłowego.
- ISO/IEC 27001 – „Information Security Management” [58]
  Standard dotyczący zarządzania bezpieczeństwem informacji, mający zastosowanie także w ISC.
- ANSI/ISA-95 – „Enterprise-Control System Integration” [59]

Standard dotyczący integracji systemów sterowania z systemami zarządzania przedsiębiorstwem (ERP).

Literatura dotycząca ISC, SCADA, PLC i systemów automatyki:

- „Industrial Automation and Control System Security Principles” [19]
  Kompleksowe wprowadzenie do systemów ISC, SCADA i cyberbezpieczeństwa w automatyce przemysłowej.
- „Systemy DCS i SCADA” [26]
  Systemy DCS i SCADA należące do klasy systemów odpowiedzialnych za nadzorowanie pracy procesu technologicznego lub produkcyjnego.
- „Cybersecurity of Industrial Control Systems” [23]
  Szczegółowe omówienie zabezpieczeń systemów sterowania przemysłowego.
- „Programmable Logic Controllers” [25]
  Podręcznik wyjaśniający działanie i programowanie PLC.
- „Industrial Automation: Hands-On” [22]
  Praktyczne podejście do automatyki przemysłowej i ISC.
- „Smart Grid: Technology and Applications” [13]
  Omówienie technologii inteligentnych sieci energetycznych i ich integracji z ISC.

Systemy ISC odgrywają kluczową rolę w automatyce przemysłowej, energetyce i ciepłownictwie. Ich rozwój i bezpieczeństwo są przedmiotem licznych badań, norm i publikacji. Powyższe materiały stanowią fundament dla inżynierów, administratorów IT i specjalistów ds. bezpieczeństwa pracujących w obszarze ISC.

Tradycyjne sieci ciepłownicze, choć skuteczne, mają swoje ograniczenia, takie jak brak dynamicznego zarządzania, duże straty energii czy uzależnienie od paliw kopalnych. Inteligentne sieci ciepłownicze stanowią przyszłość branży, umożliwiając optymalizację systemu, zwiększenie efektywności energetycznej i integrację odnawialnych źródeł energii.

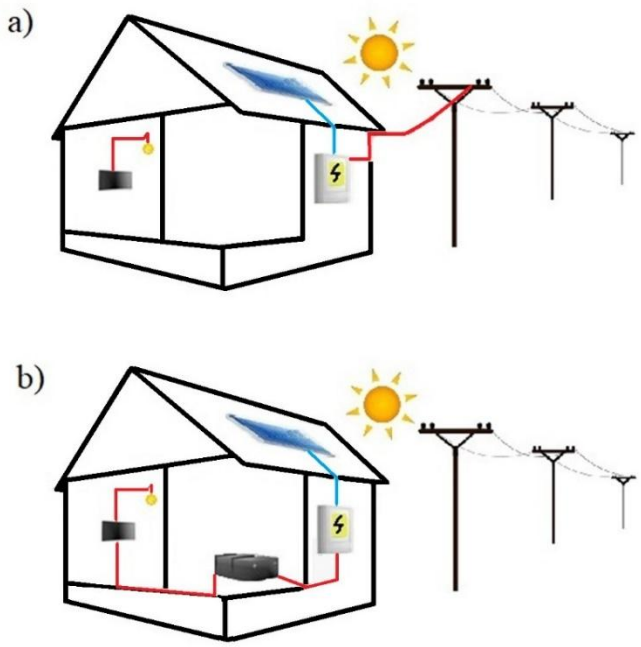
Przekształcenie tradycyjnych systemów w ISC to kluczowy krok w kierunku zrównoważonej transformacji energetycznej, poprawy jakości życia użytkowników i realizacji celów klimatycznych. Wdrożenie lokalnych, niezależnych źródeł energii (OFF-Grid) zwiększa elastyczność i bezpieczeństwo systemu ciepłowniczego, umożliwiając efektywne monitorowanie i sterowanie pracą sieci ciepłowniczej. Kluczową rolę w tworzeniu ISC odgrywają również systemy SCADA, sterowniki PLC oraz zaawansowane systemy komunikacji, które umożliwiają automatyzację procesów

i efektywne zarządzanie przepływem czynnika grzewczego w sieciach ciepłowniczych.

3.2. SYSTEMY ZASILANIA OFF-GRID

Zasilanie OFF-Grid i ON-Grid odnosi się do sposobu podłączenia instalacji elektrycznej obiektu do sieci elektroenergetycznej lub jej całkowitej niezależności. Oba rozwiązania znajdują zastosowanie w różnych sektorach, takich jak gospodarstwa domowe, rolnictwo czy przemysł.

System ON-Grid (rys. 3.1.a)) oznacza, że instalacja jest połączona z krajową siecią elektroenergetyczną, co umożliwia zarówno pobieranie energii, jak i oddawanie nadwyżek (np. z paneli fotowoltaicznych). Natomiast system OFF-Grid (rys. 3.1.b)), znany jako instalacja wyspowa, funkcjonuje całkowicie niezależnie od sieci. Energia elektryczna jest wytwarzana lokalnie, np. za pomocą instalacji fotowoltaicznych, a następnie magazynowana w akumulatorach, co pozwala na jej wykorzystanie w dowolnym momencie.



Rys. 3.1. Rodzaje instalacji: a) ON-Grid, b) OFF–Grid [40]

System OFF-Grid składa się z kilku kluczowych elementów: źródła energii (np. paneli PV), akumulatorów magazynujących energię oraz regulatora ładowania, który

zapewnia prawidłowe funkcjonowanie całego układu. W zależności od potrzeb odbiorcy, instalację można rozbudować o dodatkowe komponenty.

Z kolei systemy ON-Grid są szeroko wykorzystywane w budynkach mieszkalnych, biurowych i przemysłowych, podczas gdy instalacje OFF-Grid spotyka się rzadziej, głównie w domach jednorodzinnych i obiektach znajdujących się z dala od infrastruktury energetycznej.

Podłączenie do sieci elektroenergetycznej (ON-Grid) wiąże się z wieloma korzyściami, w tym z brakiem konieczności inwestowania w kosztowne akumulatory, co redukuje wydatki na instalację. Dodatkowo, krajowa sieć zapewnia stabilne dostawy energii, eliminując ryzyko jej niedoboru. Minusem tego rozwiązania jest jednak zależność od dostawcy energii i brak wpływu na wysokość opłat.

Systemy OFF-Grid, działając niezależnie od krajowej sieci, oferują pełną samowystarczalność energetyczną, co stanowi dużą zaletę w miejscach o ograniczonym dostępie do infrastruktury elektroenergetycznej. Jednakże, ze względu na wysokie koszty inwestycyjne i konieczność lokalizacji źródła energii w pobliżu odbiorcy, ich zastosowanie bywa ograniczone.

Systemy zasilania OFF-Grid, stanowią alternatywę dla tradycyjnych systemów podłączonych do sieci elektroenergetycznej (ON-Grid). Ich główną cechą jest zdolność do samodzielnego wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej w sposób autonomiczny, co czyni je szczególnie przydatnymi w lokalizacjach, gdzie dostęp do sieci energetycznej jest utrudniony lub niemożliwy. W literaturze przedmiotu systemy OFF-Grid są szeroko omawiane w kontekście ich technologii, wydajności oraz zastosowań w różnych sektorach przemysłowych i społecznych.

Systemy OFF-Grid opierają się na wykorzystaniu lokalnych źródeł energii odnawialnej lub konwencjonalnej, takich jak:

- Energia słoneczna: Systemy fotowoltaiczne (PV) są jednym z najczęściej wykorzystywanych źródeł energii w systemach wyspowych. Moduły PV w połączeniu z akumulatorami umożliwiają magazynowanie energii i jej dystrybucję w okresach niskiego nasłonecznienia.
- Turbiny wiatrowe: W regionach o wysokim potencjale wiatrowym turbiny wiatrowe mogą zapewnić źródło energii elektrycznej.
- Turbiny wodne: Małe instalacje hydroenergetyczne są stosowane w miejscach, gdzie istnieje dostęp do źródeł wody o odpowiednim przepływie.

- Generatory spalinowe: Używane jako źródła rezerwowe, szczególnie w systemach hybrydowych.

Kluczowym elementem systemów OFF-Grid jest magazynowanie energii. Najczęściej stosowane są akumulatory, które pozwalają na gromadzenie energii w okresach nadwyżki produkcji i jej wykorzystanie w okresach zapotrzebowania.

Poniżej przedstawiono przykłady publikacji i materiałów dotyczących zasilania OFF-Grid

- "OFF-Grid Solar Power Made Easy " [17]

  Praktyczny przewodnik dla osób zainteresowanych samodzielnym projektowaniem i instalacją systemów solarnych poza siecią.
- "The Renewable Energy Handbook: A Guide to Rural Energy Independence" [18]

  Kompendium wiedzy o energii odnawialnej, w tym systemach OFF-Grid.

Publikacje te stanowią cenne źródło wiedzy na temat zasilania OFF-Grid, obejmując zarówno teoretyczne aspekty projektowania, jak i praktyczne wskazówki dotyczące wdrażania niezależnych systemów energetycznych.

W kontekście sieci ciepłowniczych systemy OFF-Grid mogą odegrać kluczową rolę w zasilaniu obiektów, takich jak komory ciepłownicze, które często nie mają dostępu do sieci elektroenergetycznej. Zastosowanie alternatywnych źródeł energii, takich jak pompy w ruchu turbinowym (napędzające generatory elektryczne), pozwala na autonomiczną pracę urządzeń automatyki i systemów przesyłu danych. Integracja obiektów zasilanych wyspowo z systemem SCADA zapewni efektywne zarządzanie i kontrolę parametrów sieci ciepłowniczej.

W perspektywie rozwoju technologii, systemy OFF-Grid mogą stać się fundamentem bardziej zrównoważonych i efektywnych sieci ciepłowniczych. Ich zastosowanie w komorach ciepłowniczych znacząco usprawni zarządzanie inteligentnymi sieciami, umożliwiając precyzyjne monitorowanie oraz regulację parametrów w wielu punktach. Dzięki niezależnym źródłom energii możliwe jest precyzyjne monitorowanie i regulacja parametrów sieci w wielu punktach, co poprawi efektywność całego systemu ciepłowniczego.

3.3. SYSTEM SCADA

System SCADA jest zaawansowanym narzędziem, stanowiący fundament nowoczesnej automatyki przemysłowej, umożliwiający precyzyjną kontrolę oraz kompleksowe zarządzanie procesami technologicznymi w czasie rzeczywistym. Ich główną funkcją jest gromadzenie i przetwarzanie danych pozyskiwanych z obiektów, zapewniając efektywne zarządzanie złożonymi systemami poprzez integrację danych, zdalne sterowanie oraz wizualizację procesów. SCADA znajduje szerokie zastosowanie w sektorze energetycznym, przemyśle chemicznym, transporcie, gospodarce wodno-ściekowej oraz inteligentnych systemach budynkowych.

Podstawową cechą systemów SCADA jest ich wielopoziomowa architektura, która obejmuje warstwę urządzeń terenowych, systemy transmisji danych, serwery przetwarzające informacje oraz interfejsy operatorskie umożliwiające wizualizację procesów i interakcję użytkowników z systemem. Urządzenia pomiarowe, takie jak czujniki ciśnienia, temperatury, przepływu czy poziomu cieczy, stanowią kluczowy element systemu, dostarczając precyzyjnych danych procesowych, które następnie są przekazywane do jednostek sterujących, takich jak sterowniki PLC (Programmable Logic Controllers). Dzięki zastosowaniu różnorodnych protokołów komunikacyjnych, możliwe jest efektywne przesyłanie informacji między warstwami systemu, co pozwala na optymalizację procesów operacyjnych oraz zwiększenie ich niezawodności.

Istotnym aspektem działania systemów SCADA jest umożliwienie analizy pracy instalacji na podstawie danych pozyskiwanych z monitorowanych obiektów oraz podejmowanie decyzji o ich zdalnym sterowaniu.

Zintegrowane systemy alarmowe, stanowiące integralną część SCADA, zapewniają bieżące monitorowanie wartości procesowych oraz generowanie powiadomień w przypadku wykrycia odchyleń od normy. Mechanizmy te pozwalają operatorom na szybką reakcję na potencjalne zagrożenia oraz podejmowanie działań korygujących w celu przywrócenia stabilności systemu.

Jednym z kluczowych wyzwań związanych z eksploatacją systemów SCADA jest kwestia cyberbezpieczeństwa. Wraz z postępującą cyfryzacją przemysłu oraz integracją systemów SCADA z sieciami IT, wzrasta ryzyko cyberataków, które mogą prowadzić do zakłóceń w funkcjonowaniu infrastruktury krytycznej. W celu minimalizacji zagrożeń stosowane są zaawansowane mechanizmy ochrony, takie jak

szyfrowanie transmisji danych, wielopoziomowa autoryzacja dostępu, segmentacja sieci oraz systemy detekcji włamań.

Kierunki rozwoju systemów SCADA koncentrują się na integracji z Przemysłem 4.0, co oznacza wdrażanie między innymi technologii chmurowych, które pozwalają na skalowalne i rozproszone zarządzanie danymi, co ma szczególne znaczenie w dużych systemach ciepłowniczych obejmujących wiele obszarów miejskich. Przeniesienie części funkcji SCADA do środowiska chmurowego pozwala na skalowalność systemu, większą elastyczność w zakresie analizy danych. Z kolei wdrożenie zdecentralizowanych systemów obliczeniowych, bazujących na przetwarzaniu danych, umożliwia natychmiastową reakcję na zmiany w procesach technologicznych, eliminując konieczność przesyłania wszystkich danych do centralnych serwerów.

Systemy SCADA ewoluują w kierunku bardziej autonomicznych i inteligentnych platform zarządzania procesami, które łączą tradycyjne podejście do automatyzacji z najnowszymi osiągnięciami w dziedzinie analizy danych i komunikacji. Ich rola w nowoczesnym przemyśle jest nie do przecenienia, a dalszy rozwój w zakresie cyfryzacji, sztucznej inteligencji i bezpieczeństwa informatycznego będzie determinować ich efektywność oraz zdolność do adaptacji w dynamicznie zmieniającym się środowisku przemysłowym.

W konsekwencji, systemy SCADA stanowią fundament cyfryzacji ciepłownictwa, umożliwiając pełną automatyzację i optymalizację procesów przesyłu oraz dystrybucji ciepła. Ich rozwój w kierunku inteligentnych, adaptacyjnych systemów sterowania pozwala na zwiększenie niezawodności dostaw ciepła, obniżenie kosztów eksploatacyjnych oraz poprawę efektywności energetycznej całego sektora.

Główne funkcje systemu SCADA obejmują:

A. Monitorowanie procesów w czasie rzeczywistym: System zbiera dane z czujników i urządzeń na poziomie polowym, takich jak przepływomierze, termometry czy przetworniki ciśnienia.
B. Zdalne sterowanie: Operatorzy mogą zdalnie sterować urządzeniami, takimi jak zawory czy pompy, co eliminuje potrzebę fizycznej obecności na miejscu.
C. Zbieranie i archiwizacja danych: SCADA umożliwia długoterminowe przechowywanie danych procesowych w celu analizy trendów, diagnostyki oraz raportowania.

D. Alarmowanie i zarządzanie zdarzeniami: System generuje alarmy w przypadku przekroczenia określonych wartości, takich jak nadmierne ciśnienie czy temperatura.
E. Wizualizacja: Interfejsy graficzne przedstawiają aktualny stan procesów w formie schematów, wykresów czy tablic danych, co ułatwia podejmowanie decyzji.

Architektura SCADA składa się z kilku podstawowych elementów:

- Stacje operatorskie: Interfejs użytkownika pozwalający operatorom na monitorowanie i sterowanie procesami,
- Serwery SCADA: Centralne jednostki przetwarzające dane, zarządzające komunikacją między urządzeniami polowymi a interfejsem użytkownika,
- Sterowniki PLC: Urządzenia polowe odpowiedzialne za lokalne sterowanie procesami oraz przesyłanie danych do serwera SCADA,
- Czujniki i urządzenia polowe: Komponenty odpowiedzialne za zbieranie danych procesowych, takich jak temperatura, ciśnienie czy przepływ,
- Sieci komunikacyjne: Połączenia między urządzeniami, wykorzystujące technologie przewodowe (Ethernet, RS-485) lub bezprzewodowe (Wi-Fi, GPRS, LTE).

System SCADA odgrywa kluczową rolę w zarządzaniu instalacjami poprzez:

A. Zintegrowane zarządzanie: Pozwala na centralizację monitorowania i sterowania wieloma rozproszonymi obiektami, co zmniejsza ryzyko błędów i podnosi efektywność operacyjną.
B. Poprawę niezawodności systemów: Ciągłe monitorowanie procesów oraz szybka reakcja na anomalie minimalizują ryzyko awarii.
C. Optymalizację zużycia zasobów: Analiza danych historycznych umożliwia optymalizację procesów, np. poprzez redukcję strat energii.
D. Wsparcie dla predykcyjnego utrzymania ruchu: Wykorzystanie danych z systemu SCADA umożliwia przewidywanie potencjalnych usterek i planowanie serwisów.
E. Zabezpieczenie infrastruktury krytycznej: Zaawansowane funkcje monitoringu i alarmów umożliwiają szybką identyfikację i reakcję na zagrożenia.

3.3.1. ROLA SYSTEMÓW SCADA W SYSTEMACH CIEPŁOWNICZYCH

Systemy SCADA odgrywają kluczową rolę w monitorowaniu, sterowaniu i optymalizacji pracy sieci ciepłowniczych. Dzięki zastosowaniu tej technologii możliwe jest zdalne zarządzanie infrastrukturą ciepłowniczą, co przekłada się na efektywność operacyjną oraz poprawę bezpieczeństwa dostaw ciepła.

SCADA umożliwia zdalne sterowanie pracą źródeł ciepła, węzłów cieplnych, komór ciepłowniczych i pompowni. Operatorzy mogą zdalnie regulować parametry systemu, a w przypadku awarii – podjąć natychmiastowe działania bez konieczności wysyłania zespołu serwisowego na miejsce.

SCADA w systemach ciepłowniczych zapewnia nie tylko monitorowanie i sterowanie, ale także analizę danych, optymalizację pracy oraz poprawę bezpieczeństwa i niezawodności dostaw ciepła. W dobie transformacji energetycznej i rosnącej presji na efektywność energetyczną, systemy SCADA stanowią kluczowy element nowoczesnych sieci ciepłowniczych.

3.3.2. LITERATURA - SCADA

Poniżej przedstawiono przykłady publikacji i materiałów dotyczących systemów SCADA:

- ”Securing SCADA Systems” [20]
  Książka ta stanowi kompleksowy przegląd zabezpieczeń w systemach SCADA, uwzględniając architekturę, funkcjonalność oraz potencjalne zagrożenia związane z cyberbezpieczeństwem.
- ”Practical SCADA for Industry” [2]
  Wprowadzenie do podstawowych zasad działania systemów SCADA oraz ich zastosowań w przemyśle, z przykładami praktycznych wdrożeń.
- ”Research Challenges for the Security of Control Systems” [9]
  Publikacja omawiająca aktualne wyzwania w zakresie bezpieczeństwa systemów SCADA oraz propozycje rozwiązań na przyszłość.
- ”Introduction to Industrial Control Networks” [15]
  Artykuł dotyczący komunikacji w sieciach przemysłowych, w tym w systemach SCADA.
- IEC 62443 Standard Series [60]

Międzynarodowe standardy dotyczące bezpieczeństwa systemów automatyki przemysłowej, w tym SCADA, oferujące wytyczne dla projektowania, wdrażania i utrzymania tych systemów.

- ”What is SCADA?” [12]
  Wprowadzenie do systemów SCADA, ich architektury i funkcji, z przykładami zastosowań w różnych sektorach.
- ”SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition” [7]
  Książka ta szczegółowo opisuje elementy architektury SCADA, ich integrację oraz przyszłościowe kierunki rozwoju.

W przyszłości rozwój SCADA będzie związany z dalszymi postępami w zakresie sztucznej inteligencji, analizy danych w chmurze oraz rozwiązań z zakresu cyberbezpieczeństwa. Literatura podkreśla rosnącą rolę tych systemów w budowie zintegrowanych, inteligentnych infrastruktur przemysłowych również w ciepłownictwie.

3.4. STEROWNIKI PLC

Sterownik PLC to mikroprocesorowe urządzenie wykorzystywane do sterowania maszynami i procesami przemysłowymi. Sterowniki stanowią fundament nowoczesnych systemów automatyki przemysłowej, odgrywając kluczową rolę w monitorowaniu i sterowaniu procesami ciepłowniczymi. Dzięki ich elastyczności, wysokiej niezawodności oraz zdolności do pracy w czasie rzeczywistym, PLC pozwalają na precyzyjne zarządzanie systemami wytwarzania, przesyłu i dystrybucji ciepła Programowalny sterownik logiczny znajduje zastosowanie w automatyce przemysłowej, systemach sterowania maszynami, sieciach elektroenergetycznych, ciepłownictwie i wielu innych branżach.

Sterowniki PLC powstały jako alternatywa dla skomplikowanych układów przekaźnikowo-stykowych. Pierwszy PLC, Model 084, został opracowany w 1969 roku przez firmę Modicon. Jego celem było uproszczenie sterowania maszynami w przemyśle motoryzacyjnym.

W kolejnych latach PLC zaczęły zastępować tradycyjne systemy sterowania, oferując większą elastyczność i łatwość programowania. Wprowadzono pierwsze modułowe PLC, które można było rozbudowywać o dodatkowe wejścia/wyjścia oraz

komunikację sieciową. W latach 80. nastąpiła integracja PLC z systemami komputerowymi i sieciami przemysłowymi (np. Profibus, ModBus), co umożliwiło lepszą komunikację pomiędzy sterownikami i systemami nadrzędnymi (SCADA).
Rozwój mikroprocesorów pozwolił na zmniejszenie rozmiarów PLC oraz zwiększenie ich wydajności. Sterowniki zaczęły obsługiwać bardziej skomplikowane algorytmy sterowania i komunikację z innymi systemami. Obecne PLC są częścią koncepcji Przemysłu 4.0, wspierając IoT (Internet Rzeczy), zdalne monitorowanie i analizę danych w chmurze. W przyszłości PLC będą coraz bardziej zintegrowane z chmurą obliczeniową, co jeszcze bardziej zwiększy efektywność i niezawodność systemów sterowania.

3.4.1. ZASTOSOWANIE PLC W SYSTEMACH CIEPŁOWNICZYCH

W ciepłownictwie sterowniki PLC pełnią kluczową rolę w automatyzacji i optymalizacji procesów produkcji oraz dystrybucji ciepła. Ich zastosowanie obejmuje szeroki zakres funkcji, które znacząco zwiększają efektywność energetyczną oraz niezawodność systemu.

A. Sterowanie źródłami ciepła

   PLC zarządzają pracą kotłów, układów kogeneracyjnych oraz pomp ciepła, kontrolując ich parametry operacyjne w celu optymalizacji procesu spalania i wymiany ciepła.

B. Automatyzacja pracy sieci ciepłowniczej

   Sterowniki logiczne monitorują i regulują parametry pracy magistrali ciepłowniczych, zapewniając odpowiednie ciśnienie i temperaturę czynnika grzewczego. Współpracują z systemami regulacji węzłów ciepłowniczych, dostosowując ilość dostarczanego ciepła do zmiennych warunków atmosferycznych oraz aktualnego zapotrzebowania odbiorców.

C. Sterowanie węzłami cieplnymi

   Węzły cieplne, stanowiące punkty odbioru ciepła przez budynki, są sterowane za pomocą PLC w celu utrzymania optymalnych parametrów pracy instalacji. Sterowniki zarządzają pracą wymienników ciepła oraz pomp obiegowych, dostosowując ich działanie do aktualnego poziomu zużycia energii cieplnej przez odbiorców.

D. Optymalizacja pracy pomp i zaworów regulacyjnych

PLC sterują pracą pomp cyrkulacyjnych oraz zaworów regulacyjnych, zapewniając stabilność parametrów przepływu w sieci ciepłowniczej. Wykorzystując algorytmy sterowania, dostosowują stopień otwarcia zaworów do bieżących potrzeb, redukując powstanie strat cieplnych.

E. Diagnostyka i konserwacja predykcyjna

Zaawansowane sterowniki PLC wyposażone w algorytmy analityczne umożliwiają diagnostykę stanu technicznego urządzeń ciepłowniczych. Za pomocą PLC można analizować parametry pracy pomp, wymienników i zaworów, a przez to wykrywać wczesne symptomy awarii.

F. Integracja z systemami SCADA i IoT

Współczesne sterowniki PLC są projektowane z myślą o integracji z systemami SCADA oraz technologiami Internetu Rzeczy (IoT), umożliwiając zdalne monitorowanie i sterowanie sieciami ciepłowniczymi w czasie rzeczywistym. Połączenie PLC z systemami analizy danych w chmurze pozwali na wykorzystanie sztucznej inteligencji i algorytmów uczenia maszynowego do optymalizacji procesów ciepłowniczych.

Standardowa architektura sterownika PLC obejmuje kilka podstawowych modułów:

- Moduł wejściowy – odpowiedzialny za odbiór sygnałów z sensorów monitorujących kluczowe parametry sieci ciepłowniczej, w tym temperaturę, ciśnienie, przepływ czy jakość czynnika grzewczego.
- Jednostka centralna (CPU) – pełni funkcję głównego elementu obliczeniowego, przetwarzającego dane według zaprogramowanych algorytmów sterowania. CPU wykonuje cykliczne instrukcje logiczne, oblicza wartości zadane i podejmuje decyzje dotyczące sterowania urządzeniami w systemie ciepłowniczym.
- Moduł wyjściowy – przesyła sygnały sterujące do urządzeń wykonawczych, np. napędów pomp, siłowników zaworów regulacyjnych.
- Interfejs komunikacyjny – umożliwia integrację PLC z innymi systemami automatyki, w tym SCADA, poprzez różne protokoły komunikacyjne.
- Moduł zasilania – dostarcza energię elektryczną do poszczególnych komponentów sterownika, zapewniając ich stabilną i nieprzerwaną pracę.

PLC funkcjonują w oparciu o cykliczne skanowanie programu sterującego, składające się z trzech głównych etapów: odczytu stanów wejść, przetwarzania programu oraz aktualizacji wyjść. Dzięki temu zapewniają one szybkie reakcje na zmiany warunków eksploatacyjnych i umożliwiają dynamiczne dostosowanie parametrów systemu ciepłowniczego do aktualnego zapotrzebowania energetycznego.

PLC to niezbędny element nowoczesnych systemów automatyki, zapewniający efektywność, bezpieczeństwo i niezawodność w zarządzaniu sieciami ciepłowniczymi.

Rozwój technologii sterowników PLC w ciepłownictwie koncentruje się na zwiększeniu ich inteligencji i elastyczności w kontekście cyfryzacji przemysłu energetycznego. Coraz większe znaczenie ma również wdrażanie standardów komunikacyjnych opartych na protokołach przemysłowych, które umożliwiają zarządzanie procesami ciepłowniczymi i analizę stanów urządzeń. W rezultacie, programowalne sterowniki logiczne nie tylko usprawniają zarządzanie procesami ciepłowniczymi, ale także stanowią kluczowy element cyfrowej transformacji sektora energetycznego, umożliwiając przejście na bardziej zrównoważone i efektywne zarządzanie dystrybucją ciepła.

3.4.2. LITERATURA - PLC

Poniżej przedstawiono przykłady publikacji i materiałów dotyczących sterowników PLC:

A. "Programmable Logic Controllers" [6]
   Jeden z najpopularniejszych podręczników dotyczących sterowników PLC, obejmujący podstawy działania, języki programowania oraz praktyczne zastosowania.
B. "Automating Manufacturing Systems with PLCs" [16]
   Publikacja zawierająca szczegółowe opisy metod sterowania oraz przykłady kodu dla PLC.
D. IEC 61131 – Międzynarodowy standard programowania sterowników PLC [61]
   Definiuje języki programowania PLC, takie jak:
   - LAD (Ladder Diagram) – schemat drabinkowy,

- FBD (Function Block Diagram) – diagram bloków funkcyjnych,
- ST (Structured Text) – tekst strukturalny.

E. ”Sterowniki PLC w praktyce inżynierskiej” [21]
Przedstawia praktyczne zastosowania sterowników PLC w automatyce przemysłowej: programowanie, konfigurację oraz diagnostykę systemów sterowania.

F. ”Wstęp do programowania sterowników PLC” [29]
Omawiają struktury programistyczne, języki programowania oraz sposoby implementacji algorytmów sterowania.

W przyszłości rozwój sterowników PLC będzie związany z dalszymi postępami w zakresie integracji z systemami IoT, wykorzystania sztucznej inteligencji w sterowaniu procesami oraz zaawansowanej analizy danych przemysłowych. Literatura podkreśla kluczową rolę PLC w automatyzacji oraz ich znaczenie w budowie nowoczesnych, inteligentnych systemów sterowania. Szczególny nacisk kładzie się na rozwój standardów programowania, komunikację w czasie rzeczywistym oraz zwiększone bezpieczeństwo systemów sterujących.

3.5. PROTOKOŁY I TECHNOLOGIE KOMUNIKACYJNE

Protokół komunikacyjny to zbiór zasad i reguł określających sposób wymiany danych między urządzeniami w sieci komputerowej. Zapewnia on spójność i poprawność komunikacji, określając format danych, procedury ich przesyłania, metody kontroli błędów i sposób adresowania.

Systemy OFF-Grid, czyli niezależne od centralnych sieci energetycznych, wymagają efektywnych technologii komunikacyjnych do monitorowania, sterowania oraz wymiany danych między urządzeniami. Wśród szerokiej gamy dostępnych protokołów, szczególne znaczenie mają ModBus, LonWorks, BACnet, LoRaWAN, MQTT oraz PROFIBUS, które są szeroko stosowane w automatyce przemysłowej i systemach zarządzania energią.

ModBus to jeden z najpopularniejszych i najstarszych protokołów komunikacyjnych stosowanych w automatyce przemysłowej. Został opracowany w 1979 roku przez

firmę Modicon (obecnie Schneider Electric) i jest oparty na architekturze klient-serwer. Jego kluczowe cechy to:

- Prostota implementacji – ModBus wykorzystuje strukturę zapytań i odpowiedzi, co ułatwia jego wdrożenie w systemach rozproszonych.
- Dostępność w różnych wariantach – ModBus istnieje w wersjach: ModBus RTU (oparty na RS-485/RS-232), ModBus ASCII oraz ModBus TCP/IP, umożliwiając zastosowanie zarówno w przewodowych, jak i bezprzewodowych systemach komunikacyjnych.
- Integracja z systemami zarządzania energią – ModBus jest szeroko stosowany w licznikach energii, kontrolerach fotowoltaicznych, falownikach i systemach zarządzania bateriami w instalacjach OFF-Grid.
- Otwarty standard – Brak opłat licencyjnych oraz szeroka dokumentacja sprawiają, że ModBus jest preferowanym rozwiązaniem w wielu systemach.

LonWorks (Local Operating Network) to protokół opracowany przez firmę Echelon Corporation, który znajduje szerokie zastosowanie w automatyce budynkowej i przemysłowej. Jego kluczowe cechy to:

- Rozproszona architektura – W odróżnieniu od ModBus, LonWorks nie jest oparty na centralnym serwerze, lecz na inteligentnych węzłach komunikacyjnych, które mogą samodzielnie podejmować decyzje.
- Wsparcie dla różnych mediów transmisyjnych – LonWorks działa zarówno w sieciach przewodowych (np. sieci z wykorzystaniem skrętki, światłowodów), jak i bezprzewodowych.
- Zastosowanie w inteligentnych systemach zarządzania energią – Dzięki autonomicznym węzłom i funkcjom samokonfiguracji, LonWorks jest stosowany w systemach zarządzania budynkami.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) to protokół komunikacyjny przeznaczony do niskomocowych, szerokozasięgowych sieci IoT. Jest szczególnie użyteczny w systemach OFF-Grid, gdzie kluczowe znaczenie ma energooszczędność i zasięg transmisji. Główne cechy LoRaWAN to:

- Długi zasięg transmisji – Nawet do kilkunastu kilometrów w terenie otwartym, co sprawia, że jest idealny do rozproszonych instalacji.
- Niski pobór energii – Urządzenia mogą działać na bateriach przez wiele lat, co jest kluczowe w zdalnych systemach OFF-Grid.

- Obsługa wielu urządzeń jednocześnie – LoRaWAN umożliwia komunikację tysięcy sensorów w jednej sieci.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) to lekki protokół komunikacyjny oparty na architekturze publikacja-subskrypcja, stosowany głównie w systemach IoT i monitorowania w czasie rzeczywistym. Główne zalety MQTT to:

- Minimalne zużycie zasobów – MQTT jest zoptymalizowany pod kątem systemów o niskim poborze mocy i ograniczonej przepustowości.
- Wsparcie dla komunikacji w czasie rzeczywistym – Dzięki architekturze brokerowej MQTT pozwala na efektywną transmisję danych między urządzeniami a centralnym serwerem.
- Zastosowanie w monitorowaniu systemów OFF-Grid – MQTT jest szeroko stosowany w rozwiązaniach telemetrycznych, monitorowaniu systemów fotowoltaicznych oraz zarządzaniu inteligentnymi sieciami energetycznymi.

PROFIBUS (Process Field Bus) to zaawansowany standard komunikacyjny używany głównie w automatyce przemysłowej. Jest szeroko stosowany w sterownikach PLC oraz systemach zarządzania energią. Kluczowe cechy to:

- Wysoka niezawodność i szybkość transmisji – PROFIBUS zapewnia deterministyczną transmisję danych, co jest kluczowe w krytycznych aplikacjach przemysłowych.
- Wsparcie dla wielu urządzeń – PROFIBUS umożliwia komunikację setek urządzeń w jednej sieci.
- Integracja z systemami zarządzania energią – Jest stosowany w systemach kontroli turbin wiatrowych, elektrociepłowniach oraz instalacjach fotowoltaicznych,

Podkreślenie szczególnego znaczenia tych protokołów wynika z ich szerokiego zastosowania oraz ich specyficznych cech, które sprawiają, że mogą być szczególnie przydatne w takim środowisku jak rozproszony system sterowania oparty na obiektach zasilanych lokalnie (systemem OFF-Grid):

- ModBus – Jest jednym z najstarszych i najczęściej stosowanych protokołów w automatyce przemysłowej. Jego prostota, szeroka kompatybilność i dostępność w różnych wariantach (RTU, TCP) sprawiają, że świetnie nadaje się do integracji urządzeń w systemach OFF-Grid.

- LonWorks – Dzięki architekturze rozproszonej i autonomicznym węzłom komunikacyjnym jest odporny na awarie pojedynczych elementów sieci, co jest kluczowe w odizolowanych systemach.
- LoRaWAN – Oferuje duży zasięg i niski pobór energii, co czyni go idealnym do zastosowań w rozproszonych systemach OFF-Grid, gdzie przewodowe połączenia mogą być niepraktyczne.
- MQTT – Dzięki lekkiej architekturze i efektywnej komunikacji typu publikacja-subskrypcja, doskonale sprawdza się w monitorowaniu i sterowaniu w czasie rzeczywistym, co jest istotne dla optymalizacji pracy systemów OFF-Grid.
- PROFIBUS – Jego deterministyczny charakter i zdolność do obsługi dużej liczby urządzeń sprawiają, że jest stosowany w zaawansowanych systemach automatyki przemysłowej.

Protokoły komunikacyjne odgrywają kluczową rolę w systemach rozproszonych, umożliwiając efektywne monitorowanie i sterowanie urządzeniami. ModBus jest popularnym rozwiązaniem dla prostych systemów sterowania, LonWorks sprawdza się w autonomicznych sieciach rozproszonych, LoRaWAN umożliwia komunikację na duże odległości przy niskim poborze energii, MQTT oferuje efektywną transmisję danych w czasie rzeczywistym, a PROFIBUS zapewnia niezawodność i wysoką szybkość transmisji w systemach przemysłowych. Wybór odpowiedniego protokołu zależy od specyfiki danej instalacji oraz wymagań dotyczących komunikacji i integracji z innymi systemami.

3.5.1. LITERATURA - TECHNOLOGIE KOMUNIKACYJNE

Poniżej przedstawiono przykłady publikacji i materiałów dotyczących protokołów komunikacyjnych ModBus, LonWorks, LoRaWAN, MQTT oraz PROFIBUS:

A. ModBus
    - ModBus Application Protocol Specification [62] – oficjalna specyfikacja protokołu ModBus.
    - ModBus Messaging on TCP/IP Implementation Guide [63] – przewodnik dotyczący implementacji ModBus w sieciach TCP/IP.

- ModBus RTU vs. ModBus TCP/IP [64] – porównanie wersji protokołu ModBus.

B. LonWorks
- LonWorks Protocol Specification [65] – dokumentacja techniczna,
- LonTalk Protocol Standard (ANSI/CEA-709.1) [65] – standard określający działanie protokołu LonWorks.

C. LoRaWAN
- LoRaWAN Specification [68] – oficjalna specyfikacja.
- LoRaWAN Regional Parameters [69] – dokument określający parametry regionalne dla sieci LoRaWAN.
- Introduction to LoRa and LoRaWAN [67] – artykuły i przewodniki na temat technologii LoRa.

D. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)
- MQTT v5.0 Specification [70] – oficjalna specyfikacja.
- MQTT Essentials [71] – seria artykułów wyjaśniających działanie MQTT.

E. PROFIBUS
- PROFIBUS Standard IEC 61158 [74] – międzynarodowy standard określający działanie protokołu PROFIBUS.
- PROFIBUS System Description [72] – dokumentacja.

Każdy z tych protokołów jest szeroko wykorzystywany w różnych sektorach przemysłowych, IoT oraz automatyce.

3.6. WIZUALIZACJA DANYCH W SYSTEMACH SCADA

Systemy SCADA odgrywają kluczową rolę w monitorowaniu i zarządzaniu procesami przemysłowymi. Wizualizacja danych w tych systemach ma fundamentalne znaczenie dla efektywności operacyjnej, ponieważ umożliwia operatorom szybkie podejmowanie decyzji na podstawie prezentowanych informacji.

Wizualizacja w systemach SCADA koncentruje się na czytelności, szybkości interpretacji oraz łatwości interakcji użytkownika z systemem. W tym kontekście kluczowe znaczenie mają następujące elementy:

- Schematy synoptyczne – graficzne przedstawienie procesów, często w formie map zakładów lub schematów przepływu.
- Wykresy i trendy – umożliwiają analizę historycznych oraz bieżących danych pomiarowych.
- Alarmy i powiadomienia – kolory i ikony informujące o stanach krytycznych systemu.
- Interaktywność – możliwość sterowania systemem w czasie rzeczywistym poprzez interfejsy HMI (Human-Machine Interface).

Nowoczesne systemy SCADA wykorzystują technologie ułatwiające wizualizację i analizę danych, w tym:

- HTML i interfejsy webowe – umożliwiają dostęp do systemu z poziomu przeglądarki internetowej na różnych urządzeniach.
- Grafika wektorowa (SVG) – zapewnia skalowalność i czytelność wizualizacji.
- Integracja z bazami danych – pozwala na szybkie wyszukiwanie i analizę danych.
- Standard OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) – zapewnia interoperacyjność pomiędzy różnymi systemami SCADA.

Wizualizacja w systemach SCADA znajduje zastosowanie w wielu sektorach, takich jak:

- Energetyka – monitorowanie sieci energetycznych i analizowanie zużycia energii.
- Automatyka przemysłowa – nadzór nad liniami produkcyjnymi i optymalizacja procesów.
- Gospodarka wodna – zarządzanie sieciami wodociągowymi i oczyszczalniami ścieków.
- Transport i logistyka – kontrola ruchu kolejowego, drogowego i lotniczego.

Podsumowując, wizualizacja w systemach SCADA jest niezbędnym elementem efektywnego zarządzania procesami przemysłowymi w tym ciepłownictwie. Dynamiczny rozwój technologii w tym obszarze otwiera nowe możliwości w zakresie poprawy intuicyjności i efektywności zarządzania danymi.

3.7. PORÓWNANIE PROTOKOŁÓW KOMUNIKACYJNYCH MODBUS I LONWORKS POD KĄTEM OPÓŹNIEŃ TRANSMISJI DANYCH

W dobie rozwoju automatyki przemysłowej i budynkowej kluczową rolę odgrywa niezawodna i szybka komunikacja między urządzeniami. Dwa popularne protokoły w tym obszarze to ModBus i LonWorks. Choć oba służą do przesyłania danych w systemach automatyki, ich architektura i sposób zarządzania komunikacją są zasadniczo różne, co przekłada się na różnice w opóźnieniach transmisji danych.

ModBus to deterministyczny protokół komunikacyjny. Występuje w dwóch podstawowych wersjach: ModBus RTU (przesył danych szeregowy) i ModBus TCP/IP (komunikacja przez sieć Ethernet). ModBus RTU oparty jest na architekturze master-slave, natomiast wersja TCP przyjmuje model klient-serwer. Transmisja odbywa się poprzez cykliczne odpytywanie urządzeń podrzędnych przez urządzenie nadrzędne [63].

ModBus jest szeroko stosowany w automatyce przemysłowej ze względu na prostotę implementacji. Jest to protokół typu klient-serwer (bądź master-slave), w którym urządzenie nadrzędne (master) cyklicznie odpytuje urządzenia podrzędne (slave), co może prowadzić do opóźnień związanych z czasem oczekiwania na odpowiedź [82].

LonWorks to zdecentralizowany protokół komunikacyjny, dedykowany głównie systemom automatyki budynkowej. Urządzenia komunikują się bezpośrednio, bez konieczności istnienia centralnego kontrolera. LonWorks umożliwia komunikację zdarzeniową oraz wspiera różne topologie sieciowe (magistrala, gwiazda, siatka) [78].

W przypadku ModBus RTU, opóźnienia transmisji zależą od prędkości transmisji (typowo 9600–115200 bps), liczby urządzeń w sieci oraz czasu wymaganych przerw między ramkami (minimum 3.5 znaku, czyli około 2–5 ms). Dla standardowej prędkości 19200 bit/s, minimalny czas przerwy wynosi około 2 ms [82]. W przypadku sieci z większą liczbą węzłów czas cyklu rośnie.

ModBus TCP, oparty na sieci Ethernet, może się charakteryzować niższymi opóźnieniami z powodu szybszego medium transmisyjnego.

Opóźnienia w LonWorks zależą od typu medium transmisyjnego (np. TP/FT-10), liczby węzłów oraz sposobu realizacji komunikacji. Dokumentacja producenta podaje, że typowe opóźnienia między dwoma węzłami wynoszą 5–20 ms [78]. LonWorks to protokół zaprojektowany z myślą o automatyce budynkowej, charakteryzujący się komunikacją sterowaną zdarzeniami i elastyczną topologią sieci. Jednakże brak jest

dostępnych danych z bezpośrednich badań porównujących opóźnienia w protokole LonWorks z innymi protokołami, takimi jak ModBus.

Niezależnie od mocnych stron każdego z rozważanych rozwiązań komunikacyjnych, w literaturze brakuje wystarczających danych empirycznych, które w sposób jednoznaczny porównywałyby opóźnienia komunikacyjne między ModBus a LonWorks w zbliżonych warunkach operacyjnych. Utrudnia to precyzyjną ocenę, który z nich oferuje lepszą wydajność w kontekście czasów reakcji i deterministyczności przesyłu danych.

3.8. PODSUMOWANIE

Rozwój inteligentnych sieci ciepłowniczych (ISC) jest kluczowym kierunkiem modernizacji systemów ciepłowniczych. W literaturze podkreśla się rolę systemów SCADA w monitorowaniu i sterowaniu infrastrukturą techniczną oraz znaczenie technologii komunikacyjnych w integracji rozproszonych obiektów. Coraz większą wagę przywiązuje się także do cyberbezpieczeństwa i zabezpieczeń, takich jak szyfrowanie danych.

Inteligentne sieci ciepłownicze łączą automatyzację procesów, integrację z odnawialnymi źródłami energii oraz optymalizację zużycia energii cieplnej i elektrycznej. Rozwój ISC w Polsce systematycznie postępuje, a coraz więcej przedsiębiorstw wdraża nowoczesne technologie, w tym systemy telemetrii oraz algorytmy analizy danych.

W kontekście autonomicznych źródeł zasilania, zasilanie OFF-Grid stanowi alternatywę dla konwencjonalnych systemów elektroenergetycznych i jest szczególnie istotne dla obiektów o ograniczonym dostępie do sieci. Wykorzystanie technologii takich jak turbiny wodne napędzające generatory elektryczne, w połączeniu z magazynami energii (akumulatorami), umożliwia autonomiczne funkcjonowanie infrastruktury ciepłowniczej.

Systemy SCADA pełnią kluczową rolę w automatyzacji ciepłownictwa, umożliwiając monitorowanie i sterowanie procesami w czasie rzeczywistym, optymalizację pracy sieci oraz zapewnienie ciągłości działania systemu. Integracja SCADA ze sterownikami PLC znacząco zwiększa efektywność zarządzania i monitorowania infrastruktury.

Sterowniki PLC stanowią podstawę automatyki przemysłowej i ciepłowniczej, umożliwiając precyzyjne sterowanie procesami technologicznymi oraz integrację z nadrzędnymi systemami zarządzania. Ich rozwój jest bezpośrednio powiązany z cyfryzacją przemysłu i ideą Przemysłu 4.0.

Protokoły komunikacyjne, takie jak ModBus, LonWorks, LoRaWAN, MQTT i PROFIBUS, odgrywają istotną rolę w zarządzaniu inteligentnymi sieciami ciepłowniczymi. Wybór odpowiedniego protokołu zależy od specyfiki instalacji oraz wymagań w zakresie transmisji danych, niezawodności i skalowalności.

Wizualizacja danych w systemach SCADA znacząco ułatwia zarządzanie procesami ciepłowniczymi, zwiększając ich przejrzystość i umożliwiając szybsze podejmowanie decyzji operacyjnych.

Podsumowując, literatura przedmiotu wskazuje, że przyszłość inteligentnych sieci ciepłowniczych opiera się na cyfryzacji, automatyzacji oraz integracji z odnawialnymi źródłami energii, co przyczyni się do zwiększenia efektywności energetycznej oraz poprawy bezpieczeństwa dostaw ciepła.

W dotychczasowych opracowaniach zagadnienia dotyczące integracji systemów zasilania OFF-Grid w obiektach ciepłowniczych oraz ich komunikacji w środowiskach rozproszonych pozostają w dużej mierze niezgłębione. Niewiele uwagi poświęcono analizie modeli komunikacyjnych uwzględniających współdziałanie pomiędzy urządzeniami wykonawczymi, sterownikami PLC, systemami SCADA oraz komunikacją między sterownikami w kontekście autonomicznych obiektów ciepłowniczych.

Chociaż dostępna literatura obejmuje wiele opracowań teoretycznych na temat protokołów komunikacyjnych i architektury systemów automatyki, brakuje badań praktycznych, które w sposób porównawczy analizowałyby skuteczność ich działania w rzeczywistych warunkach operacyjnych. W szczególności zauważalny jest brak empirycznych danych dotyczących opóźnień transmisyjnych, stabilności przesyłu danych oraz deterministyczności działania systemów w środowiskach typu OFF-Grid. W związku z tym niniejsza praca podejmuje próbę wypełnienia tej luki poprzez zaprojektowanie i przetestowanie środowiska badawczego odwzorowującego warunki pracy autonomicznych obiektów ciepłowniczych, a także porównanie efektywności dwóch popularnych protokołów komunikacyjnych – ModBus i LonWorks – pod kątem ich przydatności do zastosowania w nowoczesnych, rozproszonych systemach automatyki.

4. MIEJSKIE PRZEDSIĘBIORSTWO ENERGETYKI CIEPLNEJ W KRAKOWIE

Sieć ciepłownicza to system infrastrukturalny służący do transportu ciepła z centralnych źródeł wytwórczych (np. elektrociepłowni) do odbiorców końcowych, takich jak budynki mieszkalne, obiekty użyteczności publicznej czy zakłady przemysłowe. System ten składa się z rurociągów przesyłowych, węzłów cieplnych oraz infrastruktury sterującej i monitorującej. Jest to jeden z najbardziej efektywnych sposobów dostarczania energii cieplnej na dużą skalę, który znacząco redukuje emisję zanieczyszczeń oraz zwiększa bezpieczeństwo energetyczne.

MPEC S.A. w Krakowie zarządza jedną z największych i najbardziej rozwiniętych sieci ciepłowniczych w Polsce. Obejmuje ona:

- Ponad 890 km sieci przesyłowej, co czyni ją jedną z najdłuższych w kraju.
- Ponad 10 400 węzłów cieplnych, które umożliwiają dostosowanie parametrów ciepła do potrzeb odbiorców.
- Źródła ciepła, w tym elektrociepłownie, które dostarczają ciepło w kogeneracji, czyli w procesie jednoczesnego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej, co zwiększa efektywność systemu.
- Nowoczesne systemy monitoringu i sterowania, pozwalające na optymalizację dostaw ciepła w czasie rzeczywistym, co zwiększa efektywność energetyczną i minimalizuje straty przesyłowe.

Rola sieci ciepłowniczej w nowoczesnym systemie ogrzewania:

A. Ekologia i redukcja emisji

   Dzięki ciepłu systemowemu ograniczana jest emisja szkodliwych substancji, takich jak pyły, tlenki siarki i azotu oraz CO_2, w porównaniu do indywidualnych pieców na paliwa stałe. Kraków od wielu lat walczy z problemem smogu, a rozwój sieci ciepłowniczej przyczynia się do poprawy jakości powietrza.

B. Efektywność energetyczna

   Centralne źródła ciepła pracują z wyższą sprawnością niż indywidualne systemy grzewcze, co zmniejsza zużycie paliwa i koszty eksploatacji. Wykorzystanie kogeneracji pozwala na jednoczesną produkcję ciepła i energii elektrycznej, co zwiększa efektywność systemu.

C. Bezpieczeństwo i niezawodność

Dzięki monitoringowi i automatyzacji dostawy ciepła są stabilne, a awarie mogą być szybko diagnozowane i usuwane. Sieć jest systematycznie modernizowana, co ogranicza straty ciepła i zwiększa jej trwałość.

D. Komfort użytkowania

Korzystanie z miejskiej sieci ciepłowniczej eliminuje konieczność indywidualnej obsługi kotłów i pieców, zapewniając mieszkańcom wygodę i bezobsługowe ogrzewanie. Wysoka automatyzacja umożliwia dynamiczne dostosowanie dostaw ciepła do warunków pogodowych i potrzeb użytkowników.

MPEC Kraków regularnie inwestuje w rozbudowę i modernizację sieci ciepłowniczej, obejmującą:

- Zastępowanie przestarzałych rurociągów nowoczesnymi rurami preizolowanymi, które minimalizują straty ciepła.
- Budowę nowych odcinków sieci, umożliwiających podłączanie kolejnych budynków i dzielnic.
- Integrację sieci z odnawialnymi źródłami energii (OZE), takimi jak energia geotermalna i pompy ciepła, co zwiększa ekologiczność systemu.

Sieć ciepłownicza MPEC Kraków odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu zrównoważonego i efektywnego ogrzewania miasta. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii, system ten pozwala na redukcję emisji zanieczyszczeń, poprawę komfortu mieszkańców i obniżenie kosztów eksploatacyjnych. Rozwój miejskiego ciepłownictwa jest jednym z fundamentów polityki energetycznej Krakowa, zmierzającej w kierunku niskoemisyjnej i ekologicznej przyszłości.

4.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA SIECI CIEPŁOWNICZYCH

Sieć ciepłownicza to zespół urządzeń i obiektów technicznych współpracujących ze sobą w celu dostarczenia ciepła do odbiorców. Ciepło to może być wykorzystywane do ogrzewania pomieszczeń, podgrzewania wody użytkowej oraz realizacji procesów technologicznych w przemyśle. System ciepłowniczy musi spełniać określone normy i przepisy dotyczące efektywności energetycznej oraz ochrony środowiska [8], [11], [73].

Podstawowymi elementami systemu ciepłowniczego są:

- źródło ciepła,
- sieć ciepłownicza,
- węzły cieplne,
- instalacje odbiorcze.

Źródło ciepła to jednostka produkująca ciepło poprzez spalanie paliw (węgiel, gaz, biomasa) lub wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, takich jak pompy ciepła czy energia geotermalna. Ciepło wytwarzane jest w elektrociepłowniach, ciepłowniach lub kotłowniach lokalnych, skąd przekazywane jest do sieci ciepłowniczej.

Sieć ciepłownicza to system rurociągów, który transportuje czynnik grzewczy (wodę lub parę wodną) od źródła ciepła do odbiorców. Sieci te dzieli się na sieci magistralne, rozdzielcze i przyłącza do budynków. Rurociągi mogą być prowadzone naziemnie, podziemnie lub w kanałach technicznych. Nowoczesne sieci ciepłownicze wykorzystują preizolowane rury, które zmniejszają straty ciepła i poprawiają efektywność przesyłu.

Węzły cieplne to instalacje pośredniczące między siecią ciepłowniczą a instalacjami odbiorczymi w budynkach. Ich zadaniem jest regulacja temperatury i ciśnienia czynnika grzewczego oraz dostosowanie parametrów ciepła do potrzeb odbiorców. W nowoczesnych systemach stosuje się węzły kompaktowe, które zajmują mniej miejsca i są bardziej energooszczędne.

Proces przesyłu ciepła odbywa się pod stałą kontrolą parametrów pracy sieci, takich jak temperatura, ciśnienie i przepływ czynnika grzewczego. Regularne kontrole i modernizacje są kluczowe dla zapewnienia niezawodności dostaw ciepła oraz minimalizacji strat energii.

Ponadto, w ramach monitorowania efektywności systemu, przeprowadza się okresowe pomiary parametrów sieci oraz badania termowizyjne w celu wykrycia potencjalnych wycieków lub uszkodzeń izolacji cieplnej. Modernizacja sieci oraz wprowadzanie inteligentnych systemów zarządzania pozwala na poprawę efektywności energetycznej i obniżenie kosztów eksploatacyjnych.

4.2. SIECI CIEPŁOWNICZE – PRZEBIEG PROCESU DYSTRYBUCJI CIEPŁA

Pierwsze systemy ciepłownicze powstały w XIX wieku, a ich rozwój związany był z rewolucją przemysłową i rosnącym zapotrzebowaniem na ciepło. Jednym

z pierwszych zastosowań zorganizowanego systemu ciepłowniczego było ogrzewanie budynków publicznych i fabryk za pomocą pary wodnej. Współczesne systemy ciepłownicze opierają się na transporcie gorącej wody lub pary za pośrednictwem sieci rurociągów do odbiorców.

Obecnie transport oraz dystrybucja ciepła odbywa się poprzez rozbudowane systemy ciepłownicze, które składają się z magistrali ciepłowniczych, sieci rozdzielczych oraz przyłączy budynkowych. Przepływ ciepła regulowany jest poprzez odpowiednie ciśnienie i temperaturę czynnika grzewczego, które są monitorowane i kontrolowane za pomocą nowoczesnych systemów automatyki .

Systemy ciepłownicze są projektowane w taki sposób, aby zapewnić niezawodność dostaw oraz efektywność energetyczną. Współczesne sieci ciepłownicze charakteryzują się zastosowaniem preizolowanych rur, które minimalizują straty ciepła oraz poprawiają efektywność całego systemu. W celu optymalizacji zużycia energii wprowadza się inteligentne systemy zarządzania, które monitorują parametry sieci i dostosowują jej pracę do aktualnych potrzeb odbiorców.

Współczesne technologie oraz modernizacja sieci ciepłowniczych pozwalają na zwiększenie efektywności energetycznej oraz redukcję emisji zanieczyszczeń, co przyczynia się do poprawy ochrony środowiska i zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania na ciepło w sposób zrównoważony.

4.3. RODZAJE SIECI CIEPŁOWNICZYCH

Ze względu na rosnącą świadomość ekologiczną oraz znaczenie efektywnego zarządzania energią, każda sieć ciepłownicza powinna spełniać określone wymagania. Systemy dystrybucji ciepła powinny przede wszystkim:

- dostarczać ciepło o odpowiedniej temperaturze i ciśnieniu;
- zapewniać niezawodność dostaw dla odbiorców;
- minimalizować straty energii cieplnej w procesie transportu;
- gwarantować możliwie najniższe koszty budowy i eksploatacji.

Spełnienie powyższych wymagań jest kluczowe podczas projektowania sieci ciepłowniczych. Dobór odpowiednich materiałów, średnic przewodów oraz konfiguracji systemu wpływa na efektywność energetyczną i bezpieczeństwo

działania systemu. Ze względu na różną konfigurację przewodów wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje sieci ciepłowniczych:

A. Sieć rozgałęzieniowa (promienista)

   Sieć rozgałęzieniowa składa się z jednego głównego przewodu ciepłowniczego (magistrali), od którego odchodzą przewody o coraz mniejszych średnicach. Tego typu układ charakteryzuje się prostotą konstrukcji oraz stosunkowo niskim kosztem budowy i eksploatacji. Jednak ma on również istotne wady, takie jak niska niezawodność – awaria w jednym miejscu może skutkować całkowitym odcięciem dostaw ciepła dla danego obszaru. Ze względu na swoje cechy, sieć promienista jest stosowana głównie w małych systemach ciepłowniczych, takich jak osiedla domów jednorodzinnych czy małe miejscowości, gdzie zapotrzebowanie na ciepło jest stosunkowo niewielkie, a infrastruktura nie wymaga dużej redundancji.

B. Sieć pierścieniowa (obwodowa)

   Sieć pierścieniowa zapewnia znacznie większą niezawodność niż sieć promienista. Dzięki zamkniętemu obiegowi ciepła dostarczenie energii do jednego z węzłów może odbywać się różnymi trasami, co minimalizuje ryzyko całkowitego odcięcia ciepła w przypadku awarii jednego z przewodów. Odpowiednie rozmieszczenie zaworów odcinających umożliwia izolowanie jedynie uszkodzonej części systemu, co ogranicza konieczność wyłączenia całej sieci. Dodatkowym atutem sieci obwodowej jest stabilność parametrów cieplnych w różnych częściach systemu, co ma duże znaczenie dla odbiorców wymagających stałej temperatury dostarczanego ciepła, np. w budynkach użyteczności publicznej czy zakładach przemysłowych. Wadą tego rozwiązania są jednak wyższe koszty budowy i eksploatacji związane z koniecznością prowadzenia większej liczby przewodów ciepłowniczych.

C. Sieć mieszana

   Sieć mieszana jest połączeniem topologii rozgałęzieniowej i pierścieniowej, co pozwala na optymalizację kosztów budowy oraz zwiększenie niezawodności systemu. W praktyce oznacza to, że główne magistrale i obszary o dużym zapotrzebowaniu na ciepło (np. centra miast) wykorzystują układ pierścieniowy, natomiast w mniej zurbanizowanych rejonach stosuje się układ promienisty. Dzięki takiemu rozwiązaniu można efektywnie dostarczać ciepło do różnych stref odbiorców, uwzględniając specyfikę danego obszaru. Sieć

mieszana jest obecnie najczęściej stosowanym rozwiązaniem w nowoczesnych systemach ciepłowniczych, ponieważ pozwala na elastyczne zarządzanie dystrybucją ciepła przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów.

4.4. SPOSOBY WYKRYWANIA I NAPRAWY AWARII

Uszkodzenia przewodów w sieciach ciepłowniczych mogą prowadzić do strat energii oraz zakłóceń w dostawie ciepła. Miejsce wycieku często nie jest bezpośrednio widoczne, ponieważ woda lub para mogą przedostawać się na powierzchnię w znacznej odległości od miejsca awarii.

Do wykrywania i lokalizacji wycieków stosuje się różne metody, takie jak:

- Termowizja – wykorzystuje kamery termowizyjne do identyfikacji nieszczelności na podstawie różnic temperatur.
- Metody akustyczne – nasłuchiwanie dźwięków generowanych przez wyciek ciepłej wody za pomocą mikrofonów sejsmicznych.
- Systemy monitorowania ciśnienia – umożliwiają wykrywanie nagłych spadków ciśnienia, co może wskazywać na miejsce awarii.

Współczesne sieci ciepłownicze będą coraz częściej wyposażane w inteligentne systemy monitorowania, które będą analizować dane w czasie rzeczywistym i umożliwią szybką reakcję na wykryte nieprawidłowości. Dzięki temu będzie można minimalizować straty ciepła oraz zwiększać niezawodność dostaw do odbiorców.

5. TECHNOLOGIE I SYSTEMY AUTOMATYKI W CIEPŁOWNICTWIE

Automatyzacja w ciepłownictwie odgrywa kluczową rolę w poprawie efektywności zarządzania procesami wytwarzania, dystrybucji i użytkowania energii cieplnej. Nowoczesne technologie umożliwiają precyzyjną kontrolę parametrów pracy systemów ciepłowniczych, optymalizację zużycia energii oraz zdalne monitorowanie infrastruktury. W tym celu wykorzystuje się różne systemy automatyki, oparte na standardowych protokołach komunikacyjnych i zaawansowanych rozwiązaniach sieciowych.

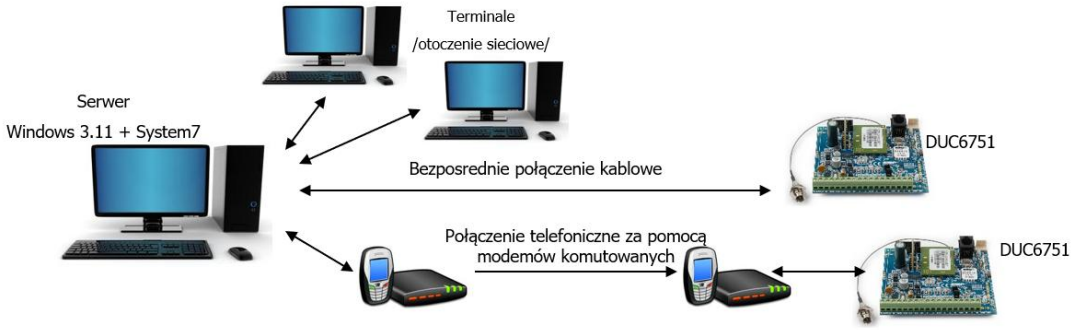
5.1. STOSOWANE DO TEJ PORY METODY TRANSMISJI DANYCH

Intensywny rozwój infrastruktury komunikacyjnej i sieciowej przyczynił się do rozbudowy systemów automatyki przemysłowej, transmisji danych oraz integracji nowych technologii w Miejskim Przedsiębiorstwie Energetyki Cieplnej S.A. w Krakowie w latach 1995–2015.

W całym okresie rozwoju systemu stosowano różne metody komunikacji pomiędzy urządzeniami, dostosowane do ówczesnych technologii i potrzeb automatyki przemysłowej. Sieć stopniowo ewoluowała od prostych połączeń kablowych po zaawansowane rozwiązania łączące systemy sterowania, monitoring i analitykę danych.

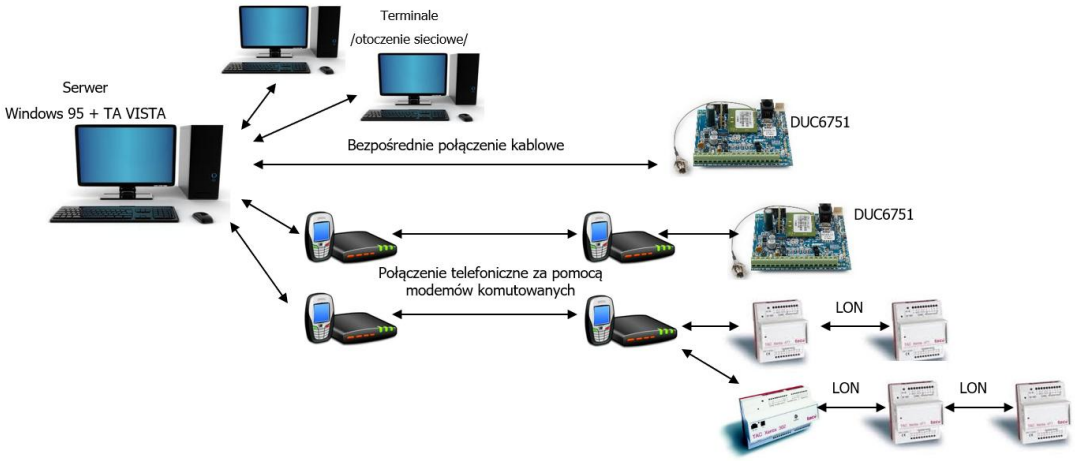
Poniżej przedstawiono opis komunikacji pomiędzy urządzeniami oraz jej funkcjonalność na poszczególnych etapach ewolucji systemu monitoringu i sterowania sieci ciepłowniczej. Na początku system (rys. 5.1.) opierał się na bezpośrednich połączeniach kablowych pomiędzy terminalami a serwerem. Terminale pełniły funkcję urządzeń użytkownika, a serwer zarządzał dostępem do zasobów oraz aplikacji. Komunikacja ta pozwalała na podstawowe operacje sterowania i monitorowania, ale była ograniczona zasięgiem i wymagała fizycznej infrastruktury. Alternatywnie stosowano modemy komutowane do przesyłania danych na odległość. Modemy umożliwiały komunikację między serwerem centralnym a oddalonymi jednostkami, ale była to metoda o niskiej przepustowości i wysokich opóźnieniach.

Wykorzystywano systemy Windows 3.11 i System7, które obsługiwały podstawowe funkcje sieciowe i zarządzanie zasobami.



Rys. 5.1. Rok 1995 – Podstawowa sieć przewodowa i komunikacja modemowa [83]

W roku 1998 do systemu (rys. 5.2.) wprowadzono sieć LON (Local Operating Network), która umożliwiła bardziej zaawansowaną komunikację między urządzeniami automatyki przemysłowej. LON wykorzystywał zdecentralizowaną architekturę, w której urządzenia (np. sterowniki, czujniki, siłowniki) mogły komunikować się bezpośrednio między sobą, zamiast polegać na centralnym serwerze. Terminale nadal łączyły się z serwerem za pomocą połączeń kablowych, ale dodano możliwość komunikacji poprzez LON, co znacząco poprawiło wydajność systemu i pozwoliło na łatwiejszą rozbudowę infrastruktury sterowania.

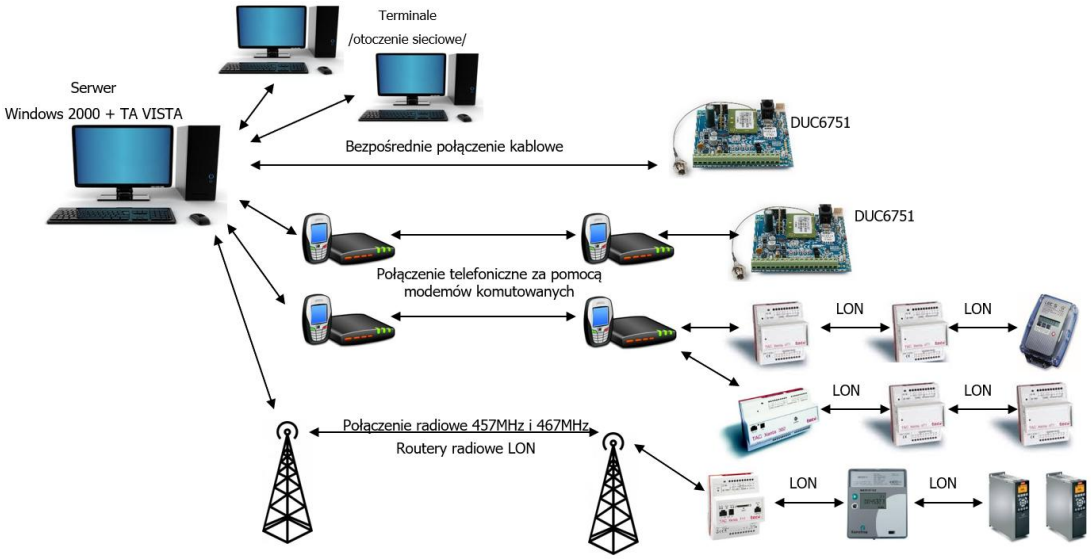


Rys. 5.2. Rok 1998 – Integracja LON i poprawa infrastruktury sieciowej [83]

Nowością w 2000r. (rys. 5.3.) było wprowadzenie połączeń radiowych na częstotliwościach 457 MHz i 467 MHz, co pozwoliło na bezprzewodową transmisję danych pomiędzy jednostkami sterującymi i serwerem. Routery radiowe LON

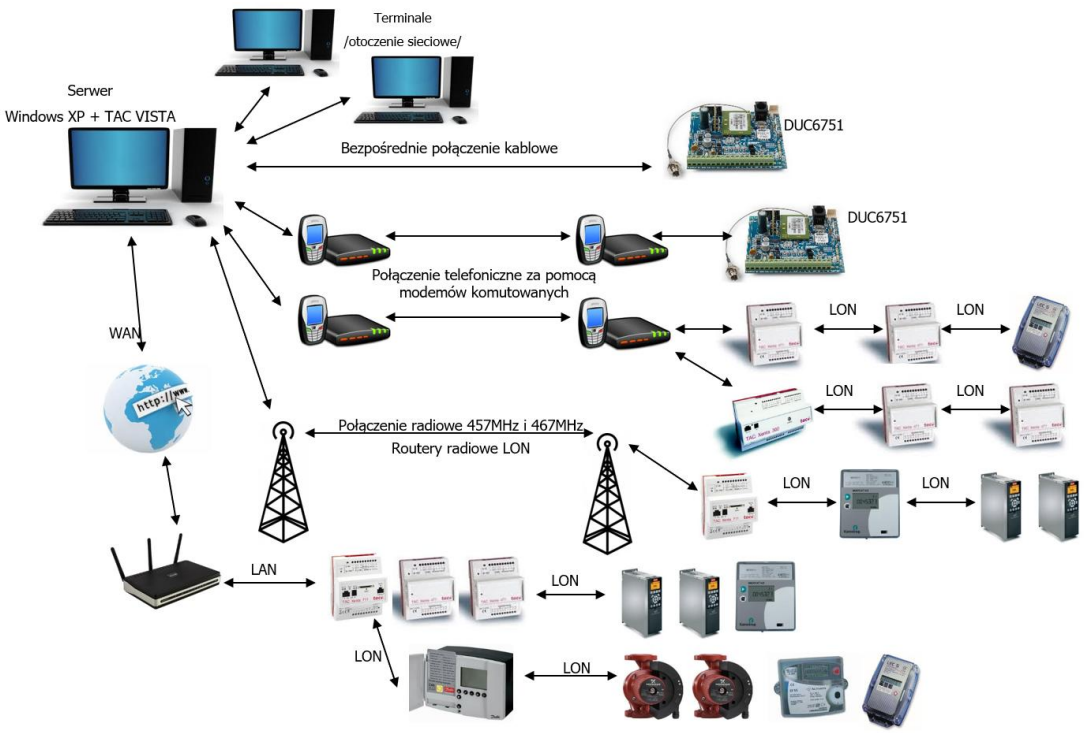
umożliwiły komunikację na większe odległości bez konieczności rozbudowy okablowania, co było kluczowe w zastosowaniach przemysłowych.

Terminale nadal mogły korzystać z połączeń kablowych, ale dane z oddalonych czujników i sterowników mogły być przesyłane radiowo, co zmniejszyło koszty instalacji i poprawiło niezawodność systemu. Wprowadzenie systemu Windows 2000 zwiększyło stabilność i bezpieczeństwo transmisji danych dzięki obsłudze bardziej zaawansowanych protokołów sieciowych.



Rys. 5.3. Rok 2000 – Komunikacja radiowa i decentralizacja systemu [83]

Sieć stała się bardziej rozproszona, a połączenia WAN (Wide Area Network) umożliwiły komunikację między oddalonymi obiektami (rys. 5.4.), np. zakładami produkcyjnymi i serwerami centralnymi. WAN pozwolił na monitorowanie i sterowanie systemami z większej odległości, integrując je w jeden spójny ekosystem. Jednocześnie sieć lokalna LAN (Local Area Network) została usprawniona, co pozwoliło na szybszą i bardziej niezawodną komunikację między terminalami, serwerem i urządzeniami sterującymi. LON nadal funkcjonował jako warstwa komunikacyjna dla systemów automatyki, ale był uzupełniony o nowe metody transmisji.

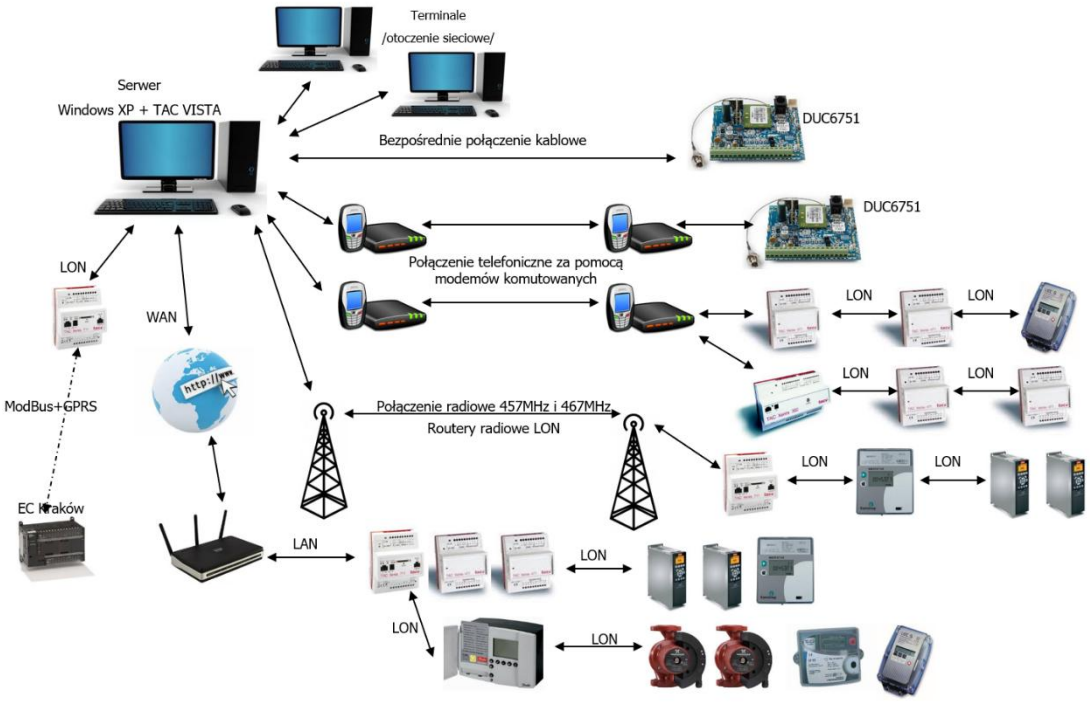


Rys. 5.4. Rok 2005 – Wprowadzenie WAN i rozbudowa sieci LAN [83]

Dodanie obsługi ModBus+GPRS (rys. 5.5.) stanowiło znaczący krok w kierunku mobilnej i rozproszonej komunikacji.

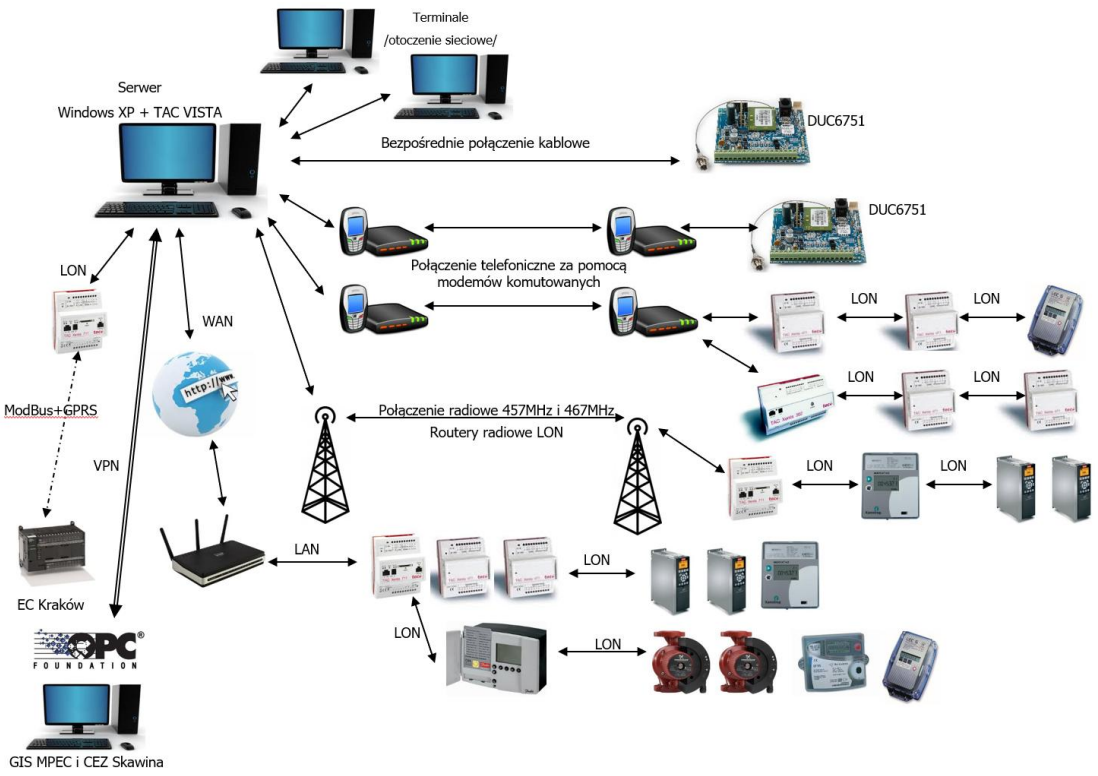
- ModBus to protokół komunikacyjny szeroko stosowany w automatyce przemysłowej, umożliwiający wymianę danych pomiędzy sterownikami PLC, licznikami energii i innymi urządzeniami pomiarowymi.
- GPRS (General Packet Radio Service) pozwolił na wykorzystanie sieci komórkowych do przesyłania danych telemetrycznych, co było szczególnie przydatne w przypadku odległych lokalizacji, gdzie brakowało infrastruktury kablowej lub radiowej.

EC Kraków zostało włączone do systemu i mogło być monitorowane oraz sterowane zdalnie dzięki integracji z WAN i GPRS. W ten sposób poprawiono efektywność operacyjną i umożliwiono automatyczne zbieranie danych z różnych punktów systemu.



Rys. 5.5. Rok 2008 – Integracja ModBus i GPRS [83]

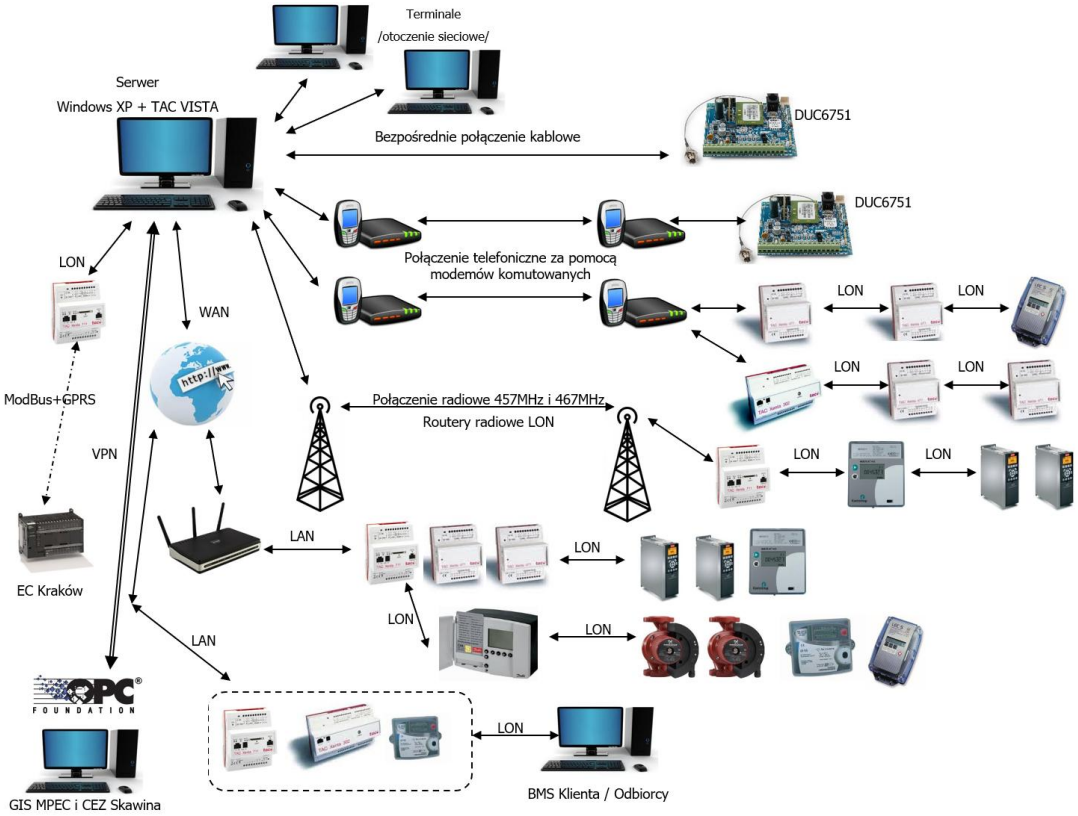
Rozbudowa systemu o GIS (System Informacji Geograficznej) MPEC i CEZ Skawina (rys. 5.6.) pozwoliła na wdrożenie systemów geoinformacyjnych, umożliwiających wizualizację i zarządzanie siecią ciepłowniczą oraz infrastrukturą energetyczną. Wprowadzenie VPN (Virtual Private Network) zwiększyło bezpieczeństwo transmisji danych, umożliwiając szyfrowane połączenia pomiędzy oddalonymi lokalizacjami. Dzięki temu operatorzy mogli bezpiecznie monitorować i sterować systemami zdalnie, bez ryzyka przechwycenia danych.



Rys. 5.6. Rok 2010 – GIS i VPN dla bezpiecznej komunikacji [83]

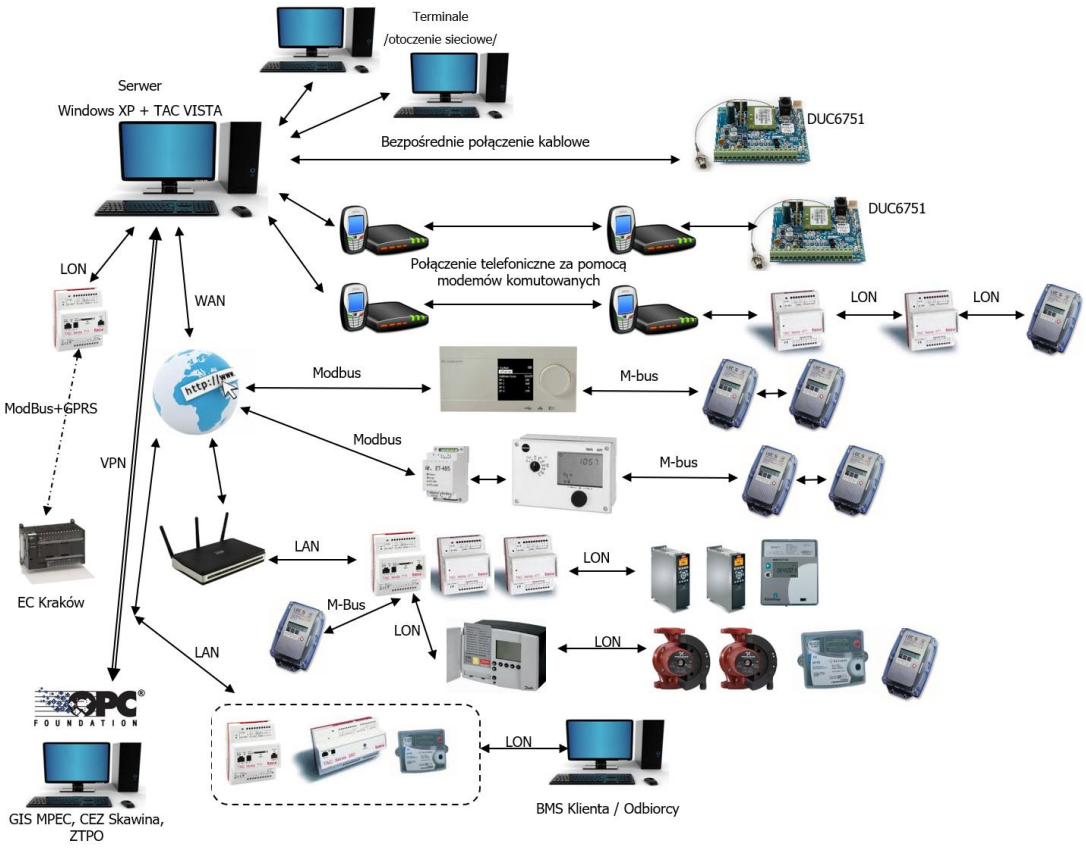
System został rozszerzony o BMS Klienta/Odbiorcy (Building Management System) (rys. 5.7.), co pozwoliło na zaawansowane zarządzanie budynkami i optymalizację zużycia energii. BMS zbierał dane z czujników i systemów sterowania, umożliwiając dynamiczne dostosowywanie parametrów takich jak ogrzewanie, wentylacja czy zużycie wody w zależności od rzeczywistych potrzeb.

Dzięki integracji z siecią WAN, VPN i LON, operatorzy mogli zdalnie monitorować budynki i podejmować decyzje na podstawie rzeczywistych danych, co prowadziło do oszczędności energii i lepszego zarządzania zasobami.



Rys. 5.7. Rok 2011 – Integracja z BMS Klienta/Odbiorcy [83]

Ostateczna modernizacja systemu (rys. 5.8.) objęła wprowadzenie M-Bus (Meter-Bus), czyli protokołu do komunikacji z licznikami energii, wodomierzami i innymi urządzeniami pomiarowymi. M-Bus umożliwił zbieranie danych w sposób bardziej efektywny i precyzyjny, co było kluczowe w monitorowaniu zużycia mediów w różnych lokalizacjach. Dodatkowo rozbudowano ModBus o kolejne implementacje, co pozwoliło na łatwiejszą integrację z urządzeniami różnych producentów. System obejmował również ZTPO (Zakład Termicznego Przekształcania Odpadów), co wymagało dostosowania komunikacji do nowych warunków operacyjnych.



Rys. 5.8. Rok 2015 – Wdrożenie M-Bus i rozszerzenie ModBus [83]

W całym okresie rozwoju system przeszedł transformację od prostych połączeń kablowych i modemowych do zaawansowanej, wielowarstwowej sieci integrującej różne technologie transmisji danych. Każda z metod komunikacji pełniła określoną funkcję:

- Połączenia kablowe – zapewniały niezawodność i niskie opóźnienia.
- Modemy komutowane i GPRS – umożliwiały transmisję danych na odległość.
- LON i sieć radiowa – decentralizowały system i redukowały potrzebę stosowania okablowania.
- VPN i WAN – poprawiły bezpieczeństwo i integrację różnych lokalizacji.
- ModBus i M-Bus – ułatwiły interoperacyjność urządzeń przemysłowych i automatyki budynkowej.

Wszystkie te technologie wspólnie przyczyniły się do powstania nowoczesnego, skalowalnego systemu zarządzania infrastrukturą przemysłową i energetyczną.

Warto podkreślić, że wraz z rozwojem systemu komunikacja ewoluowała od prostej, jednowarstwowej architektury do bardziej złożonego, wielopoziomowego modelu. Można wyróżnić kilka warstw:

- Warstwa fizyczna – obejmuje okablowanie, transmisję radiową, modemy i urządzenia sieciowe (routery, przełączniki).
- Warstwa transportowa – realizowana przez technologie LON, ModBus, M-Bus, TCP/IP, które zapewniają przesył danych między urządzeniami.
- Warstwa aplikacyjna – systemy TAC VISTA, BMS, GIS MPEC, które interpretują i zarządzają danymi przesyłanymi przez sieć. Taki model warstwowy umożliwiał skalowanie i integrację nowych technologii bez konieczności całkowitej zmiany infrastruktury.

Rozwój komunikacji i integracja systemów zarządzania miały kluczowe znaczenie dla optymalizacji zużycia energii. Dzięki komunikacji ModBus i M-Bus można było w czasie rzeczywistym monitorować i analizować zużycie energii oraz podejmować decyzje optymalizacyjne, takie jak zmniejszenie strat ciepła w sieciach ciepłowniczych czy regulacja mocy w zależności od obciążenia.

Wprowadzenie VPN i separacja poszczególnych segmentów sieci (LAN, WAN) miały istotny wpływ na bezpieczeństwo transmisji danych. Rozproszenie systemu sterowania i decentralizacja (LON, BMS) zmniejszyły ryzyko awarii krytycznych, ponieważ nawet w przypadku utraty łączności między lokalizacjami poszczególne jednostki mogły nadal funkcjonować autonomicznie.

Wszystkie te aspekty pokazują, że system przeszedł ewolucję od prostych, lokalnych połączeń do rozbudowanej sieci przemysłowej, łączącej różne technologie i umożliwiającej inteligentne zarządzanie zasobami. Można także zauważyć, że technologie stosowane w latach 2010–2015 wyznaczyły fundamenty dla dzisiejszych systemów IoT (Internet of Things) i inteligentnych sieci energetycznych (smart grids).

W roku 2015 rozpoczęto również proces wdrażania nowego systemu SCADA StruxureWare Building Operation (obecnie EcoStruxure Building Operation), stanowiącego kolejne rozwinięcie technologii nadzorowania i automatyzacji procesów w ciepłownictwie. Zmiana ta była bezpośrednio związana z zakończeniem wsparcia dla wcześniejszego systemu TAC Vista, co wynikało z dynamicznego rozwoju technologii informatycznych oraz wprowadzenia systemu operacyjnego Windows 10.

Nowoczesne wymagania dotyczące bezpieczeństwa systemów ciepłowniczych, integracji z nowymi standardami komunikacyjnymi oraz potrzeba zgodności z architekturami chmurowymi sprawiły, że TAC Vista stał się niewystarczający w obliczu nowych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i kompatybilności z nowoczesnymi systemami informatycznymi. Wdrożenie SCADA StruxureWare

Building Operation miało na celu zwiększenie efektywności zarządzania sieciami ciepłowniczymi, lepszą skalowalność oraz kompatybilność z nowoczesnymi rozwiązaniami IT. Było to kluczowe w kontekście rozwijających się systemów automatyki ciepłowniczej i optymalizacji dystrybucji ciepła.
Nowa platforma oferowała rozszerzoną funkcjonalność w zakresie monitorowania i sterowania instalacjami ciepłowniczymi, usprawnioną obsługę protokołów komunikacyjnych.

5.2. OBECNIE STOSOWANY SYSTEM SCADA ORAZ STEROWNIKI PLC

EcoStruxure Building Operation (EBO) to nowoczesna platforma zarządzania budynkami, która wprowadza szereg usprawnień i nowych technologii w porównaniu do wcześniejszego systemu TAC Vista.
Mimo że EcoStruxure Building Operation jest platformą zaprojektowaną głównie do zarządzania budynkami, jej zaawansowane funkcje monitorowania, sterowania i integracji systemów sprawiają, że może być z powodzeniem wykorzystywana również w ciepłownictwie. Dzięki obsłudze protokołów komunikacyjnych, takich jak LonWorks, ModBus i BACnet**,** system umożliwia precyzyjne zarządzanie siecią ciepłowniczą, optymalizację pracy węzłów cieplnych oraz automatyzację procesów dystrybucji ciepła.
Poniżej przedstawiam kluczowe różnice i nowe funkcje pomiędzy EcoStruxure Building Operation a TAC Vista:

A. Nowe komponenty sprzętowe: EBO wprowadza zaawansowane urządzenia, takie jak SmartX Controller - AS-P, które zastępują starsze urządzenia z serii TAC Xenta. Nowe kontrolery oferują większą wydajność i elastyczność w zarządzaniu systemami.
B. Wsparcie dla protokołu BACnet: EBO posiada natywną obsługę protokołu BACnet, co umożliwia łatwiejszą integrację z różnorodnymi urządzeniami i systemami innych producentów. W TAC Vista wsparcie dla BACnet było ograniczone i wymagało dodatkowych konfiguracji.
C. Aplikacje mobilne: EBO oferuje dedykowane aplikacje mobilne, które umożliwiają zdalny dostęp do systemu, monitorowanie i sterowanie

urządzeniami w czasie rzeczywistym. TAC Vista nie posiadał takiej funkcjonalności, co ograniczało mobilność użytkowników.

D. Integracja z IoT: EBO jest platformą otwartą, skalowalną i bezpieczną, zaprojektowaną do współpracy z urządzeniami Internetu Rzeczy (IoT). Umożliwia to zbieranie i analizowanie danych z różnych czujników i urządzeń, co prowadzi do optymalizacji zużycia energii i lepszego zarządzania budynkiem.
E. Narzędzia do konwersji: Dla użytkowników przenoszących się z TAC Vista do EBO dostępne jest narzędzie TAC Vista Conversion Tool, które ułatwia migrację danych i konfiguracji do nowego systemu. To znacznie przyspiesza proces wdrożenia EBO w istniejących instalacjach.
F. Nowoczesny interfejs użytkownika: EBO oferuje ulepszony interfejs użytkownika z bardziej intuicyjną nawigacją i lepszą wizualizacją danych, co ułatwia zarządzanie systemem i szybkie podejmowanie decyzji.

EcoStruxure Building Operation wprowadza znaczące usprawnienia w stosunku do TAC Vista, oferując nowoczesne technologie, lepszą integrację z różnymi systemami oraz zwiększoną mobilność i elastyczność dla użytkowników.

Integralną częścią platformy EcoStruxure są sterowniki PLC typu SmartX Controller to zaawansowane urządzenia firmy Schneider Electric, zaprojektowane do zarządzania systemami automatyki w ramach platformy EcoStruxure Building Operation. Wśród nich wyróżniamy modele AS-P oraz AS-B, które różnią się specyfikacją i przeznaczeniem.

- SmartX Controller AS-P:
    - Funkcjonalność: Pełni rolę centralnego serwera automatyki, obsługując logikę sterowania, rejestrowanie trendów oraz nadzór nad alarmami. Może działać jako samodzielny serwer lub w połączeniu z modułami I/O oraz urządzeniami komunikującymi się poprzez różne protokoły.
    - Komunikacja: Obsługuje protokoły takie jak BACnet/IP, BACnet MS/TP, LonWorks oraz ModBus, co umożliwia integrację z szeroką gamą urządzeń różnych producentów. Posiada wbudowany port FTT-10 dla sieci LonWorks oraz dwa porty RS-485.
    - Zastosowanie: Idealny do średnich i dużych instalacji, gdzie wymagana jest rozproszona inteligencja systemu oraz niezawodność działania.

- SmartX Controller AS-B:
    - Funkcjonalność: Kompaktowy sterownik z wbudowanym zasilaczem i uniwersalnymi wejściami/wyjściami (I/O), przeznaczony do sterowania podstawowymi instalacjami w budynkach. Może działać autonomicznie lub w ramach większego systemu.
    - Komunikacja: Obsługuje protokoły BACnet oraz ModBus, umożliwiając integrację z różnymi urządzeniami automatyki budynkowej. Wyposażony w porty Ethernet oraz RS-485.
    - Zastosowanie: Przeznaczony do małych i średnich instalacji, gdzie istotne są kompaktowe wymiary oraz ekonomiczność rozwiązania.

Oba modele zapewniają elastyczność i skalowalność w zarządzaniu instalacjami, umożliwiając efektywną integrację i optymalizację różnych systemów automatyki. Dzięki obsłudze wielu protokołów komunikacyjnych, SmartX Controllers mogą być z powodzeniem wykorzystywane również w ciepłownictwie, pozwalając na precyzyjne sterowanie i monitorowanie systemów dystrybucji ciepła.

EcoStruxure Building Operation firmy Schneider Electric obsługuje protokół LonWorks, umożliwiając integrację i zarządzanie urządzeniami wykorzystującymi ten standard komunikacji. Dzięki wbudowanej funkcjonalności LonWorks, EBO zapewnia dostęp do urządzeń zarówno Schneider Electric, jak i innych producentów. Sieci LonWorks mogą być instalowane, bindowane i konfigurowane bezpośrednio z poziomu serwera Enterprise Server lub serwera SmartX AS-P za pomocą wbudowanego narzędzia konfiguracji sieci LonWorks, bez konieczności użycia dodatkowych narzędzi firm trzecich.

Ponadto, EBO wspiera popularne standardowe protokoły komunikacyjne, takie jak BACnet, ModBus i Web Services, co umożliwia integrację z różnorodnymi systemami i urządzeniami w budynkach. Platforma oferuje również zgodność z protokołami i brokerami MQTT, co pozwala na publikowanie i subskrybowanie danych z czujników IoT, wspierając nowoczesne rozwiązania w zakresie Internetu Rzeczy.

Dzięki obsłudze protokołu LonWorks oraz innych standardów komunikacyjnych, EcoStruxure Building Operation zapewnia elastyczność i skalowalność w zarządzaniu systemami, umożliwiając efektywną integrację i optymalizację różnych systemów automatyki.

Dzięki obsłudze protokołu LonWorks oraz innych standardów komunikacyjnych, EcoStruxure Building Operation zapewnia elastyczność i skalowalność w zarządzaniu infrastrukturą ciepłowniczą, umożliwiając efektywną integrację i optymalizację różnych systemów automatyki ciepłowniczej.

Wprowadzenie nowego systemu SCADA nie wymusza wymiany wszystkich wcześniej zamontowanych sterowników. W większości przypadków wystarczy zastąpienie jednostki głównej, natomiast istniejące moduły wejść/wyjść (I/O) oraz inne urządzenia peryferyjne mogą pozostać w użyciu. Dzięki kompatybilności nowoczesnych systemów SCADA z wieloma standardami komunikacyjnymi, możliwa jest płynna migracja i stopniowa modernizacja infrastruktury bez konieczności pełnej wymiany sprzętu. W naszym systemie pomiędzy nową jednostką główną AS-P a modułami I/O Xenta możemy wykorzystać protokół LonWorks.

Takie podejście pozwala zminimalizować koszty i skrócić czas wdrożenia nowego systemu, jednocześnie zapewniając lepszą wydajność i nowe funkcjonalności.

5.3. WYKORZYSTYWANE PROTOKOŁY KOMUNIKACYJNE

Współczesne systemy automatyki w ciepłownictwie opierają się na inteligentnych sieciach i systemach komunikacyjnych, które umożliwiają efektywne sterowanie urządzeniami oraz analizę parametrów pracy instalacji. W Miejskim Przedsiębiorstwie Energetyki Cieplnej S.A. w Krakowie dotychczas stosowane standardy komunikacyjne obejmują protokoły takie jak ModBus, LonWorks oraz M-bus, które zapewniają wymianę danych pomiędzy urządzeniami a sterownikami PLC. Protokoły te gwarantują wysoką niezawodność, elastyczność oraz integrację różnych urządzeń w systemach ciepłowniczych, umożliwiając skuteczne monitorowanie, sterowanie i optymalizację pracy całego systemu.

5.3.1. PROTOKÓŁ M-BUS

M-Bus (Meter-Bus) to standard komunikacyjny opracowany do zdalnego odczytu liczników energii cieplnej, gazu, wody i energii elektrycznej. Jest szeroko stosowany w systemach ciepłowniczych ze względu na niski pobór mocy, możliwość obsługi dużej liczby urządzeń oraz wysoką odporność na zakłócenia.

Cechy protokołu M-Bus:

- Przewodowa lub bezprzewodowa transmisja danych.
- Możliwość komunikacji z setkami liczników w jednej sieci.
- Zdalny odczyt i diagnostyka urządzeń.
- Niski pobór energii przez urządzenia końcowe.

5.3.2. STANDARD MODBUS

ModBus to otwarty protokół komunikacyjny wykorzystywany do wymiany danych między urządzeniami automatyki, takimi jak sterowniki PLC, liczniki ciepła czy regulatory temperatury. Jego popularność wynika z prostoty implementacji oraz szerokiego wsparcia w różnych systemach automatyki.

Zalety ModBus w ciepłownictwie:

- Prosta i skuteczna komunikacja między urządzeniami,
- Możliwość pracy w sieciach przewodowych (RS-232, RS-485, Ethernet),
- Obsługa różnych typów urządzeń w jednym systemie,
- Skalowalność i łatwa integracja z innymi technologiami.

5.3.3. SYSTEM LONWORKS

LonWorks to zaawansowany system komunikacji przeznaczony do sterowania instalacjami automatyki budynkowej i przemysłowej, w tym także ciepłownictwa. Oparty jest na zdecentralizowanej architekturze, co umożliwia niezależne działanie poszczególnych urządzeń oraz ich wzajemną wymianę danych.

Kluczowe cechy LonWorks:

- Rozproszona struktura, eliminująca konieczność centralnego sterowania.
- Obsługa różnych mediów transmisyjnych (skrętka, światłowód, sieć energetyczna).
- Możliwość integracji z innymi standardami automatyki.
- Duża odporność na awarie i elastyczność w rozbudowie systemu.

5.4. PODSUMOWANIE

Nowoczesne systemy automatyki w ciepłownictwie opierają się na zaawansowanych protokołach komunikacyjnych, umożliwiających efektywne zarządzanie procesami energetycznymi. Protokół M-Bus jest wykorzystywany głównie do zdalnego odczytu liczników, ModBus zapewnia komunikację między urządzeniami sterującymi, a LonWorks umożliwia budowę elastycznych i zdecentralizowanych sieci sterowania. Wdrożenie odpowiednich technologii pozwala na optymalizację zużycia energii, zwiększenie efektywności pracy systemów oraz redukcję kosztów eksploatacyjnych.

6. ANALIZA PORÓWNAWCZA PROTOKOŁÓW LONWORKS I MODBUS

Współczesne systemy automatyki przemysłowej oraz ciepłowniczej opierają się na zaawansowanych technologiach komunikacyjnych, które zapewniają efektywne zarządzanie, monitorowanie i sterowanie urządzeniami w czasie rzeczywistym. Wybór odpowiedniego protokołu komunikacyjnego ma kluczowe znaczenie dla tworzonego systemu sterowania i monitorowania.

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie analizy porównawczej stosowanych do tej pory w Miejskim Przedsiębiorstwie Energetyki Cieplnej S.A. w Krakowie protokołów komunikacyjnych ModBus i LonWorks. Analiza ta obejmuje porównanie funkcjonalności, skalowalności oraz elastyczności obu protokołów, a w efekcie końcowym pracy ocenę ich przydatności w tworzeniu inteligentnych sieci ciepłowniczych i przemysłowych.

Dwa popularne protokoły komunikacyjne wykorzystywane w przedsiębiorstwie to LonWorks i ModBus. Każdy z nich posiada unikalne cechy, zalety oraz ograniczenia, które wpływają na ich zastosowanie w różnych systemach

LonWorks to technologia oparta na rozproszonej sieci, która zapewnia wysoką interoperacyjność i elastyczność w integracji różnych urządzeń, co czyni ją szczególnie przydatną w złożonych systemach automatyki budowlanej i przemysłowej. Z kolei ModBus to jeden z najstarszych i najczęściej stosowanych protokołów komunikacyjnych w automatyce, charakteryzujący się prostotą implementacji i szeroką kompatybilnością z urządzeniami sterującymi.

Porównanie tych dwóch standardów pozwoli określić, który z nich lepiej spełnia wymagania nowoczesnych systemów sterowania i zarządzania siecią ciepłowniczą oraz w jaki sposób może przyczynić się do poprawy efektywności, niezawodności i bezpieczeństwa sieci ciepłowniczych.

6.2. TECHNOLOGIA LONWORKS

Technologia LonWorks, oparta na standardzie LON, powstała na przełomie lat 80. i 90. XX wieku w Stanach Zjednoczonych. Została opracowana przez firmę Echelon, założoną przez Motorolę i Toshibę, w celu stworzenia kompleksowego rozwiązania

dla otwartych, rozproszonych systemów automatyki. Jej głównym założeniem była standaryzacja komunikacji pomiędzy elementami systemów sterowania budynkowego, często pochodzącymi od różnych producentów.

Koncepcja LonWorks opiera się na trzech kluczowych zasadach:

- Systemy automatyki, niezależnie od miejsca ich zastosowania, mają wiele wspólnych wymagań.
- Sieć komunikacyjna zapewnia większą elastyczność i wszechstronność systemu sterowania niż tradycyjne, izolowane układy, a także umożliwia łatwą rozbudowę.
- W długim okresie eksploatacji koszty utrzymania systemu opartego na sieci automatyki są niższe niż w przypadku tradycyjnych rozwiązań.

LonWorks umożliwia pełną integrację urządzeń w ramach jednej sieci automatycznego sterowania, łączącej systemy elektroniczne i teleinformatyczne. Struktura tej sieci przypomina popularne sieci komputerowe LAN, jednak została zoptymalizowana pod kątem automatyki budynkowej i przemysłowej.

Podstawowym elementem sieci LonWorks są węzły komunikacyjne, połączone za pomocą różnych mediów transmisyjnych dostępnych w standardzie. Wymiana danych odbywa się przy użyciu specjalnie opracowanego protokołu LonTalk, który zapewnia niezawodność i efektywność komunikacji w rozproszonych systemach automatyki.

6.2.1. ARCHITEKTURA SIECI LONWORKS I ŚRODOWISKO PROGRAMISTYCZNE

Węzeł sieci LonWorks to inteligentne urządzenie, które może pełnić funkcję czujnika, urządzenia wykonawczego lub sterownika. Każdy węzeł składa się z kilku kluczowych komponentów: transceivera, specjalizowanego układu Neuron-Chip oraz modułów wejścia/wyjścia (I/O) [76].

Najważniejszym elementem każdego węzła sieci LonWorks jest układ Neuron-Chip, który pełni funkcję mikrokontrolera i zarządza komunikacją w sieci. Struktura wewnętrzna układu obejmuje jednostki przetwarzające [75]:

Trzy dedykowane jednostki przetwarzające:

- Procesor dostępu do medium transmisyjnego (MAC), który obsługuje fizyczną warstwę komunikacji i algorytmy wykrywania kolizji.

  - Procesor sieciowy (NP) odpowiedzialny za zarządzanie adresacją, przetwarzanie danych oraz funkcje routera.
  - Procesor aplikacji (AP), który wykonuje program użytkownika i zarządza procesami węzła.
- Moduły pamięci:
  - EEPROM (512B/2KB) do przechowywania programu użytkownika oraz konfiguracji.
  - RAM (2KB/1KB) wykorzystywana do przechowywania danych tymczasowych.
- Interfejsy komunikacyjne i wejścia/wyjścia:
  - Blok I/O umożliwiający podłączenie czujników i urządzeń wykonawczych.
  - Port komunikacyjny zapewniający transmisję danych w sieci.

W celu ułatwienia wymiany danych pomiędzy urządzeniami w sieciach LonWorks stosowane są Standardowe Typy Zmiennych Sieciowych (SNVT - Standard Network Variable Types). Są to predefiniowane struktury danych, które umożliwiają kompatybilność między urządzeniami różnych producentów, redukując konieczność konwersji formatów danych.

Przykładowe typy zmiennych SNVT:

- SNVT_temp – wartość temperatury
- SNVT_amp – informacja o wartości prądu
- SNVT_freq_hz – aktualna częstotliwość, mierzona w Hz
- SNVT_volt – wartość napięcia

Każda zmienna sieciowa jest oznaczona prefiksem określającym jej typ [81]:

- nvi – zmienna sieciowa wejściowa (RAM)
- nvo – zmienna sieciowa wyjściowa (RAM)
- nci – zmienna konfiguracyjna (EEPROM)
- nro – zmienna sieciowa wyjściowa (ROM)

Podczas konfiguracji sieci należy łączyć zmienne tego samego typu, aby zapewnić poprawną wymianę danych.

Do tworzenia aplikacji dla układów Neuron-Chip wykorzystywany jest język Neuron C, który stanowi zoptymalizowaną wersję ANSI C, dostosowaną do potrzeb rozproszonych systemów sterowania [79]. Neuron C oferuje:

- Obsługę zmiennych sieciowych SNVT (Standard Network Variable Types), które upraszczają wymianę danych.
- Standardowe typy zmiennych sieciowych, umożliwiające współpracę urządzeń różnych producentów.
- Mechanizmy obsługi zdarzeń, pozwalające na reagowanie na zmiany w sieci w czasie rzeczywistym.
- Rozbudowany interfejs zarządzania układami wejścia/wyjścia oraz timerami.

Programowanie i konfiguracja sieci LonWorks odbywa się przy użyciu specjalistycznych narzędzi, takich jak:

- NodeBuilder Development Tool – umożliwia projektowanie i testowanie aplikacji dla pojedynczych węzłów.
- LonMaker Integration Tool – pozwala na wizualne projektowanie i konfigurację całej sieci LonWorks.
- LNS DDE Server – służy do monitorowania i zarządzania urządzeniami w sieci, umożliwiając odczyt i zmianę wartości zmiennych sieciowych.

Dzięki elastyczności i wysokiej interoperacyjności technologii LonWorks, możliwe jest tworzenie zaawansowanych, skalowalnych systemów automatyki budynkowej oraz przemysłowej. Zastosowanie standardowych zmiennych SNVT umożliwia integrację różnych urządzeń, zapewniając efektywne sterowanie i łatwość rozbudowy systemów w przyszłości.

6.2.2. MEDIA TRANSMISYJNE W SYSTEMIE LONWORKS

Technologia LonWorks oferuje szeroki wybór mediów transmisyjnych, umożliwiających efektywne połączenie urządzeń w sieci sterowania. Wybór odpowiedniego medium powinien być dostosowany do specyfiki danej instalacji, uwzględniając m.in. warunki panujące na obiekcie, wpływ urządzeń elektrycznych i teleinformatycznych oraz możliwość przyszłej rozbudowy systemu.

Najczęściej stosowane media transmisyjne to [77]:

Para skręcona przewodów – najpopularniejsze rozwiązanie, zapewniające prędkość transmisji od 78 kbps do 1,25 Mbps. W zależności od topologii sieci (free lub bus) maksymalna odległość między urządzeniami wynosi od 320 do 750 m. W przypadku

topologii bus konieczne jest stosowanie terminatorów eliminujących odbicia sygnału, natomiast topologia free oferuje większą elastyczność i łatwość rozbudowy.

- Para skręcona przewodów z zasilaniem – rozszerzona wersja standardowej pary skręconej, umożliwiająca zarówno transmisję danych, jak i zasilanie urządzeń. Transmisja osiąga prędkość 78 kbps, a topologia free pozwala na podłączenie do 128 urządzeń w jednej linii. Do obsługi tego medium stosowane są transceivery LPT-10 i LPT-11 oraz zasilacze 48 V DC.
- Przewody zasilające 230 V AC – wykorzystujące technikę modulacji częstotliwości nośnej do przesyłu danych. Osiągana prędkość wynosi ok. 4,8 kbps, lecz zastosowanie tego medium ogranicza jego podatność na zakłócenia generowane przez inne urządzenia elektryczne, co może negatywnie wpłynąć na stabilność transmisji.
- Sieć Ethernet (TCP/IP) – pozwala na integrację systemu LonWorks z istniejącymi sieciami teleinformatycznymi. Prędkość transmisji zależy od konfiguracji sieci i może wynosić od 10 Mbps do 100 Mbps, co czyni to rozwiązanie idealnym do łączenia odległych segmentów systemu automatyki.
- Światłowody – zapewniają wysoką odporność na zakłócenia elektromagnetyczne oraz umożliwiają przesył danych na duże odległości, jednak ich implementacja wiąże się z wyższymi kosztami.
- Łącza bezprzewodowe (radiowe, podczerwieni, ultradźwiękowe) – stosowane w specyficznych przypadkach, np. w obiektach, gdzie nie ma możliwości prowadzenia przewodów. Ich skuteczność zależy od warunków otoczenia i możliwych interferencji sygnałowych.

W praktyce najczęściej stosowanym medium transmisyjnym w systemach LonWorks jest para skręcona, zwłaszcza w lokalnych instalacjach. Przy większych odległościach często wykorzystywane są sieci Ethernet, szczególnie w połączeniach między budynkowych lub do zdalnego sterowania systemem z komputerów. Inne media stosuje się w specyficznych warunkach lub zgodnie z wymaganiami użytkownika końcowego.

6.2.3. PROTOKÓŁ KOMUNIKACYJNY LONTALK – MECHANIZMY TRANSMISJI DANYCH I SCHEMAT ADRESOWANIA

Protokół LonTalk, opracowany dla systemu LonWorks, jest integralną częścią oprogramowania wbudowanego w układy Neuron-Chip. Jego głównym zadaniem jest zapewnienie standaryzowanej komunikacji między urządzeniami w sieci bez konieczności znajomości szczegółowych adresów, funkcji czy procesu transmisji danych.

Protokół ten obsługuje usługi potwierdzania przesyłu wiadomości, priorytetyzacji oraz ograniczania czasu transmisji. Dzięki niemu możliwe jest zdalne zarządzanie siecią, zmiana parametrów, rekonfiguracja urządzeń oraz monitorowanie ich stanu.

Protokół bazuje na siedmiowarstwowym modelu ISO/OSI, co zapewnia jego elastyczność i niezależność od zastosowanego medium transmisyjnego. Warstwy protokołu spełniają następujące funkcje:

- Warstwa fizyczna (1) – odpowiada za przesył danych w postaci bitowej przez medium transmisyjne. Obsługuje różne typy złączy i modulację sygnału.
- Warstwa łącza danych (2) – zarządza dostępem do medium transmisyjnego, zapewnia kodowanie danych, wykrywanie błędów oraz unikanie kolizji pakietów.
- Warstwa sieciowa (3) – odpowiada za adresowanie i routing pakietów między urządzeniami w sieci.
- Warstwa transportowa (4) – zapewnia niezawodność transmisji, kontroluje potwierdzenie odbioru wiadomości oraz wykrywa duplikaty danych.
- Warstwa sesji (5) – definiuje dodatkowe zabezpieczenia i procedury kontrolne, takie jak autoryzacja źródła informacji oraz zdalna obsługa urządzeń.
- Warstwa prezentacji (6) – dekoduje informacje, umożliwiając ich interpretację w postaci zmiennych sieciowych lub jawnych komunikatów.
- Warstwa aplikacji (7) – zapewnia interfejs pomiędzy użytkownikiem a siecią, umożliwiając programowanie i zarządzanie urządzeniami w sieci.

Podczas adresowania w sieci LonWorks stosuje się kilka typów adresów:

- Adres fizyczny (Neuron ID) – unikalny identyfikator 48-bitowy, nadawany w procesie produkcji.
- Adres urządzenia – stosowany w konfiguracji sieciowej, składa się z identyfikatora domeny, podsieci i węzła.

- Adres grupowy – logiczne połączenie urządzeń współpracujących w sieci.
- Adres komunikacyjny – umożliwia adresowanie całych grup urządzeń w domenie.

Każdy pakiet danych transmitowany przez sieć LonWorks zawiera adres urządzenia nadawczego oraz odbiorczego, które mogą być zarówno adresami fizycznymi, urządzeń, jak i grupowymi lub programowymi/komunikacyjnymi.

Protokół LonTalk oferuje trzy podstawowe mechanizmy zabezpieczające transmisję [24]:

1. Transmisja z potwierdzeniem – odbiorca wysyła sygnał potwierdzenia odbioru wiadomości.
2. Transmisja powtarzana – wiadomość jest wielokrotnie nadawana bez oczekiwania na potwierdzenie.
3. Transmisja bez potwierdzenia – wiadomość jest nadawana jednokrotnie, co zapewnia wysoką przepustowość.

Dodatkowo stosuje się kontrolę autentyczności, gdzie odbiornik weryfikuje tożsamość nadawcy przy użyciu unikalnego klucza identyfikacyjnego.

Struktura wiadomości LonWorks: każda wiadomość przesyłana w sieci LonWorks składa się z kilku pól:

- Informacja użytkowa (1-228 bajtów)
- Pole adresowe (3-15 bajtów)
- Rodzaj zmiennej sieciowej (16 bitów)
- Format adresu i identyfikacja domeny (8 bitów)
- Pole kontrolne (8 bitów)
- Pole sprawdzające (16 bitów)

Dzięki takiej strukturze komunikacja w sieci LonWorks jest skuteczna, elastyczna i niezawodna.

6.2.4. STRUKTURA, KONFIGURACJA I ZARZĄDZANIE SIECIĄ LONWORKS – NARZĘDZIA INŻYNIERSKIE

Aby poprawnie funkcjonowała sieć automatyki w systemie LonWorks, kluczowe jest właściwe zaprogramowanie poszczególnych węzłów. Oznacza to stworzenie

dedykowanych aplikacji w języku Neuron C, które są przechowywane w pamięci EEPROM urządzeń. Kolejnym etapem jest ich fizyczne oraz logiczne (funkcjonalne) połączenie. Każdy z tych procesów wymaga odpowiednich narzędzi, zarówno sprzętowych, jak i programowych.

Technologia LonWorks stanowi kompletną platformę sprzętowo-programową, dostarczającą niezbędne narzędzia do tworzenia, testowania i zarządzania aplikacjami sieciowymi, a także do konfiguracji oraz monitorowania komunikacji w systemie sterowania [77], [80].

Podstawowe narzędzia wykorzystywane w tych procesach to:

- LonBuilder Developer’s Workbench, NodeBuilder Development Tool – programy do tworzenia i testowania aplikacji dla węzłów sieci.
    - NodeBuilder umożliwia opracowywanie aplikacji dla pojedynczych węzłów sieci LonWorks oraz ich wstępne testowanie. Jest często wykorzystywany w środowiskach szkoleniowych dla programistów Neuron C.
    - Posiada zintegrowany edytor kodu Neuron, rozszerzony o instrukcje komunikacji sieciowej i obsługę zaawansowanych urządzeń.
    - Debugger pozwala na szybkie sprawdzenie poprawności kodu, a przeglądarka zmiennych sieciowych umożliwia ich monitorowanie i konfigurację.
- LonMaker for Windows Integration Tool – narzędzie do konfiguracji, zarządzania i monitorowania sieci LonWorks.
    - LonMaker pozwala na projektowanie i logiczne łączenie węzłów sieci oraz późniejsze zarządzanie nimi.

Dzięki tym narzędziom możliwe jest skuteczne zarządzanie siecią LonWorks, zapewniając optymalizację jej działania i uproszczenie procesu konfiguracji.

6.2.5. WYKORZYSTANIE SIECI TELEINFORMATYCZNYCH W INTEGRACJI TECHNOLOGII LONWORKS

Rozwój technologii cyfrowych i systemów informatycznych wymusza ciągłe usprawnienia w zakresie sterowania oraz monitorowania systemów ciepłowniczych. Współczesne instalacje grzewcze, zarówno w budynkach użyteczności publicznej, jak

i w większych sieciach ciepłowniczych, coraz częściej wykorzystują zaawansowane systemy automatyki i komunikacji. Dzięki integracji z sieciami teleinformatycznymi oraz globalnym Internetem, oparte na protokole TCP/IP, możliwe staje się zdalne sterowanie oraz optymalizacja procesów grzewczych w czasie rzeczywistym.

Pod koniec XX wieku zaczęto dostrzegać potencjał wykorzystania sieci informatycznych jako medium transmisyjnego dla systemów automatyki ciepłowniczej. Wprowadzenie takiego podejścia umożliwiło nie tylko redukcję kosztów związanych z okablowaniem, ale także zdalny monitoring i sterowanie systemami grzewczymi. Integracja urządzeń w ramach jednej sieci pozwala na bardziej elastyczne zarządzanie ciepłem, zwiększenie efektywności energetycznej oraz poprawę komfortu użytkowników budynków. Dzięki nowoczesnym systemom sterowania możliwe jest łączenie i synchronizacja różnych podsystemów.

Firma Echelon dostarcza rozwiązania umożliwiające integrację systemów ciepłowniczych z sieciami Ethernet oraz LAN w ramach standardu LonWorks. Przykładem jest iLON 1000 Internet Server – router obsługujący zarówno protokół LonTalk, jak i IP, który umożliwia przesyłanie danych pomiędzy urządzeniami automatyki poprzez sieć TCP/IP. Urządzenie to pełni funkcję serwera sieciowego, pozwalającego operatorom na zdalne monitorowanie i kontrolowanie zmiennych systemowych LonWorks za pomocą przeglądarki internetowej. W trosce o bezpieczeństwo dostęp do systemu może być zabezpieczony hasłem, co minimalizuje ryzyko nieautoryzowanej ingerencji w pracę instalacji.

Alternatywnym rozwiązaniem jest iLON 100, który oferuje bardziej ograniczoną funkcjonalność – pozwala na dostęp do zmiennych sieciowych, ale nie umożliwia tworzenia własnych stron WWW. Jest to rozwiązanie bardziej ekonomiczne, sprawdzające się w mniej wymagających instalacjach ciepłowniczych, gdzie kluczową rolę odgrywa podstawowy monitoring i sterowanie.

Dzięki rozwojowi technologii sieciowych oraz Internetu, systemy ciepłownicze stały się bardziej inteligentne, co pozwala na ich optymalizację i efektywne zarządzanie zużyciem energii. Automatyzacja procesów grzewczych oraz integracja z nowoczesnymi systemami SCADA pozwalają na bieżące monitorowanie parametrów pracy, szybkie reagowanie na zmiany. W efekcie nowoczesne ciepłownictwo staje się bardziej ekologiczne i dostosowane do dynamicznie zmieniających się potrzeb użytkowników.

6.3. TECHNOLOGIA MODBUS

ModBus to jeden z najstarszych i najbardziej rozpowszechnionych protokołów komunikacyjnych stosowanych w automatyce przemysłowej czy też w ciepłownictwie. Został opracowany w 1979 roku przez firmę Modicon (obecnie część Schneider Electric) jako otwarty standard umożliwiający komunikację pomiędzy sterownikami PLC a innymi urządzeniami automatyki. Dzięki swojej prostocie, niezawodności oraz szerokiej kompatybilności ModBus zyskał popularność w wielu branżach, w tym w systemach zarządzania ciepłem i energią.

Podstawowe założenia protokołu ModBus obejmują:

- Uniwersalność i elastyczność – ModBus może być stosowany w różnych środowiskach przemysłowych, zarówno w systemach sterowania, jak i monitorowania parametrów pracy urządzeń.
- Łatwa implementacja – Ze względu na prostą strukturę i niewielkie wymagania sprzętowe, ModBus jest łatwy do wdrożenia w istniejące instalacje.
- Komunikacja oparta na modelu Master-Slave – System składa się z urządzenia nadrzędnego (Master), które wysyła zapytania do jednego lub kilku urządzeń podrzędnych (Slave).

Protokół ModBus występuje w kilku wariantach, dostosowanych do różnych mediów transmisyjnych:

- ModBus RTU (Remote Terminal Unit) – wykorzystuje transmisję szeregową (RS-232, RS-485) i cechuje się kompaktowym formatem danych oraz wysoką efektywnością komunikacji.
- ModBus ASCII – stosowany rzadziej, wykorzystuje kodowanie ASCII zamiast binarnego, co ułatwia diagnostykę, ale zmniejsza efektywność transmisji.
- ModBus TCP/IP – rozszerzenie protokołu ModBus, które wykorzystuje sieci Ethernet do komunikacji, co zwiększa skalowalność i umożliwia integrację z nowoczesnymi systemami automatyki.

Dzięki szerokiemu zastosowaniu i otwartej architekturze, ModBus jest powszechnie stosowany w systemach ciepłowniczych do monitorowania i sterowania urządzeniami. Jego integracja z innymi technologiami pozwala na skuteczne zarządzanie procesami.

6.3.1. ARCHITEKTURA SIECI MODBUS I ŚRODOWISKO PROGRAMISTYCZNE

Sieć oparta na ModBus składa się z urządzeń komunikujących się według modelu Master-Slave. Podstawowe elementy to:

- Master (urządzenie nadrzędne) – inicjuje komunikację i żąda danych od urządzeń podrzędnych. Może nim być sterownik PLC, komputer PC, system SCADA lub inny kontroler.
- Slave (urządzenia podrzędne) – odpowiadają na zapytania Mastera i mogą nimi być liczniki ciepła, sterowniki temperatury, czujniki przepływu czy zawory regulacyjne.
- Medium transmisyjne – w zależności od wersji ModBus, komunikacja odbywa się przez różne interfejsy, takie jak:
    - RS-232 – stosowany w prostych połączeniach punkt-punkt.
    - RS-485 – obsługuje magistralę wielopunktową, umożliwiając podłączenie do 32 urządzeń.
    - Ethernet (ModBus TCP/IP) – umożliwia przesyłanie danych w sieciach lokalnych i przez Internet.

ModBus jest protokółem komunikacyjnym, a nie językiem programowania, jednak jego integracja z systemami automatyki wymaga wykorzystania różnych środowisk i języków programowania, takich jak:

- Język drabinkowy (Ladder Logic - LD) – stosowany w sterownikach PLC do programowania logiki sterowania.
- Structured Text (ST) – język wysokiego poziomu wykorzystywany w bardziej zaawansowanych aplikacjach sterowania.
- Python, C, Java – popularne języki do implementacji ModBus w systemach SCADA, aplikacjach diagnostycznych i monitoringu.

Protokół ModBus definiuje formaty komunikatów i sposoby wymiany danych pomiędzy urządzeniami. Istnieją dwa podstawowe tryby komunikacji:

- ModBus RTU (Remote Terminal Unit) – wykorzystuje transmisję szeregową w formacie binarnym, co zapewnia wydajną wymianę danych i minimalizuje obciążenie sieci.
- ModBus ASCII – stosowany rzadziej, wykorzystuje kodowanie ASCII zamiast binarnego, co ułatwia analizę transmisji, ale zmniejsza jej efektywność.

- ModBus TCP/IP – wersja protokołu dostosowana do sieci Ethernet, umożliwiająca integrację z systemami informatycznymi i aplikacjami chmurowymi.

Struktura komunikatu ModBus składa się z następujących elementów:

- Adres urządzenia – określa, do którego Slave'a skierowane jest zapytanie.
- Kod funkcji – definiuje rodzaj operacji, np. odczyt danych, zapis parametrów, sterowanie wyjściami.
- Dane – wartości przesyłane pomiędzy urządzeniami, np. temperatura, ciśnienie, stan zaworów.
- CRC (Cyclic Redundancy Check) – suma kontrolna zapewniająca integralność danych.

Do konfiguracji i analizy sieci ModBus stosuje się różne narzędzia programowe i sprzętowe, takie jak:

- ModScan / ModSim – oprogramowanie do testowania komunikacji ModBus.
- SCADA – systemy wizualizacji i zarządzania procesami sterowania.

ModBus jest prostym i niezawodnym protokołem komunikacyjnym, który znajduje szerokie zastosowanie w automatyce przemysłowej. Dzięki różnym wariantom transmisji oraz kompatybilności z wieloma językami programowania, pozostaje jednym z najczęściej wykorzystywanych standardów w nowoczesnych systemach sterowania.

6.3.2. MEDIA TRANSMISYJNE W SYSTEMIE MODBUS

ModBus pozwala na stosowanie różnych mediów transmisyjnych, co umożliwia dostosowanie systemu do specyfiki danej instalacji.

Najczęściej stosowane standardy transmisyjne w systemie ModBus to:

- RS-232 – jedno z najstarszych i najprostszych standardów transmisyjnych. Wykorzystywane głównie w lokalnych połączeniach punkt-punkt na niewielkie odległości (do 15 m). Charakteryzuje się stosunkowo niską odpornością na zakłócenia oraz ograniczoną liczbą urządzeń podłączonych do magistrali.
- RS-485 – najbardziej rozpowszechniony standard transmisji w systemach ModBus RTU i ModBus ASCII. Umożliwia komunikację wielopunktową,

pozwalając na podłączenie do 32 urządzeń do jednej magistrali. Zapewnia większą odporność na zakłócenia niż RS-232 i umożliwia przesył danych na większe odległości (do 1200 m) przy prędkości transmisji do 10 Mbps.

- Ethernet (ModBus TCP/IP) – nowoczesne rozwiązanie, które pozwala na wykorzystanie infrastruktury sieci komputerowych do transmisji danych w systemie ModBus. Umożliwia komunikację w czasie rzeczywistym, integrację systemów automatyki z sieciami IT oraz łatwe zdalne sterowanie i monitorowanie urządzeń. Prędkość transmisji zależy od konfiguracji sieci i może wynosić od 10 Mbps do 1 Gbps.
- Światłowody – stosowane w środowiskach o wysokim poziomie zakłóceń elektromagnetycznych oraz tam, gdzie wymagane są bardzo duże odległości transmisji (kilometry). Zapewniają najwyższą odporność na zakłócenia, ale ich wdrożenie wiąże się z wyższymi kosztami.
- Łącza bezprzewodowe– stosowane w aplikacjach wymagających komunikacji bezprzewodowej, np. w rozproszonych systemach. Ich skuteczność zależy od warunków środowiskowych oraz zastosowanych zabezpieczeń transmisji.

W praktyce wybór standardu transmisyjnego w systemie ModBus zależy od wymagań aplikacji. W prostych systemach lokalnych często stosuje się magistralę RS-485, natomiast w bardziej zaawansowanych rozwiązaniach, wymagających integracji z sieciami IT lub zdalnego dostępu, stosuje się ModBus TCP/IP.

6.3.3. PROTOKÓŁ KOMUNIKACYJNY MODBUS – MECHANIZMY TRANSMISJI DANYCH I SCHEMAT ADRESOWANIA

Protokół ten bazuje na architekturze klient-serwer, gdzie jedno urządzenie nadrzędne (Master) komunikuje się z wieloma urządzeniami podrzędnymi (Slave). ModBus obsługuje różne warianty transmisji:

- ModBus RTU – transmisja szeregowa z kodowaniem binarnym, stosowana w systemach wymagających wydajnej i niezawodnej komunikacji.
- ModBus ASCII – transmisja w formacie czytelnym dla człowieka, używana w specyficznych aplikacjach.
- ModBus TCP/IP – wariant oparty na protokole internetowym, zapewniający komunikację przez sieć Ethernet.

Adresowanie w protokole ModBus: każde urządzenie Slave posiada unikalny adres w zakresie od 1 do 247. W przypadku ModBus TCP/IP stosuje się adresy IP, a identyfikacja urządzeń odbywa się na podstawie numeru jednostki (Unit ID).

Struktura ramki ModBus: każda wiadomość w protokole ModBus składa się z następujących elementów:

- Adres urządzenia (1 bajt) – określa odbiorcę komunikatu.
- Kod funkcji (1 bajt) – wskazuje typ operacji (np. odczyt/zapis danych).
- Dane (zmienna liczba bajtów) – zawiera informacje do przesłania.
- CRC (dla RTU) lub suma kontrolna (dla ASCII) (2 bajty) – zabezpieczenie integralności danych.

W przypadku ModBus TCP/IP struktura wiadomości jest rozszerzona o nagłówek MBAP (ModBus Application Protocol), który zawiera identyfikator transakcji, identyfikator protokołu oraz długość wiadomości.

Protokół ModBus nie implementuje wszystkich warstw modelu ISO/OSI, lecz koncentruje się głównie na kilku poziomach:

- Warstwa aplikacji (7) – ModBus definiuje format komunikacji, określając kody funkcji i strukturę danych.
- Warstwa transportowa (4) – w przypadku ModBus TCP/IP wykorzystuje protokół TCP, zapewniający niezawodność transmisji.
- Warstwa sieciowa (3) – w ModBus TCP/IP stosuje się adresację IP, natomiast w ModBus RTU i ASCII brak tej warstwy.
- Warstwa łącza danych (2) – w ModBus RTU i ASCII wykorzystuje transmisję szeregową (RS-232, RS-485), a w ModBus TCP/IP Ethernet.
- Warstwa fizyczna (1) – określa nośnik transmisji, np. przewody RS-485 lub Ethernet.

Protokół ModBus nie posiada wbudowanych mechanizmów zabezpieczających transmisję danych, takich jak szyfrowanie czy autoryzacja. W systemach wymagających wyższego poziomu bezpieczeństwa stosuje się dodatkowe metody, np. tunelowanie ModBus przez VPN lub użycie protokołów zabezpieczających, takich jak TLS. ModBus jest szeroko stosowany w automatyce przemysłowej dzięki swojej prostocie, elastyczności i niezawodności, co czyni go standardem w wielu aplikacjach sterowania i monitorowania.

6.3.4. STRUKTURA, KONFIGURACJA I ZARZĄDZANIE SIECIĄ MODBUS – NARZĘDZIA INŻYNIERSKIE

Aby stworzyć efektywnie działającą sieć opartą na protokole ModBus, konieczne jest odpowiednie skonfigurowanie urządzeń komunikujących się w sieci. ModBus jest jednym z najpopularniejszych protokołów komunikacyjnych stosowanych w automatyce przemysłowej i sterowaniu urządzeniami.

Protokół ModBus opiera się na architekturze master-slave (RTU i ASCII) lub client-server (ModBus TCP/IP). Urządzenie nadrzędne (Master lub Client) zarządza komunikacją i wysyła zapytania do urządzeń podrzędnych (Slave lub Server), które odpowiadają zgodnie z ustalonym formatem.

Do prawidłowej pracy sieci ModBus niezbędne są narzędzia umożliwiające tworzenie, testowanie i monitorowanie komunikacji między urządzeniami. Najważniejsze z nich to:

A. Narzędzia do konfiguracji urządzeń ModBus

- ModBus Poll – jedno z najczęściej używanych narzędzi do testowania i monitorowania komunikacji w sieci ModBus RTU/TCP. Umożliwia odczyt i zapis rejestrów urządzeń Slave oraz analizę przesyłanych danych.
- Modscan – program diagnostyczny do monitorowania transmisji ModBus oraz analizy pakietów danych w czasie rzeczywistym.
- Software producentów urządzeń – wielu producentów automatyki (np. Schneider Electric, Siemens, WAGO) oferuje dedykowane aplikacje do konfiguracji i diagnostyki urządzeń ModBus.

B. Narzędzia do analizy komunikacji w sieci ModBus

- Wireshark – zaawansowane narzędzie do przechwytywania i analizy pakietów danych, wykorzystywane głównie w sieciach ModBus TCP/IP.
- Serial Port Monitor – oprogramowanie umożliwiające analizę i rejestrowanie komunikacji ModBus RTU przesyłanej przez porty szeregowe (RS-232/RS-485).

C. Moduły sprzętowe i adaptery do komunikacji ModBus

- Konwertery USB-RS485 – pozwalają na podłączenie komputera do urządzeń ModBus RTU przez interfejs RS-485.

- Bramki ModBus RTU ↔ ModBus TCP – umożliwiają konwersję komunikacji między urządzeniami pracującymi w różnych wariantach protokołu (np. ModBus RTU i ModBus TCP).

D. Programowanie i integracja sieci ModBus

- Python (biblioteka pyModBus) – popularna biblioteka do komunikacji z urządzeniami ModBus RTU/TCP w środowisku Python.
- MATLAB ModBus Toolbox – narzędzie do testowania i sterowania urządzeniami ModBus w środowisku MATLAB.
- PLC i systemy SCADA – większość sterowników PLC i systemów SCADA (np. WinCC) ma wbudowaną obsługę protokołu ModBus, co pozwala na jego łatwą integrację z systemami sterowania.

Właściwe narzędzia pozwalają na szybką konfigurację, monitorowanie i diagnostykę sieci, co jest kluczowe dla efektywnej pracy systemu.

6.3.5. WYKORZYSTANIE SIECI TELEINFORMATYCZNYCH W INTEGRACJI TECHNOLOGII MODBUS

Dynamiczny rozwój technologii cyfrowych i systemów komunikacyjnych sprawia, że nowoczesne instalacje ciepłownicze wymagają niezawodnych, elastycznych i skalowalnych protokołów transmisji danych. Współczesne systemy zarządzania ciepłem, zarówno w budynkach użyteczności publicznej, jak i w sieciach ciepłowniczych, coraz częściej wykorzystują ModBus – jeden z najpopularniejszych otwartych protokołów komunikacyjnych stosowanych w automatyce przemysłowej.

ModBus został zaprojektowany z myślą o komunikacji pomiędzy urządzeniami sterującymi i czujnikami, umożliwiając efektywną wymianę danych w systemach automatyki ciepłowniczej. Dzięki swojej prostej implementacji i szerokiej kompatybilności, stał się standardem w systemach SCADA, sterownikach PLC oraz układach zarządzania węzłami cieplnymi i kotłowniami.

Podstawą działania ModBus jest architektura master-slave, w której jedno urządzenie nadrzędne (master) inicjuje komunikację, a urządzenia podrzędne (slave) odpowiadają na jego żądania. W systemach ciepłowniczych pozwala to na sprawną wymianę danych między czujnikami temperatury, regulatorami zaworów, licznikami energii

cieplnej oraz centralnymi jednostkami sterującymi. Istnieje kilka wersji tego protokołu, z których najczęściej stosowane to:

- ModBus RTU – oparty na transmisji szeregowej (RS-232/RS-485), charakteryzuje się binarnym formatem danych, co zapewnia wysoką wydajność i niezawodność w warunkach przemysłowych. Jest powszechnie stosowany w sterownikach automatyki ciepłowniczej.
- ModBus ASCII – przesyła dane w formacie tekstowym ASCII, co ułatwia diagnostykę, ale zmniejsza szybkość transmisji.
- ModBus TCP/IP – dostosowany do sieci Ethernet, umożliwia zdalne sterowanie i monitorowanie instalacji ciepłowniczych poprzez Internet, co pozwala na integrację systemów ciepłowniczych z infrastrukturą IT.

Coraz częściej w systemach automatyki ciepłowniczej wykorzystuje się ModBus TCP/IP, który pozwala na integrację z chmurą obliczeniową oraz systemami zarządzania energią. Dzięki temu możliwe jest zdalne monitorowanie i optymalizacja pracy urządzeń z dowolnego miejsca na świecie – wystarczy komputer, przeglądarka internetowa lub aplikacja mobilna.

Typowe urządzenia stosowane w systemach ciepłowniczych, które wykorzystują ModBus, to m.in.:

- sterowniki PLC zarządzające pracą kotłów, pomp i zaworów,
- czujniki temperatury i przepływu,
- liczniki energii cieplnej,
- zawory regulacyjne sterowane cyfrowo,
- moduły zabezpieczeń i alarmów, które reagują na nieprawidłowości w systemie.

Dzięki swojej elastyczności i niezawodności, ModBus pozostaje jednym z kluczowych standardów komunikacyjnych w automatyce ciepłowniczej.

6.4. MODEL ISO/OSI – OGÓLNE INFORMACJE

Model ISO/OSI (Open Systems Interconnection) został opracowany w latach 70. i 80. XX wieku przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO). Oficjalnie został opublikowany w 1984 roku jako standard ISO 7498.

Model ISO/OSI powstał w celu standaryzacji komunikacji w sieciach komputerowych. Wcześniej różne firmy stosowały własne, niekompatybilne rozwiązania, co utrudniało współpracę między urządzeniami różnych producentów. Model ten miał:

- Ułatwić komunikację między systemami różnych firm,
- Określić standardowe warstwy i ich funkcje w procesie przesyłania danych,
- Pomóc w projektowaniu i rozwijaniu sieci, poprzez rozdzielenie funkcji komunikacyjnych na logiczne poziomy.

Model OSI dzieli proces komunikacji na 7 warstw, co pozwala na lepsze zrozumienie i diagnozowanie problemów sieciowych. Dzięki temu:

- Można łatwo analizować i rozwiązywać problemy sieciowe,
- Firmy mogą tworzyć urządzenia i oprogramowanie zgodne ze wspólnymi standardami,
- Każda warstwa wykonuje określone zadania, co ułatwia rozwój technologii sieciowych.

7 warstw modelu ISO/OSI:

A. Warstwa fizyczna – odpowiada za przesyłanie sygnałów przez medium transmisyjne (np. kable, fale radiowe).
B. Warstwa łącza danych – zapewnia przesyłanie danych między urządzeniami i kontrolę błędów (np. Ethernet, MAC).
C. Warstwa sieciowa – odpowiada za adresowanie i trasowanie pakietów danych (np. IP).
D. Warstwa transportowa – zapewnia niezawodne połączenie i kontrolę transmisji (np. TCP, UDP).
E. Warstwa sesji – zarządza sesjami komunikacyjnymi między aplikacjami.
F. Warstwa prezentacji – konwertuje dane do formatu zrozumiałego dla aplikacji (np. kodowanie, szyfrowanie).
G. Warstwa aplikacji – umożliwia użytkownikowi korzystanie z usług sieciowych (np. HTTP, FTP, SMTP).

Model ISO/OSI to teoretyczny schemat opisujący sposób, w jaki odbywa się komunikacja w sieciach komputerowych. Składa się z siedmiu warstw, z których każda pełni określoną funkcję – od fizycznego przesyłania sygnałów aż po obsługę aplikacji. Dzięki temu modelowi można dokładnie przeanalizować, jak dane przepływają od jednego urządzenia do drugiego, jakie procesy zachodzą na każdym

etapie transmisji oraz jakie mechanizmy zapewniają poprawność i bezpieczeństwo komunikacji. Jednak w rzeczywistości najczęściej stosowanym modelem jest TCP/IP, który składa się tylko z czterech warstw. To właśnie na nim opiera się funkcjonowanie Internetu oraz większości współczesnych sieci komputerowych. Model TCP/IP, mimo że mniej szczegółowy niż OSI, został opracowany z myślą o praktycznym zastosowaniu i zapewnia skuteczną oraz wydajną komunikację pomiędzy urządzeniami w sieci. To w jego ramach działają kluczowe protokoły, takie jak IP (Internet Protocol), TCP (Transmission Control Protocol) czy HTTP (Hypertext Transfer Protocol), który umożliwia przeglądanie stron internetowych.

Mimo że model ISO/OSI nie jest bezpośrednio wdrażany w praktycznych rozwiązaniach sieciowych, nadal odgrywa istotną rolę. Jest szczególnie przydatny w nauce i analizie działania sieci komputerowych, ponieważ pozwala lepiej zrozumieć, jakie procesy zachodzą w trakcie przesyłania danych. Dzięki temu modelowi można łatwiej diagnozować problemy w sieciach, projektować nowe rozwiązania komunikacyjne oraz skutecznie integrować różne technologie.

6.4.1. PORÓWNANIE WARSTW MODELU ISO/OSI W LONWORKS I MODBUS

Protokół LonTalk w technologii LonWorks oraz protokół ModBus mają różne podejścia do modelu ISO/OSI, co wynika z ich specyfiki i obszarów zastosowań.

W tabeli 6.1. porównano warstwy modelu ISO/OSI dla LonWorks i ModBus.

Warstwa ISO/OSI	LonWorks (LonTalk)	ModBus (RTU/TCP)
7 – Aplikacji	Umożliwia programowanie i zarządzanie urządzeniami przez zmienne sieciowe SNVT.	Definiuje kody funkcji i strukturę danych.
6 – Prezentacji	Dekoduje informacje i umożliwia interpretację zmiennych sieciowych oraz komunikatów.	Brak dedykowanej warstwy – dane przesyłane są w formacie binarnym lub ASCII.
5 – Sesji	Zawiera mechanizmy autoryzacji i kontroli dostępu.	Nie jest zaimplementowana.
4 – Transportu	Zapewnia niezawodną transmisję danych oraz kontrolę retransmisji.	W ModBus TCP wykorzystuje protokół TCP/IP, w ModBus RTU brak tej warstwy.
3 – Sieciowa	Realizuje routing i adresowanie urządzeń w sieci.	W ModBus TCP stosuje się adresy IP, w ModBus RTU brak warstwy sieciowej.
2 – Łącza danych	Zarządza dostępem do medium, wykrywa błędy transmisji i unika kolizji.	Wykorzystuje standardy RS-232/RS-485 (dla RTU) lub Ethernet (dla TCP).
1 – Fizyczna	Obsługuje różne media transmisyjne: skrętka, sieć energetyczna, światłowody.	RS-232, RS-485 (RTU) oraz Ethernet (TCP).

Tabela 6.1. Porównanie warstw modelu ISO/OSI dla LonWorks i ModBus

LonWorks ma bardziej rozbudowaną strukturę warstw, co zapewnia większą elastyczność i możliwości konfiguracji sieci.

ModBus jest prostszy, co ułatwia jego implementację, ale ogranicza funkcjonalność w porównaniu do LonWorks.

W ModBus TCP wykorzystuje się standardowe protokoły warstwy transportowej i sieciowej (TCP/IP), podczas gdy ModBus RTU ogranicza się do warstw fizycznej i łącza danych.

Oba protokoły mają szerokie zastosowanie w automatyce przemysłowej, ale wybór odpowiedniego standardu zależy od wymagań konkretnego systemu.

6.5. PORÓWNANIE SYSTEMÓW LONWORKS I MODBUS

LonWorks: Protokół sieciowy opracowany przez firmę Echelon, używany głównie w systemach automatyki budynkowej i przemysłowej. Opiera się na technologii neuronowych układów (Neuron Chips) i może działać w różnych topologiach sieci.
ModBus: Starszy i prostszy protokół komunikacyjny opracowany przez firmę Modicon (Schneider Electric). Popularny w automatyce przemysłowej, bazuje na modelu master-slave i wykorzystuje różne interfejsy (np. RS-485, TCP/IP).
W tabeli 6.2. poniżej przedstawiono architekturę u sposób komunikacji technologii LonWorks i ModBus:

Cecha	LonWorks	ModBus
Model komunikacji	Peer-to-peer (każde urządzenie może komunikować się bezpośrednio)	Master-slave (jednostka nadrzędna kontroluje komunikację)
Topologia	Dowolna (magistrala, gwiazda, pierścień, drzewo)	Głównie magistrala
Obsługiwane media	Skrętka, światłowód, PLC (Power Line Communication), RF	RS-232, RS-485, Ethernet
Protokół warstwy fizycznej	LonTalk	ModBus RTU (RS-232/RS-485), ModBus TCP (Ethernet)

Tabela 6.2. Architektura i sposób komunikacji technologii LonWorks i ModBus

Szybkość i skalowalność

- LonWorks: Działa z różnymi prędkościami w zależności od medium (do 1,25 Mbps w skrętce TP/FT-10). Skalowalność jest bardzo dobra dzięki rozproszonemu modelowi.

- ModBus: Prędkość ograniczona do 115,2 kbps (dla RS-485) i do 100 Mbps (dla Ethernet). Skalowalność jest mniejsza, ponieważ każda magistrala ma ograniczoną liczbę węzłów.

Zastosowanie i elastyczność

- LonWorks: Często używany w systemach automatyki budynkowej (HVAC, oświetlenie, kontrola dostępu), inteligentnych sieciach energetycznych oraz w przemyśle.
- ModBus: Popularny w automatyce przemysłowej (PLC, SCADA, HMI), sterowaniu procesami oraz w systemach pomiarowych.

W tabeli 6.3. przedstawiono zalety i wady protokołów LonWorks i ModBus:

Cecha	LonWorks	ModBus
Zalety	Elastyczna topologia, duża skalowalność, rozproszony model bez jednego punktu awarii	Prostota, szeroka kompatybilność, duża liczba urządzeń na rynku
Wady	Większa złożoność konfiguracji i implementacji, droższe komponenty	Ograniczona prędkość, hierarchiczna struktura (master-slave), ograniczona elastyczność

Tabela 6.3. Zalety i wady protokołów LonWorks i ModBus

LonWorks lepiej sprawdza się w dużych, rozproszonych systemach automatyki budynkowej i inteligentnych sieciach.

ModBus jest prostszy, łatwiejszy do wdrożenia i powszechnie stosowany w przemyśle.

7. SYSTEMY PRACY W CZASIE RZECZYWISTYM I KOMUNIKACJA W INSTALACJACH OFF-GRID

W dobie rosnącego znaczenia automatyzacji oraz rozwoju inteligentnych sieci ciepłowniczych, szczególnie w kontekście rozwiązań OFF-Grid, kluczowe znaczenie zyskują kwestie związane z komunikacją, synchronizacją czasu oraz architekturą systemów sterowania. Niniejszy rozdział przedstawia praktyczne i technologiczne aspekty pracy w czasie rzeczywistym, wykorzystania urządzeń komunikujących się z systemami nadrzędnymi, a także analizy potrzeb infrastruktury działającej w trybie wyspowym. Całość dopełnia omówienie zalet i zastosowania architektury systemów rozproszonych, która stanowi fundament nowoczesnych i odpornych sieci sterowania.

7.1. SYNCHRONIZACJA CZASU W SYSTEMACH AUTOMATYKI

Współczesne systemy automatyki przemysłowej, zwłaszcza układy SCADA i sterowniki PLC, wymagają precyzyjnej synchronizacji czasu w celu zapewnienia integralności danych, poprawnej rejestracji zdarzeń oraz prawidłowego działania algorytmów sterowania. Kluczową rolę w zapewnieniu jednolitego wzorca czasu w Polsce pełni Główny Urząd Miar (GUM).

GUM, jako instytucja państwowa podlegająca Ministerstwu Rozwoju i Technologii, odpowiada za utrzymanie spójności pomiarowej w kraju oraz zgodność wzorców jednostek miar z międzynarodowym systemem SI (Système International d’Unités). Jednym z najważniejszych zadań GUM w kontekście automatyki przemysłowej jest utrzymywanie i udostępnianie urzędowego wzorca czasu.

Na podstawie precyzyjnych zegarów atomowych GUM realizuje wzorzec sekundy zgodnie z definicją układu SI i udostępnia publiczne serwery czasu działające w oparciu o protokół NTP (Network Time Protocol):

- tempus1.gum.gov.pl (194.146.251.100).
- tempus2.gum.gov.pl (194.146.251.101).

Synchronizacja systemów sterowania i rejestracji danych z serwerami GUM umożliwia zachowanie spójności czasowej w sieciach przemysłowych, ograniczając błędy związane z rozbieżnościami zegarów urządzeń. Precyzyjne źródło czasu jest niezbędne dla analizy alarmów, diagnostyki zdarzeń technologicznych, korelacji

danych pomiarowych oraz zapewnienia ciągłości procesów w systemach krytycznych, takich jak sieci elektroenergetyczne, ciepłownicze czy przemysł chemiczny.

W kontekście badań nad transmisją danych pomiędzy sterownikami, dokładna synchronizacja czasu minimalizuje ryzyko błędów komunikacyjnych, zapewnia poprawną analizę transmisji i umożliwia prawidłowe odwzorowanie zdarzeń w systemach rozproszonych.

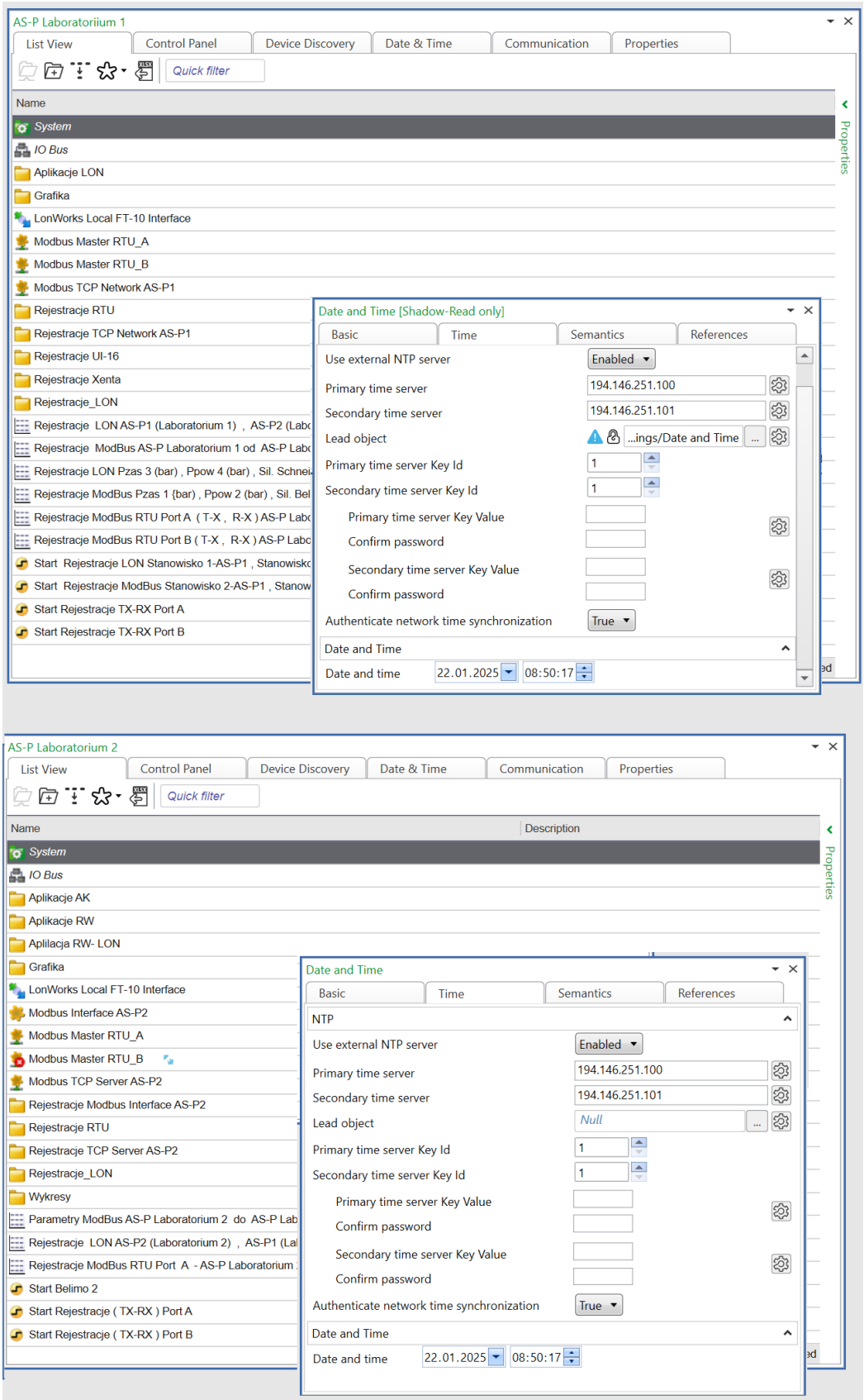
Na rysunku 7.1. przedstawiono konfigurację "Date and Time" dwóch serwerów (sterowników). Oba systemy mają identyczne ustawienia dotyczące serwera NTP:

- Włączona synchronizacja NTP.
- Podstawowy serwer czasu: 194.146.251.100.
- Zapasowy serwer czasu: 194.146.251.101.
- Uwierzytelnianie synchronizacji czasu: Włączone.

To oznacza, że systemy sterowników są zsynchronizowane z tym samym czasem. Wykorzystane serwery czasu należą do Głównego Urzędu Miar (GUM) w Polsce. GUM udostępnia precyzyjne źródła czasu oparte na zegarach atomowych i systemie UTC(PL). Wykorzystana synchronizacja NTP umożliwia synchronizację czasu z dokładnością do kilku milisekund.

Precyzyjna synchronizacja czasu odgrywa kluczową rolę w automatyce przemysłowej, szczególnie w systemach SCADA oraz sterownikach PLC. Współczesne procesy technologiczne wymagają dokładnego rejestrowania zdarzeń, koordynacji urządzeń oraz integracji z nadrzędnymi systemami zarządzania produkcją. Brak synchronizacji może prowadzić do poważnych konsekwencji, takich jak:

- Błędna analiza awarii.
- Zakłócenia w sterowaniu procesami.
- Problemy z korelacją danych.
- Trudności w wykrywaniu cyberataków.



Rysunek 7.1. Przykład konfiguracji systemów dla potrzeb zbierania danych z instalacji

Systemy SCADA, odpowiedzialne za monitorowanie i nadzorowanie procesów, wykorzystują znaczniki czasu do rejestracji zdarzeń w czasie rzeczywistym. Dokładna synchronizacja jest niezbędna do analizy trendów, generowania raportów oraz zarządzania alarmami. W przypadku infrastruktury krytycznej, takiej jak sieci elektroenergetyczne czy ciepłownictwo, precyzyjna rejestracja czasu pozwala na szybkie reagowanie na awarie i ich skuteczne diagnozowanie.

Sterowniki PLC, sterujące pracą urządzeń, muszą działać w idealnej synchronizacji, aby zapewnić prawidłowy przebieg procesów technologicznych. Brak spójnego czasu może powodować błędy w sterowaniu w systemach, nieprawidłową rejestrację alarmów i danych oraz trudności w planowaniu konserwacji predykcyjnej.

Aby zapewnić dokładną synchronizację, stosuje się protokoły NTP (Network Time Protocol) oraz PTP (Precision Time Protocol):

- NTP – wykorzystywany w większości systemów automatyki, pozwala na synchronizację czasu z dokładnością do milisekund.
- PTP – stosowany w bardziej wymagających aplikacjach, takich jak automatyka procesowa czy robotyka, osiąga precyzję na poziomie nanosekund.

Systemy SCADA oraz PLC często synchronizują się z serwerami czasu GUM, co zapewnia im wzorcowy, atomowy czas i eliminuje błędy związane z dryftem zegarów systemowych.

Współczesne systemy automatyzacji wymagają także mechanizmów zabezpieczających integralność danych czasowych. Weryfikacja synchronizacji poprzez autoryzację sygnałów NTP lub wykorzystanie sprzętowej synchronizacji PTP zwiększa odporność na cyberataki i zapobiega manipulacji czasem, co jest kluczowe w systemach bezpieczeństwa przemysłowego.

Podsumowując, precyzyjna synchronizacja czasu w systemach automatyki przemysłowej, a także w ciepłownictwie jest fundamentem niezawodności, bezpieczeństwa i efektywności operacyjnej. Zapewnia poprawność rejestrowania zdarzeń, umożliwia koordynację procesów i pozwala na skuteczne wykrywanie awarii. Szczególnie istotna jest dokładna synchronizacja podczas przesyłania danych pomiędzy sterownikami, ponieważ nawet minimalne różnice czasowe mogą prowadzić do błędnej analizy zdarzeń, zakłóceń w sterowaniu procesami oraz problemów z integralnością danych. Współczesne rozwiązania, oparte na serwerach czasu i zaawansowanych protokołach synchronizacji, eliminują ryzyko błędów

wynikających z niespójności czasowych, a tym samym wspierają stabilne i bezpieczne działanie infrastruktury przemysłowej.

7.2. URZĄDZENIA Z PROTOKOŁAMI KOMUNIKACYJNYMI

Współczesne systemy automatyki przemysłowej oraz inteligentne sieci energetyczne (smart grids) opierają się na efektywnej wymianie danych pomiędzy urządzeniami pomiarowymi, wykonawczymi i systemami sterującymi. Kluczową rolę w tym procesie odgrywają urządzenia wyposażone w protokoły komunikacyjne, umożliwiające zdalną kontrolę, monitorowanie i analizę danych w czasie rzeczywistym.

Protokoły komunikacyjne w takich urządzeniach pozwalają na uzyskiwanie większej ilości danych o ich stanach, co może przyczynić się do lepszej analizy pracy całej instalacji, w których funkcjonują. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie niezawodności systemów.

Do najczęściej wykorzystywanych urządzeń w takich systemach należą:

- Siłowniki zaworów – odpowiadające za regulację przepływu mediów.
- Liczniki ciepła – mierzące ilość zużytej energii cieplnej.
- Liczniki elektryczne – rejestrujące zużycie energii elektrycznej oraz dodatkowe parametry, takie jak moc czynna i bierna.

Zastosowanie odpowiednich protokołów komunikacyjnych w tych urządzeniach umożliwia ich integrację z systemami zarządzania.

Siłowniki zaworów to urządzenia wykonawcze służące do automatycznej regulacji przepływu cieczy lub gazów w instalacjach przemysłowych, energetycznych oraz ciepłowniczych. Działają na podstawie sygnałów sterujących (napięciowych, prądowych lub cyfrowych) i mogą być sterowane ręcznie lub automatycznie w oparciu o dane z systemów monitorujących.

Licznik ciepła mierzy ilość energii cieplnej dostarczonej do budynku lub systemu grzewczego. Obliczenia opierają się na różnicy temperatury medium grzewczego na wejściu i wyjściu oraz objętości przepływającego medium.

Licznik energii elektrycznej to urządzenie mierzące zużycie energii elektrycznej w instalacjach. Współczesne liczniki pozwalają również na analizę jakości energii oraz kontrolę zużycia mocy czynnej i biernej.

Zastosowanie urządzeń wyposażonych w zaawansowane protokoły komunikacyjne pozwala na uzyskanie większej ilości informacji o pracy instalacji. Pozyskane dane umożliwiają bardziej precyzyjną analizę działania systemu, co przekłada się na efektywniejsze zarządzanie instalacją, lepszą diagnostykę awarii oraz zwiększenie niezawodności całej infrastruktury.

Dodatkowo, urządzenia te mogą okazać się szczególnie przydatne w zasilaniu OFF-Grid komór ciepłowniczych, umożliwiając efektywne zarządzanie siecią ciepłowniczą w miejscach pozbawionych dostępu do stałej sieci energetycznej.

7.3. ANALIZA POTRZEB OBIEKTÓW ZASILANYCH WYSPOWO (OFF-GRID)

W systemach ciepłowniczych, szczególnie w przypadku obiektów zasilanych w trybie OFF-Grid, kluczową rolę odgrywa niezawodna komunikacja oraz skuteczna rejestracja danych. Ważne jest zachowanie ciągłości monitoringu, sterownia i kontroli nad takimi instalacjami.

W ramach kompleksowej analizy potrzeb obiektów zasilanych w sposób wyspowy, można wyróżnić pięć kluczowe obszary

A. Niezawodna komunikacja - korzyści wynikające z niezawodnej komunikacji obejmują:
    - Nieprzerwaną transmisję danych w systemach SCADA i PLC.
    - Zmniejszenie ryzyka utraty informacji.
    - Możliwość zdalnej diagnostyki i szybkiej reakcji w przypadku awarii.
    - Zwiększenie bezpieczeństwa i stabilności pracy całego systemu ciepłowniczego.
B. Synchronizacja czasu systemów i urządzeń - odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu stabilności, efektywności oraz bezpieczeństwa pracy całego systemu gdyż umożliwia:
    - Koordynacja pracy urządzeń.
    - Gwarantuje poprawność rejestrowania danych i diagnostyki.
    - Minimalizacja opóźnień w transmisji danych.
C. Rejestracja danych na poziomie SCADA i PLC - w standardowych rozwiązaniach przemysłowych dane operacyjne oraz informacje diagnostyczne są rejestrowane głównie na poziomie sterowników PLC.

Jednakże w przypadku zasilania OFF-Grid, ważne jest równoczesne prowadzenie rejestracji także na poziomie systemu SCADA. Taka redundancja pełni istotną funkcję w przypadku zerwania komunikacji między obiektem (PLC) a centralnym systemem SCADA – może to nastąpić w wyniku awarii sieci komunikacyjnej lub problemów z zasilaniem. Gromadzenie danych przez system SCADA pozwala wówczas:

- Zidentyfikować przyczynę utraty łączności, analizując parametry zarejestrowane bezpośrednio w systemie SCADA.
- Skrócić czas reakcji serwisowej, dzięki szybkiej diagnostyce i dostępowi do pełnej historii pracy instalacji.

Rejestracje w systemie SCADA mogą mieć krótszy horyzont czasowy (np. 24 godziny), tak tylko by móc przeprowadzić analizę w przypadku zaniki komunikacji pomiędzy obiektem, natomiast dane z PLC mogą być przechowywane dłużej.

D. Przesyłanie sygnałów alarmowych - w instalacjach zasilanych OFF-Grid kluczowe znaczenie ma natychmiastowe przekazywanie sygnałów alarmowych. Szczególnie istotne są alarmy dotyczące:

- Stanu ładowania akumulatorów – brak ładowania może wskazywać na awarię.
- Niskiego napięcia w instalacji – zbyt niskie napięcie może prowadzić do nieprawidłowej pracy urządzeń i ryzyka baraku zasilania.

Szybka detekcja takich zdarzeń pozwala na podjęcie działań prewencyjnych i uniknięcie dłuższych przestojów w pracy systemu.

E. Wykorzystanie urządzeń z komunikacją - nowoczesne urządzenia posiadające komunikację umożliwiają dostarczenie większej informacji o sobie, a zatem uszykujemy również w sposób pośredni informację o stanie instalacji. Komunikacja z takimi urządzeniami pozwala na:

- Wykrywanie nieprawidłowości w pracy poszczególnych elementów oraz całej instalacji.

W instalacjach ciepłowniczych zasilanych OFF-Grid kluczowym elementem jest zapewnienie skutecznej komunikacji i rejestracji danych zarówno na poziomie SCADA, jak i PLC. Pozwala to nie tylko na utrzymanie ciągłości działania systemu, ale także na dokładniejszą analizę jego pracy w sytuacjach awaryjnych. Ponadto,

wykorzystanie nowoczesnych urządzeń z komunikacją umożliwia uzyskanie szczegółowych danych operacyjnych, co przekłada się na efektywniejsze zarządzanie siecią ciepłowniczą i zwiększenie niezawodności całego systemu. Te pięć obszarów reprezentujących potrzeby obiektów zasilanych OFF-Grid odgrywają kluczową rolę w autonomicznych systemach energetycznych, które w przyszłości mogą przyczynić się do rozwoju inteligentnych sieci ciepłowniczych.

7.3. ARCHITEKTURA SYSTEMU ROZPROSZONEGO

Sterowanie rozproszone w sieciach ciepłowniczych odnosi się do architektury, w której wiele niezależnych jednostek sterujących współpracuje ze sobą, tworząc spójną strukturę zarządzania siecią ciepłowniczą. W przeciwieństwie do tradycyjnych, scentralizowanych systemów, w rozproszonym modelu sterowania decyzje operacyjne i funkcje monitorujące są rozdzielone pomiędzy lokalne kontrolery, takie jak sterowniki PLC, a jednostki SCADA.

Z naukowego punktu widzenia, systemy rozproszone opierają się na kilku kluczowych założeniach:

1. Redundancja i niezawodność – W przypadku awarii jednej jednostki pozostałe elementy systemu mogą nadal działać, co zwiększa odporność całej sieci.
2. Optymalizacja lokalna i globalna – Lokalne kontrolery (np. PLC) mogą podejmować szybkie decyzje na poziomie obiektowym, podczas gdy nadrzędna jednostka SCADA koordynuje pracę całego systemu, optymalizując parametry globalne.
3. Elastyczność komunikacyjna – W rozproszonym systemie komunikacja zachodzi na wielu poziomach:
    - Między urządzeniami wykonawczymi a sterownikami PLC.
    - Między sterownikami a systemem SCADA.
    - Między samymi sterownikami, co umożliwia synchronizację i wymianę danych w czasie rzeczywistym.

Rozproszone sterowanie w sieciach ciepłowniczych staje się kluczowym rozwiązaniem w kontekście tworzenia inteligentnych sieci ciepłowniczych.

Umożliwia ono lepszą analizę pracy systemu, zwiększa jego odporność na awarie i pozwala na bardziej precyzyjne dostosowanie parametrów pracy do dynamicznie zmieniających się warunków pracy sieci grzewczej.

7.4. ANALIZA MODELU KOMUNIKACYJNEGO OBIEKTÓW ZASILANYCH SYSTEMEM OFF-GRID

Systemy zasilania OFF-Grid, wykorzystywane w autonomicznych instalacjach, takich jak komory ciepłownicze, wymagają zaawansowanej i niezawodnej komunikacji między różnymi komponentami systemu. Kluczowym elementem tej infrastruktury jest efektywna wymiana danych między urządzeniami wykonawczymi (np. siłowniki zaworów, liczniki ciepła czy energii elektrycznej), sterownikami oraz systemami SCADA. W systemach tego typu wykorzystuje się zarówno komunikację przewodową opartą na protokole ModBus RTU (RS485) oraz LonWorks (FT-10A), co umożliwia integrację szerokiej gamy urządzeń i zapewnia odporność transmisji na zakłócenia.

A. Komunikacja urządzeń wykonawczych z PLC

   Urządzenia wykonawcze, takie jak zawory, czujniki czy liczniki, komunikują się z PLC za pomocą dedykowanych protokołów komunikacyjnych: ModBus RTU oraz LonWorks.

   Dzięki tej komunikacji możliwe jest:

   - Przekazywanie danych o stanie urządzeń w czasie rzeczywistym.
   - Wysyłanie sygnałów sterujących (np. otwarcie zaworu).
   - Wykrywanie usterek i awarii w systemie.

   Przykładowo:

   - Siłowniki Belimo NVK24A-MOD wykorzystują komunikację ModBus RTU po magistrali RS485.
   - Siłownik Belimo NVK24A-LON komunikuje się w standardzie LonWorks.
   - Liczniki ciepła Itron CF-55 w zależności od konfiguracji obsługują komunikację ModBus lub LonWorks.

   W systemach OFF-Grid kluczowe jest, aby komunikacja ta była energooszczędna i odporna na zakłócenia, co umożliwia efektywną pracę w warunkach ograniczonego dostępu do energii.

B. Komunikacja pomiędzy sterownikami PLC a SCADA

Sterowniki PLC wysyłają dane do systemu SCADA, który pełni funkcję centralnego punktu monitoringu i zarządzania. Wymiana informacji odbywa się za pomocą sieci Ethernet TCP/IP, przy wykorzystaniu protokołu ModBus TCP. Główne zadania tej komunikacji to:

- Monitorowanie parametrów pracy instalacji w czasie rzeczywistym.
- Zbieranie i archiwizacja danych dla późniejszej analizy.
- Alarmowanie o przekroczeniu dopuszczalnych wartości parametrów.

W systemie SCADA dane zbierane zarówno z urządzeń ModBus, jak i LonWorks są integrowane w jednym nadrzędnym systemie zarządzania.

C. Komunikacja pomiędzy sterownikami PLC

W przypadku bardziej złożonych instalacji OFF-Grid zachodzi również potrzeba bezpośredniej wymiany danych między sterownikami PLC. Komunikacja ta realizowana jest za pomocą ModBus TCP po sieci Ethernet. Wymiana danych między sterownikami umożliwia:

- Koordynację pracy różnych części systemu.
- Autonomiczne podejmowanie decyzji w razie utraty łączności z systemem SCADA.
- Szybszą reakcję na zmieniające się lokalne warunki pracy.

Dodatkowo, sterowniki PLC mogą pełnić funkcję bramy komunikacyjnej, umożliwiając wymianę danych pomiędzy urządzeniami pracującymi w sieci LonWorks i urządzeniami pracującymi w standardzie ModBus TCP.

Model komunikacyjny w systemach OFF-Grid odgrywa kluczową rolę w utrzymaniu stabilności i efektywności instalacji. Integracja komunikacji pomiędzy urządzeniami wykonawczymi (pracującymi w standardzie ModBus RTU i LonWorks), sterownikami PLC oraz systemem SCADA pozwala na skuteczne monitorowanie pracy układu, szybką reakcję na zmiany oraz dokładne zbieranie danych do analizy. W warunkach autonomicznych zapewnia to wysoką niezależność energetyczną, stabilność operacyjną i możliwość optymalizacji zarządzania siecią ciepłowniczą.

8. STANOWISKA BADAWCZE I INSTALACJE OFF-GRID

W ramach realizacji doktoratów powstały stanowiska badawcze oraz rzeczywiste instalacje, które pozwalają na testowanie i analizę systemów energetycznych typu OFF-Grid. Stanowiska zostały zaprojektowane z myślą o optymalizacji procesów wytwarzania, magazynowania oraz dystrybucji energii. W ramach realizowanych prac opracowano koncepcję stanowiska do badania generatorów oraz zaimplementowano integrację stanowisk badawczych i instalacji OFF-Grid z systemem SCADA, co umożliwiło zdalne monitorowanie, sterowanie oraz archiwizację danych pomiarowych.

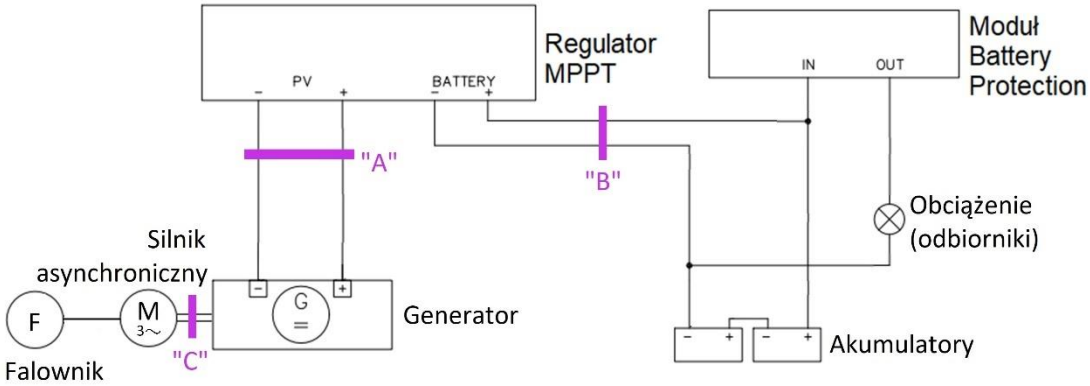
8.1. STANOWISKO BADANIA GENERATORÓW

A. Opis układu stanowiska badawczego generatorów

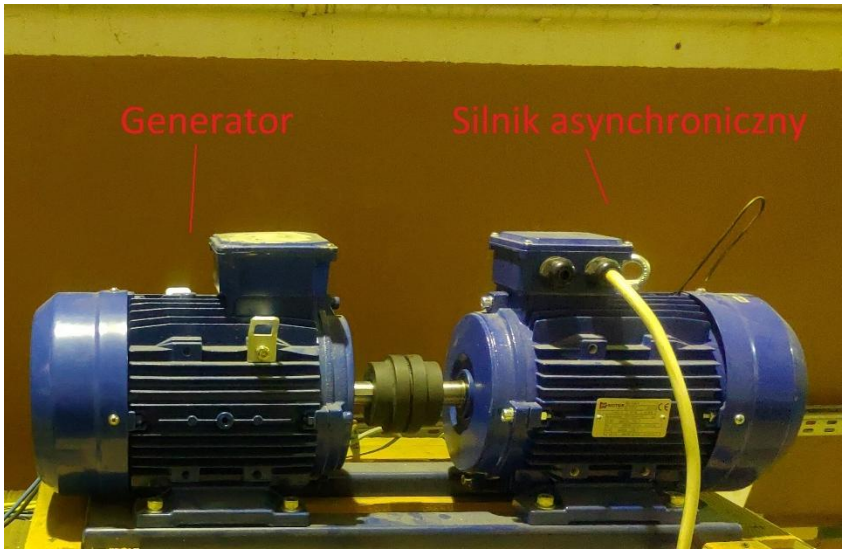
W ramach realizowanej pracy zaprojektowano koncepcję stanowiska badawczego przeznaczonego do analizy pracy generatorów elektrycznych w systemach OFF-Grid. Celem projektu było stworzenie układu umożliwiającego symulację rzeczywistych warunków pracy, w których turbina wodna napędza generator, produkując energię elektryczną.

Z uwagi na specyfikę badań, rolę turbiny w układzie pełni silnik asynchroniczny zasilany z falownika (F), który napędza generator odwzorowując pracę rzeczywistego źródła mechanicznego. Dzięki temu możliwa była precyzyjna kontrola parametrów wejściowych, takich jak prędkość obrotowa, co pozwalało na dokładną analizę pracy generatora.

Na rysunku 8.1. przedstawiono koncepcję układu elektrycznego przygotowanego dla stanowiska badawczego. Natomiast rysunek 8.2. ukazuje fotografię zrealizowanej instalacji.



Rys. 8.1. Koncepcja układu elektrycznego stanowiska badania generatorów



Rys. 8.2. Widok rzeczywisty fragmentu zrealizowanego stanowiska badawczego, przedstawiający generator oraz współpracujący z nim silnik asynchroniczny

W skład układu wchodzą następujące elementy:

- Falownik (F)

  Odpowiada za sterowanie silnikiem asynchronicznym. Falownik wyposażony w komunikację cyfrową – steruje silnikiem, który symuluje pracę turbiny wodnej, możliwość sterowania z poziomu SCADA.
- Silnik asynchroniczny (M)

  Napędza generator elektryczny.
- Generator (G)

Symbol G – generator – przedstawia trójfazowy generator z diodowym prostownikiem. Generator wytwarza napięcie przemienne, które następnie jest bezpośrednio prostowane w układzie prostownika.
Mostek prostowniczy w który jest wyposażony generator –
konwertuje napięcie zmienne wytwarzane przez generatora na napięcie stałe.
Prędkość obrotową wału mierzy się przy pomocy tachometru (C).

- Regulator MPPT (Maximum Power Point Tracking)
  Optymalizuje przekazywanie energii do akumulatorów i odbiorników. Maksymalizuje ilość energii przekazywanej do urządzeń odbiorczych poprzez dostosowanie napięcia i prądu.
- Moduł Battery Protection
  Chroni akumulatory przed przeładowaniem i zbyt głębokim rozładowaniem, stabilizując pracę całego systemu i zabezpieczając jego komponenty.
- Akumulatory
  Magazynują energię elektryczną wytworzoną przez generator i dostarczają ją do odbiorników w razie potrzeby - dla zasilania odbiorników w trybie OFF-Grid.
- Obciążenie (odbiorniki)
  Reprezentuje urządzenia zasilane przez system, np. oświetlenie, elementy osprzętu automatyki, takie jak siłowniki lub inne odbiorniki energii. Wykorzystano regulowane obciążenie do kontrolowania zmiany obciążenia. W badaniach wykorzystano żarówki jako elementy obciążające, co pozwala na precyzyjne dopasowanie poboru mocy i analizę zachowania układu w różnych scenariuszach testowych.
- PLC - programowalny sterownik logiczny, który koordynuje działanie całego stanowiska badawczego. Odpowiada za przetwarzanie sygnałów z czujników, sterowanie elementami wykonawczymi oraz komunikację z systemem SCADA. Dzięki PLC możliwa jest automatyzacja testów, precyzyjna kontrola procesów oraz szybkie reagowanie na zmiany parametrów pracy układu.

- SCADA – system monitorowania, sterowania, rejestracji i archiwizacji parametrów testowych.

Dodatkowo układ wyposażono w następujące narzędzia pomiarowe:

- Licznik elektryczny (A) – Umieszczony między generatorem a regulatorem MPPT. Służy do pomiaru napięcia, prądu oraz mocy generowanej przez generator przed regulacją.
- Licznik (B) – Zainstalowany między regulatorem MPPT a odbiornikami (akumulatorem). Pozwala analizować energię przekazywaną do akumulatorów.

Liczniki elektryczne z komunikacją – monitorują parametry elektryczne w czasie rzeczywistym i przesyła dane o napięciu, prądzie i mocy.

- Tachometr (C) – Mierzy prędkość obrotową wału generatora, co umożliwia ocenę stabilności i sprawności pracy generatora, szczególnie w warunkach zmiennego obciążenia. Tachometr wyposażony w komunikację cyfrową umożliwiającą przesyłanie danych do systemu SCADA.

B. Cel stanowiska

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane w celu analizy pracy generatorów elektrycznych w systemach OFF-Grid. Jego zadaniem jest symulacja warunków rzeczywistej pracy układu, w którym turbina wodna napędza generator, produkując energię elektryczną. System testowy umożliwia badanie zachowania regulatora MPPT oraz parametrów elektrycznych, takich jak napięcia i prądy w obwodzie.

C. Zasada działania stanowiska

Falownik steruje silnikiem, który napędza generator. W tym układzie falownik poprzez odpowiednie sterowanie silnikiem asynchronicznym symuluje pracę turbiny wodnej. Falownik posiada komunikację, co pozwala na zdalne monitorowanie jego parametrów oraz sterowanie jego pracą z poziomu systemu SCADA. Energia wytwarzana przez generator jest konwertowana na napięcie stałe przez mostek prostowniczy. Następnie wygenerowane napięcie stałe trafia do regulatora MPPT, który optymalizuje przepływ energii w systemie. Energia z MPPT jest przekazywana do akumulatorów, gdzie następuje jej magazynowanie. Zasilanie odbiorników odbywa się zarówno

bezpośrednio z MPPT, jak i z akumulatorów w przypadku braku zasilania z generatora. Na stanowisku możliwe jest zbadanie wpływu zmiany obciążenia, na badany układ.

D. Badane parametry

W ramach badań na stanowisku testowym analizowane są kluczowe parametry pracy układu, takie jak moc wyjściowa, prędkość obrotowa wału, napięcie generowane przez system oraz wpływ obciążenia na zachowanie układu.

E. Komunikacja i zdalne sterowanie

System SCADA umożliwia monitorowanie i sterowanie falownikiem, analizę parametrów pracy układu oraz archiwizację wyników.

F. Konfiguracja stanowiska badawczego

Do sterowania silnikiem asynchronicznym wykorzystano falownik Danfoss, który umożliwia precyzyjną regulację prędkości obrotowej oraz posiada wbudowaną komunikację cyfrową w standardzie ModBus RTU. Silnik asynchroniczny zastosowany w układzie to model Pro Motor Poland MS 112M-4, charakteryzujący się mocą 4 kW, napięciem znamionowym 400 V przy połączeniu w trójkąt lub 690 V przy połączeniu w gwiazdę oraz prędkością obrotową 1140 obr./min przy częstotliwości 50 Hz.

Napędzany silnikiem generator elektryczny to trójfazowy synchroniczny generator Gener Volt GV112M8, wzbudzany magnesami trwałymi, o znamionowej mocy 2 kVA, napięciu wyjściowym 21 V (połączenie w gwiazdę) oraz prądzie wyjściowym 55 A przy 1500 obr./min i częstotliwości 100 Hz. Generator wyposażono w mostek prostowniczy, który umożliwia bezpośrednią konwersję napięcia zmiennego na napięcie stałe.

Optymalizację przekazywania energii do akumulatorów i odbiorników zapewniał regulator MPPT Victron Energy MPPT 100/50, którego zadaniem było dynamiczne dostosowanie parametrów napięcia i prądu w celu maksymalizacji wydajności energetycznej układu. W układzie zastosowano również moduł Battery Protection firmy Victron Energy, który zabezpieczał akumulatory przed głębokim rozładowaniem i przeładowaniem.

Energia magazynowana była w akumulatorach AGM Victron Energy Deep Cycle o napięciu 12 V i pojemności 60 Ah. Układ zasilający odbiorniki został zaprojektowany w trybie OFF-Grid i umożliwiał stabilne zasilanie podłączonych urządzeń.

W celu zarządzania procesem badawczym oraz automatyzacji procedur testowych, wykorzystano sterownik PLC SmartX Controller – AS-P, który nadzorował pracę falownika, obciążenia regulowanego oraz odbierał sygnały pomiarowe. Nad systemem czuwała platforma SCADA EcoStruxure Building Operation, umożliwiająca monitorowanie parametrów w czasie rzeczywistym, zdalne sterowanie, rejestrację danych oraz tworzenie wykresów i raportów.

Układ wyposażono także w przetworniki napięcia firmy F&F oraz miernik parametrów sieci Nemo, służące do precyzyjnego pomiaru wartości napięcia, prądu oraz mocy. Prędkość obrotowa wału generatora była mierzona przy użyciu tachometru z wyjściem cyfrowym, umożliwiającym przesył danych bezpośrednio do systemu SCADA.

Stanowisko badawcze pozwala na przeprowadzenie testów umożliwiających analizę działania generatorów i systemów z MPPT. Integracja z SCADA pozwala na pełną kontrolę, rejestrację i optymalizację pracy układu.

8.1.1. INTEGRACJA STANOWISKA BADANIA GENERATORÓW Z SYSTEMEM SCADA

Integracja stanowiska została zrealizowana poprzez zastosowanie komunikacji cyfrowej i odpowiednich interfejsów transmisyjnych. Głównym medium komunikacyjnym w układzie był protokół ModBus RTU realizowany przez magistralę RS485, który umożliwiał wymianę danych pomiędzy falownikiem, licznikami elektrycznymi, tachometrem a sterownikiem PLC. Następnie komunikacja między PLC a systemem SCADA była realizowana za pomocą sieci Ethernet, zapewniając szybkie i niezawodne przesyłanie danych procesowych oraz umożliwiając zdalne sterowanie układem.

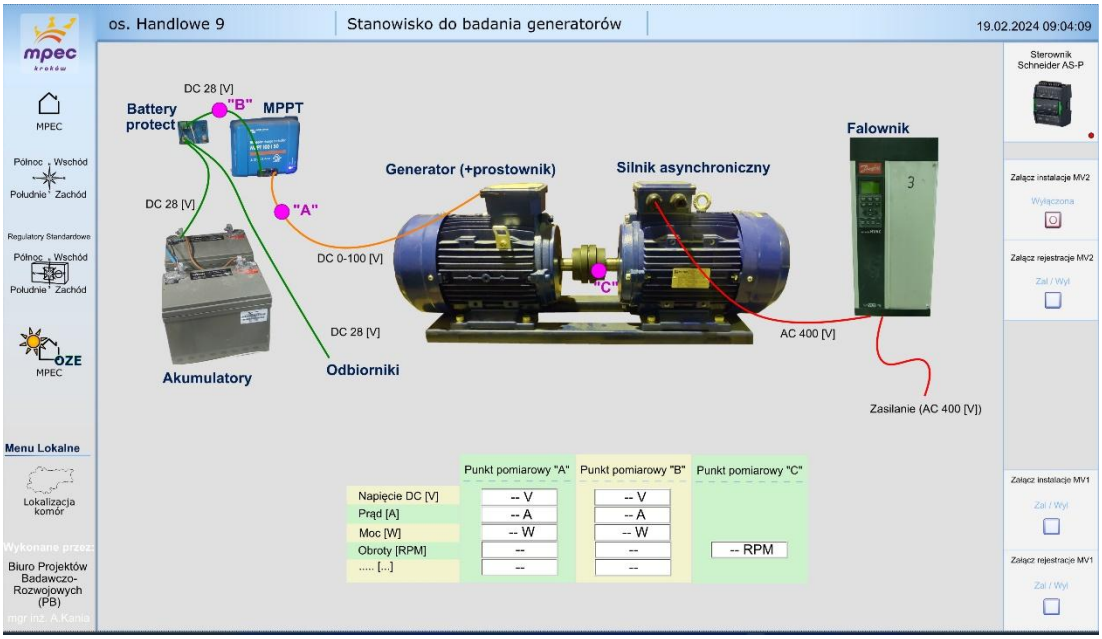
W systemie mierzono głównie sygnały analogowe, takie jak:

- napięcia wyjściowe generatora i regulatora MPPT,
- prądy ładowania i obciążenia,
- moc generowaną i przesyłaną w układzie,
- prędkość obrotową wału generatora.

Dodatkowo sygnały cyfrowe były wykorzystywane do przekazywania komend sterujących.

Integracja stanowiska badawczego generatorów z systemem SCADA umożliwiła pełną kontrolę i monitorowanie parametrów pracy układu w czasie rzeczywistym. System SCADA stanowi nowoczesne narzędzie do nadzorowania, sterowania oraz zbierania danych pomiarowych, dzięki czemu znacząco poprawia efektywność procesu badawczego i umożliwia dokładniejszą analizę działania urządzeń w warunkach rzeczywistych.

Włączenie stanowiska do systemu SCADA przyniosło szereg korzyści. Przede wszystkim zapewniło możliwość zdalnego sterowania falownikiem i regulowanego obciążenia, co pozwala operatorowi na bieżącą optymalizację testów oraz dostosowanie parametrów do różnych scenariuszy badawczych. System umożliwia również archiwizację wszystkich danych, co pozwala na ich późniejszą analizę, modelowanie oraz wyciąganie wniosków dotyczących pracy generatora i regulatora MPPT. Dzięki zaawansowanej wizualizacji danych w postaci dynamicznych wykresów oraz raportów, użytkownik może śledzić trendy i analizować zmiany parametrów takich jak napięcie, prąd, prędkość obrotowa oraz moc wyjściowa. Ponadto, automatyzacja procedur testowych sprawia, że badania mogą być prowadzone według wcześniej ustalonych algorytmów, co eliminuje błędy ludzkie i poprawia powtarzalność eksperymentów.



Rys. 8.3. Wizualizacja stanowiska badawczego generatorów elektrycznych – System SCADA

Na rysunku 8.3. przedstawiono schemat integracji stanowiska badawczego generatorów z systemem SCADA. Widoczny jest układ połączeń między kluczowymi komponentami systemu, takimi jak falownik sterujący pracą silnika, generator elektryczny, regulator MPPT oraz akumulatory. System SCADA umożliwia komunikację między tymi elementami, zapewniając możliwość zdalnego monitorowania i sterowania. Wykresy oraz interfejs użytkownika w SCADA przedstawiają dane dotyczące parametrów pracy, takich jak napięcie, prąd i moc, co pozwala na bieżącą analizę i optymalizację układu.

Oczekiwanym efektem takiej integracji jest możliwość tworzenia wykresów, użytkownik może monitorować trendy oraz analizować zmiany parametrów. Dodatkowo, zautomatyzowane procedury testowe pozwalają na przeprowadzanie badań zgodnie z wcześniej określonymi algorytmami, co minimalizuje ryzyko błędów ludzkich i zwiększa powtarzalność eksperymentów.

8.1.2. MPPT

Regulator MPPT (Maximum Power Point Tracking) to technologia stosowana w regulatorach ładowania, która umożliwia maksymalne wykorzystanie dostępnej mocy ze źródła energii. Regulator MPPT dynamicznie dostosowuje napięcie i prąd do warunków pracy, aby zawsze utrzymać układ w punkcie maksymalnej mocy (Maximum Power Point – MPP).

MPPT analizuje charakterystykę napięciowo-prądową (V-I) źródła energii i identyfikuje punkt, w którym jego wydajność jest największa. W praktyce:

- Punkt mocy maksymalnej (MPP) zmienia się w zależności od warunków pracy, takich jak obciążenie, prędkość obrotowa turbiny.
- MPPT dostosowuje parametry układu tak, aby źródło energii pracowało w optymalnym zakresie, zmieniając napięcie i prąd na wyjściu.

Zalety stosowania MPPT

- Wyższa sprawność energetyczna – pozwala na uzyskanie większej ilości energii w porównaniu do tradycyjnych regulatorów PWM.
- Redukcja strat energii – optymalizuje dopasowanie napięcia i prądu do akumulatorów oraz odbiorników.

- Poprawa stabilności napięcia wyjściowego – zapewnia lepszą pracę podłączonych urządzeń.
- Wydłużenie żywotności akumulatorów – optymalizuje proces ładowania, zapobiegając ich przeładowaniu lub nadmiernemu rozładowaniu.
- Automatyczna adaptacja do zmiennych warunków – dynamiczne dostosowywanie pracy do zmian napięcia i obciążenia.

W systemach OFF-Grid regulator MPPT pełni kluczową rolę w zarządzaniu energią elektryczną. W przypadku układu, w którym generator elektryczny napędzany przez turbinę zasila odbiorniki i akumulatory:

- MPPT monitoruje napięcie i prąd wyjściowy generatora, optymalizując jego pracę.
- Konwertuje napięcie z generatora na odpowiednie dla akumulatorów, minimalizując straty energii.
- Stabilizuje napięcie, co pozwala na niezawodne zasilanie odbiorników.
- Współpracuje z systemem SCADA, umożliwiając monitorowanie i analizę parametrów pracy w czasie rzeczywistym (w przypadku posiadania komunikacji).

8.1.3. ETAPY ŁADOWANIA AKUMULATORÓW PRZEZ REGULATOR MPPT

Proces ładowania akumulatorów w systemie z regulatorem MPPT składa się z kilku kluczowych etapów, które zapewniają maksymalną efektywność i bezpieczeństwo magazynowania energii. Regulator MPPT dynamicznie dostosowuje parametry ładowania w zależności od poziomu naładowania akumulatora, co pozwala na jego optymalne wykorzystanie oraz wydłużenie żywotności.

A. Etap ładowania głównego (Bulk Charging)

   W pierwszej fazie regulator MPPT dostarcza do akumulatorów maksymalnie dostępny prąd, aby jak najszybciej naładować je do określonego napięcia.

   - W tym etapie akumulatory przyjmują największą ilość energii.
   - Regulator pracuje na zasadzie śledzenia punktu maksymalnej mocy (MPP), dostosowując napięcie i prąd do warunków zasilania.
   - Zwykle na tym etapie akumulator osiąga około 80–90% swojej pojemności.

B. Etap absorpcji (Absorption Charging)

Po osiągnięciu napięcia absorpcji regulator zmniejsza prąd ładowania i utrzymuje stałe napięcie przez określony czas, aby zapewnić pełne naładowanie akumulatora.

- Ten etap pozwala wyrównać napięcia między poszczególnymi celami akumulatora, co zapobiega ich nierównomiernemu starzeniu się.
- Czas trwania etapu absorpcji jest zależny od wcześniejszego poziomu rozładowania akumulatora oraz jego parametrów technicznych.

C. Etap podtrzymania (Float Charging)

Gdy akumulator jest już w pełni naładowany, napięcie zostaje obniżone do poziomu podtrzymania.

- Regulator dostarcza jedynie niewielką ilość energii, kompensując straty wynikające z samoistnego rozładowania akumulatora.
- Dzięki temu akumulator może pozostawać w stanie pełnego naładowania przez dłuższy czas bez ryzyka przeładowania.
- Jest to kluczowe w systemach OFF-Grid, gdzie akumulatory muszą być gotowe do natychmiastowego użycia.

D. Etap przechowywania (Storage Mode)

Jeśli akumulator pozostaje w pełni naładowany przez dłuższy czas i nie pobiera energii, regulator przełącza go w tryb przechowywania.

- W tym trybie napięcie jest dodatkowo obniżane, aby zminimalizować korozję płyt akumulatora i przedłużyć jego żywotność.
- Jest to szczególnie istotne w systemach, gdzie zużycie energii jest sporadyczne, a akumulatory pozostają długo nieużywane.

Zastosowanie regulatora MPPT w procesie ładowania akumulatorów zapewnia:

- Efektywne wykorzystanie dostępnej energii dzięki śledzeniu punktu mocy maksymalnej.
- Optymalizację ładowania poprzez dynamiczne dostosowanie napięcia i prądu.
- Zwiększoną żywotność akumulatorów dzięki precyzyjnemu sterowaniu procesem ładowania.
- Ochronę przed przeładowaniem i głębokim rozładowaniem, co wpływa na stabilność i bezpieczeństwo systemu.

8.1.4. BATTERY PROTECT

Battery Protect to urządzenie zabezpieczające akumulatory przed nadmiernym rozładowaniem oraz przeciążeniem przez podłączone odbiorniki. Jego głównym zadaniem jest automatyczne odłączanie odbiorników od akumulatora, gdy napięcie spadnie poniżej bezpiecznego poziomu, co chroni akumulatory przed uszkodzeniem i wydłuża ich żywotność.

W systemach OFF-Grid oraz w instalacjach magazynowania energii Battery Protect pełni kluczową rolę w zarządzaniu zasilaniem, zapewniając stabilność pracy urządzeń oraz maksymalną efektywność energetyczną.

Do podstawowych funkcji i zasad działania Battery Protect należą:

- Ochrona przed głębokim rozładowaniem
  - Gdy napięcie akumulatora spadnie poniżej ustawionego progu, Battery Protect automatycznie odłącza odbiorniki, zapobiegając trwałemu uszkodzeniu ogniw.
  - Minimalizuje ryzyko skrócenia żywotności akumulatorów spowodowanego nadmiernym rozładowaniem.
- Ochrona przed przeciążeniem i zwarciem
  - Zabezpiecza instalację przed skutkami nadmiernego poboru prądu przez odbiorniki.
  - W przypadku wykrycia zwarcia natychmiast odcina zasilanie, chroniąc akumulator i układ elektryczny.
- Automatyczne ponowne podłączenie
  - Gdy napięcie akumulatora wróci do bezpiecznego poziomu, Battery Protect ponownie podłącza odbiorniki, co pozwala na ich dalszą pracę bez potrzeby ręcznego resetowania systemu.
- Monitorowanie i sygnalizacja awaryjna
  - Urządzenie często posiada dedykowane wyjście sygnałowe, które może być podłączone do sterownika PLC lub systemu SCADA.
  - Informuje o stanach krytycznych, takich jak niski poziom napięcia, awarie lub przeciążenia.

Battery Protect jest niezbędnym elementem w systemach magazynowania energii, zwłaszcza w instalacjach OFF-Grid, gdzie akumulatory stanowią główne źródło zasilania. Jego znaczenie obejmuje:

- Zwiększenie żywotności akumulatorów - chroni akumulatory przed ekstremalnymi warunkami pracy, co przedłuża ich cykl życia i zmniejsza koszty eksploatacyjne.
- Poprawa stabilności systemu zasilania - zapobiega nagłym wyłączeniom urządzeń poprzez kontrolowane odłączanie odbiorników w sytuacjach krytycznych.
- Bezpieczeństwo i ochrona instalacji - minimalizuje ryzyko uszkodzenia akumulatorów oraz innych elementów systemu w wyniku przeciążeń, przeładowania lub zwarć.
- Integracja z systemem SCADA - umożliwia monitorowanie stanu naładowania akumulatorów i dynamiczne zarządzanie energią w czasie rzeczywistym.

Battery Protect to kluczowy element systemów magazynowania energii, który zapewnia niezawodność i bezpieczeństwo pracy akumulatorów. Jego rola w ochronie przed nadmiernym rozładowaniem, przeciążeniem oraz integracji z systemem sterowania sprawia, że jest on niezbędnym komponentem w nowoczesnych instalacjach OFF-Grid. Dzięki Battery Protect system energetyczny działa stabilnie, a ryzyko awarii jest minimalizowane.

8.2. STANOWISKO BADANIA TURBIN

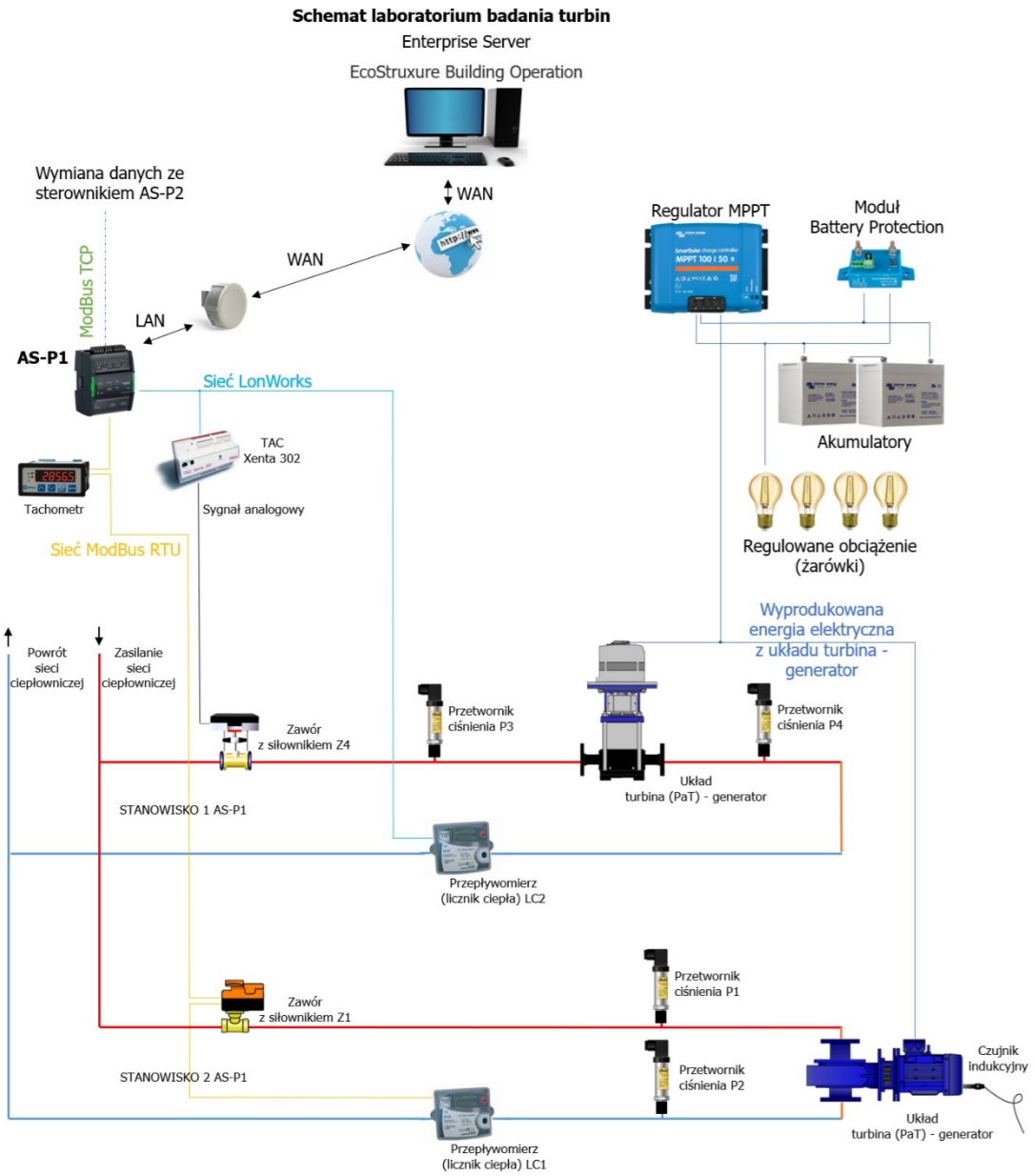
A. Opis układu stanowiska badawczego turbin

W ramach pracy zaprojektowano koncepcję stanowiska badawczego przeznaczonego do analizy pracy turbin wodnych w zmiennych warunkach hydraulicznych oraz ich wpływu na proces konwersji energii mechanicznej w elektryczną. Głównym celem stanowiska jest dokładne zbadanie efektywności turbiny poprzez szczegółową rejestrację kluczowych parametrów, takich jak ciśnienie, przepływ, prędkość obrotowa czy generowana moc elektryczna. Opracowany układ umożliwia kompleksową analizę dynamiki pracy turbiny oraz pozwala na ocenę sprawności energetycznej całego systemu.

Stanowisko badawcze składa się z kilku zasadniczych komponentów, które wspólnie tworzą kompletny układ pomiarowy. W jego skład wchodzą elementy hydrauliczne, mechaniczne oraz elektryczne, a także system

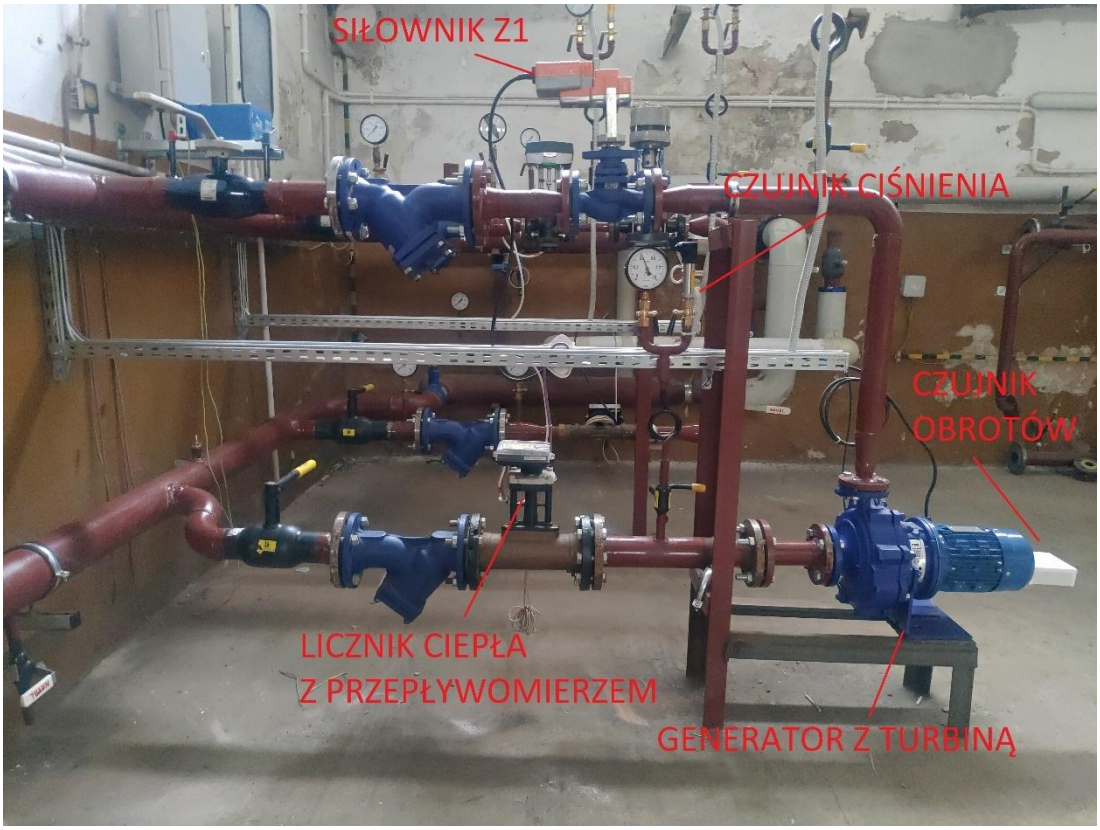
zbierania i analizy danych. Układ hydrauliczny obejmuje zawory sterujące oraz kluczowe przetworniki pomiarowe, takie jak czujniki ciśnienia oraz przepływomierz. Dzięki nim możliwe jest dokładne określenie warunków hydraulicznych, w jakich pracuje turbina, co pozwala na analizę wpływu zmieniających się parametrów na jej wydajność.

Na rysunku 8.4. przedstawiono koncepcję części układu elektrycznego i komunikacji cyfrowej przygotowanego dla stanowiska badawczego badania turbin. Natomiast rysunek 8.5., 8.6. ukazuje fotografię zrealizowanej instalacji.



Rys.8.4. Schemat części instalacji elektrycznej stanowiska badania turbin i komunikacji cyfrowej w protokole ModBus RTU i LonWorks

Rys. 8.5. Gotowa instalacja stanowiska badawczego 1 AS-P1 i 2 ASP-2 – widok rzeczywisty



Rys. 8.6. Gotowa instalacja stanowiska badawczego 2 AS-P1 – widok rzeczywisty

Niezwykle istotnym elementem stanowiska są przetworniki ciśnienia, które umieszczone zostały zarówno przed i za turbiną. Ich zadaniem jest monitorowanie wartości ciśnienia w różnych punktach układu oraz określenie spadku ciśnienia na turbinie, co bezpośrednio przekłada się na ilość dostępnej energii hydraulicznej. Uzyskane dane pozwalają na ocenę wydajności turbiny oraz analizę strat energetycznych w procesie przekształcania energii ciśnienia w energię mechaniczną.

Równocześnie, zastosowany w układzie przepływomierz pełni kluczową rolę w pomiarze natężenia przepływu wody przez turbinę i umożliwia precyzyjną rejestrację ilości cieczy przepływającej przez turbinę. Pomiar ten, w połączeniu z danymi o ciśnieniu, pozwala na obliczenie dostępnej mocy hydraulicznej, a także na analizę wpływu zmian przepływu na sprawność turbiny.

Jednym z kluczowych parametrów opisujących dynamikę pracy turbiny jest jej prędkość obrotowa, którą mierzy tachometr z czujnikiem indukcyjnym umieszczonym bezpośrednio na turbinie. Jego zastosowanie pozwala na bieżącą analizę zmian prędkości obrotowej w zależności od warunków hydraulicznych, a także na określenie optymalnych parametrów pracy turbiny przy różnych wartościach przepływu i ciśnienia.

Po stronie elektrycznej układ został wyposażony w licznik energii elektrycznej, który odpowiada za monitorowanie parametrów generowanej energii, takich jak napięcie, prąd oraz moc. Urządzenie to umożliwia precyzyjną ocenę efektywności konwersji energii mechanicznej na elektryczną, co pozwala na określenie sprawności całkowitej układu oraz stabilności pracy generatora.

Ważnym aspektem badawczym jest również zastosowanie układu obciążenia w postaci zestawu żarówek, który pozwala na symulację zmiennych warunków pracy generatora. Dzięki możliwości regulacji obciążenia możliwe jest przeprowadzenie testów stabilności napięcia oraz analiza wpływu zmian mocy obciążenia na dynamikę pracy turbiny i generatora.

Dane rejestrowane przez wszystkie czujniki i liczniki są zbierane oraz przetwarzane przez system akwizycji danych, który umożliwia ich analizę w czasie rzeczywistym. System ten pozwala na zapis wyników pomiarowych oraz ich dalszą obróbkę, co umożliwia dokładną ocenę charakterystyk pracy turbiny w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Opracowane stanowisko badawcze stanowi kompleksowe narzędzie do analizy pracy turbin wodnych, pozwalając na szczegółowe badanie każdego etapu procesu konwersji energii – od warunków hydraulicznych, przez transformację energii mechanicznej, aż po finalną produkcję energii elektrycznej. Dzięki zastosowanym urządzeniom pomiarowym możliwe jest nie tylko określenie sprawności turbiny, ale także identyfikacja czynników wpływających na jej wydajność i stabilność pracy. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do optymalizacji parametrów eksploatacyjnych turbin oraz ich lepszego dostosowania do rzeczywistych warunków pracy.

B. Cel stanowiska

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane w celu analizy pracy turbin wodnych oraz ich współpracy z generatorami elektrycznymi w systemach OFF-Grid. Jego głównym zadaniem jest umożliwienie pomiarów parametrów pracy turbiny, takich jak prędkość obrotowa, w zależności od zmieniających się parametrów cieczy napędzającej turbinę, takich jak ciśnienie i przepływ. Dzięki temu możliwa jest ocena wpływu tych parametrów na pracę generatora, który jest napędzany przez turbinę. Pozwala to na ocenę efektywności oraz wydajności urządzenia.

C. Elementy stanowiska

- Turbina wodna – działa na zasadzie zamiany energii kinetycznej płynącej wody na energię mechaniczną. Przepływająca przez nią woda napędza wirnik, który z kolei obraca wał podłączony do generatora elektrycznego.
- Generator elektryczny – zamienia energię mechaniczną turbiny na energię elektryczną.
- Mostek prostowniczy – konwertuje napięcie zmienne z generatora na napięcie stałe.
- Regulator MPPT – optymalizuje wykorzystanie energii generowanej przez turbinę i dostosowuje parametry ładowania akumulatorów.
- Akumulatory – magazynuje energię elektryczną.
- Liczniki elektryczne z komunikacją – monitorują parametry elektryczne w czasie rzeczywistym i przesyłają dane o napięciu, prądzie i mocy.

- Tachometr z komunikacją – mierzy prędkość obrotową wału generatora i przesyła dane do SCADA.
- Regulowane obciążenie - kontrolowane zmiany obciążenia. W badaniach wykorzystano żarówki jako elementy realizujące obciążenie, co pozwala na precyzyjne dopasowanie poboru mocy i analizę zachowania układu w różnych scenariuszach testowych.
- PLC - programowalny sterownik logiczny, który koordynuje działanie całego stanowiska badawczego. Odpowiada za przetwarzanie sygnałów z czujników, sterowanie elementami wykonawczymi oraz komunikację z systemem SCADA. Dzięki PLC możliwa jest automatyzacja testów, precyzyjna kontrola procesów oraz szybkie reagowanie na zmiany parametrów pracy układu.
- System SCADA - umożliwia zdalne sterowanie, monitorowanie i archiwizację danych.
- Siłownik – steruje warunkami pracy turbiny, pozwalając na dostosowanie przepływu wody.

D. Zasada działania stanowiska

Poprzez regulację przepływu wody, siłowniki zaworów sterują warunkami pracy turbiny wodnej napędzającej generator. Sterownik PLC pozwala na zdalne sterowanie i monitorowanie siłownika oraz mierzonych parametrów sieci ciepłowniczej oraz urządzeń z poziomu systemu SCADA. Turbina napędza generator, który produkuje energię elektryczną. Na stanowisku możliwe jest zbadanie wpływu zmiany obciążenia, na parametry pracy badanego układu.

E. Badane parametry

W ramach badań na stanowisku testowym analizowane są kluczowe parametry pracy turbiny wodnej, takie jak prędkość obrotowa wału, strumień objętościowy czynnika roboczego przepływającego przez turbinę, ciśnienie na jej wlocie i wylocie oraz jej wpływ na działanie generatora elektrycznego. Testy umożliwiają ocenę wydajności systemu, czyli jego zdolności do efektywnego przetwarzania energii hydraulicznej w energię elektryczną oraz utrzymania stabilnych parametrów pracy w zmiennych warunkach.

F. Komunikacja i zdalne sterowanie

System SCADA umożliwia wizualizację parametrów, zdalne sterowanie oraz archiwizację danych.

Stanowisko badawcze pozwala na dokładną ocenę funkcjonowania systemu w różnych warunkach pracy, co umożliwia optymalizację jego działania oraz lepsze dostosowanie do realnych zastosowań w systemach OFF-Grid.

G. Konfiguracja stanowiska badawczego

Stanowisko badania turbin składa się z dwóch niezależnych układów pomiarowo-badawczych, oznaczonych jako 1-AS-P1 i 1-AS-P2.

Na stanowisku 1 AS-P1 zastosowano:

- Turbina wodna: Movitech VCF 2/5B firmy KSB, o mocy 0,37 kW, przy częstotliwości 50 Hz, wydatku przepływu Q = 1,86 m³/h, wysokości podnoszenia h = 29,5 m oraz prędkości nominalnej 2900 obr./min.
- Generator: Alternator A0108, współpracujący z turbiną w celu przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną.
- Licznik ciepła: Itron CF-55 (LC2), komunikujący się poprzez sieć LonWorks.
- Siłownik Z4: M800 Schneider Electric, sterowany sygnałem analogowym poprzez sterownik TAC Xenta 302.

Na stanowisku 2 AS-P1 użyto:

- Turbina wodna: KSB ETB 040-025-200 Etabloc, o wydatku przepływu Q = 4,54 m³/h, wysokości podnoszenia h = 13,11 m, lepkości czynnika v = 1 mm²/s i prędkości obrotowej 1450 obr./min.
- Generator: GenerVolt GV90L-10, o mocy 0,5 kW, napięciu 24 V, prądzie znamionowym 12 A, częstotliwości 116 Hz i prędkości obrotowej od 1400 do maksymalnie 1750 obr./min.
- Licznik ciepła: Itron CF-55 (LC1), komunikujący się w sieci ModBus RTU.
- Siłownik Z1: NVK24A-MOD Belimo, komunikujący się poprzez ModBus RTU.

W obu układach dodatkowo wykorzystano:

- Regulator MPPT: Victron Energy BlueSolar MPPT 75/10 – optymalizator mocy do ładowania akumulatorów.

- Moduł Battery Protection: Victron Energy – ochrona akumulatorów przed przeładowaniem i głębokim rozładowaniem.
- Akumulatory AGM: Victron Energy Deep Cycle Fullriver DC12-12 – magazynowanie energii elektrycznej.
- PLC: SmartX Controller AS-P (laboratorium 1, AS-P1) – sterowanie całością procesu i komunikacja z SCADA.
- System SCADA: EcoStruxure Building Operation – monitorowanie, sterowanie i archiwizacja danych.
- Przetworniki napięcia: F&F – pomiar napięć na urządzeniach.
- Miernik parametrów sieci: Nemo – pomiar napięcia, prądu i mocy elektrycznej.
- Przetworniki ciśnienia: Aplisens AS, zakres pomiarowy 0–16 bar, sygnał 4–20 mA.
- Tachometr z komunikacją ModBus – pomiar prędkości obrotowej wału i przesył danych pomiarowych do PLC.

8.2.1. INTEGRACJA STANOWISKA BADANIA TURBIN Z SYSTEMEM SCADA

Integracja stanowiska badania turbin została zrealizowana w oparciu o sieć komunikacyjną składającą się z magistral LonWorks oraz ModBus RTU. Komunikacja pomiędzy urządzeniami pomiarowymi, wykonawczymi i sterującymi była realizowana za pomocą transmisji szeregowej RS485 (dla ModBus RTU) oraz sieci LonWorks FT-10A.

Typy mediów transmisyjnych wykorzystanych w instalacji:

- RS485 – dla urządzeń komunikujących się poprzez ModBus RTU (liczniki ciepła LC1, siłowniki Z1, tachometr, wybrane urządzenia pomiarowe).
- LonWorks FT-10A – dla urządzeń komunikujących się w sieci LonWorks (liczniki ciepła LC2, siłowniki Z4).
- Ethernet TCP/IP – dla komunikacji sterowników AS-P z systemem SCADA.

Klasa i rodzaj sygnałów pomiarowych:

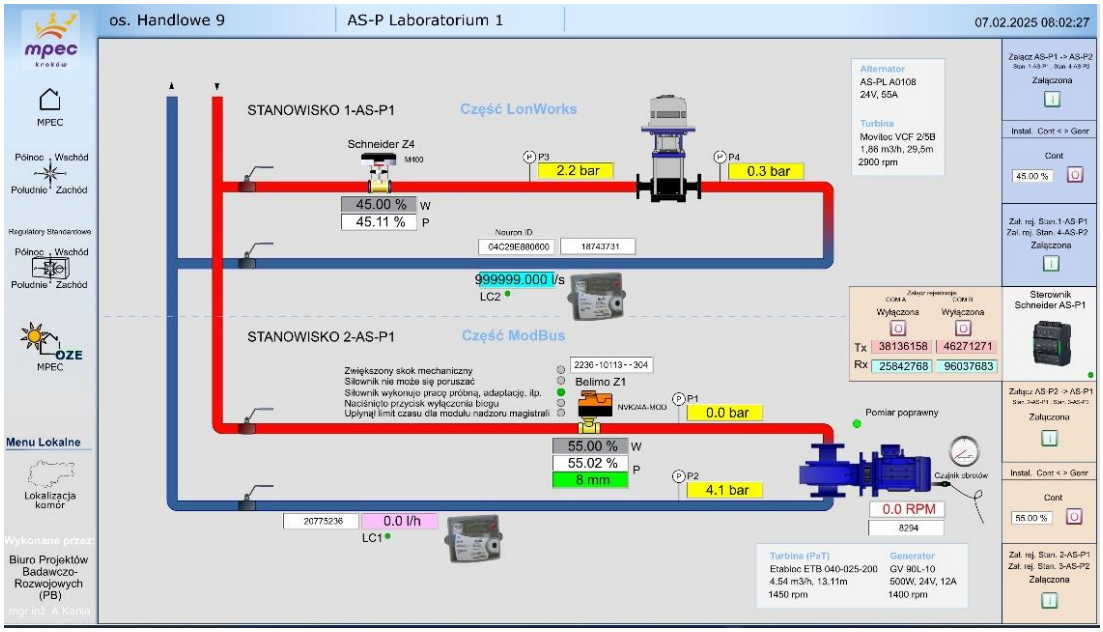
- Sygnały analogowe:
  - Napięcie i prąd elektryczny (pomiar przez przetworniki napięcia i miernik Nemo).

  - Ciśnienie hydrauliczne (przetworniki ciśnienia Aplisens AS, 4–20 mA).
  - Prędkość obrotowa wału (tachometr, pomiar przeliczany cyfrowo).
- Sygnały cyfrowe:
  - Dane z tachometru, liczników energii oraz siłowników przesyłane w postaci cyfrowej (ModBus/LonWorks).
  - Komendy sterujące i statusy urządzeń (przez PLC i SCADA).

Wszystkie dane były zbierane w czasie rzeczywistym przez system SCADA, który umożliwiał wizualizację parametrów pracy turbiny, generowanie alarmów, tworzenie wykresów i prowadzenie archiwizacji danych. Dzięki temu uzyskano kompleksową kontrolę nad stanowiskiem badawczym, umożliwiając pełną automatyzację procesu testowania i analizy pracy turbin wodnych.

Wizualizacja stanowiska badawczego turbin w systemie SCADA umożliwiła nie tylko pełną kontrolę nad procesem testowym, ale również dogłębną analizę parametrów układu w sposób intuicyjny i przystępny dla użytkownika. Dzięki wdrożeniu SCADA możliwe stało się śledzenie w czasie rzeczywistym kluczowych parametrów pracy turbiny, takich jak ciśnienie, prędkość obrotowa, moc generowana przez układ oraz charakterystyki przepływu czynnika roboczego.

Użytkownik może w sposób dynamiczny analizować zmiany parametrów oraz ich wzajemne zależności. Przykładowo, wizualizacja trendów zmian napięcia i prędkości obrotowej pozwala na określenie optymalnych warunków pracy turbiny, co jest niezwykle istotne w kontekście systemów OFF-Grid. System SCADA umożliwia także analizę danych historycznych, co pozwala na identyfikację nieprawidłowości oraz potencjalnych problemów eksploatacyjnych.



Rys.8.7. Wizualizacja stanowiska badawczego turbin z systemami komunikacji LonWorks i ModBus w środowisku SCADA

Na rysunku 8.7. przedstawiono stanowisko badawcze turbin wodnych zintegrowane z systemem SCADA. Schemat ukazuje poszczególne elementy układu, w tym turbinę wodną, generator elektryczny, czujniki pomiarowe.

Integracja z systemem SCADA pozwoliła na wprowadzenie funkcji alarmowania i powiadomień o przekroczeniu krytycznych wartości parametrów.

Wprowadzenie wizualizacji pozwala na tworzenie wykresów i tabel, co jest szczególnie istotne w kontekście badań. Dodatkowo możliwe jest zautomatyzowanie procedury testowej pozwalając na przeprowadzanie badań zgodnie z wcześniej określonymi algorytmami, co minimalizuje ryzyko błędów ludzkich i zwiększa powtarzalność eksperymentów.

8.3. INSTALACJA KOMORY CIEPŁOWNICZEJ ZASILANEJ W SPOSÓB OFF-GRID

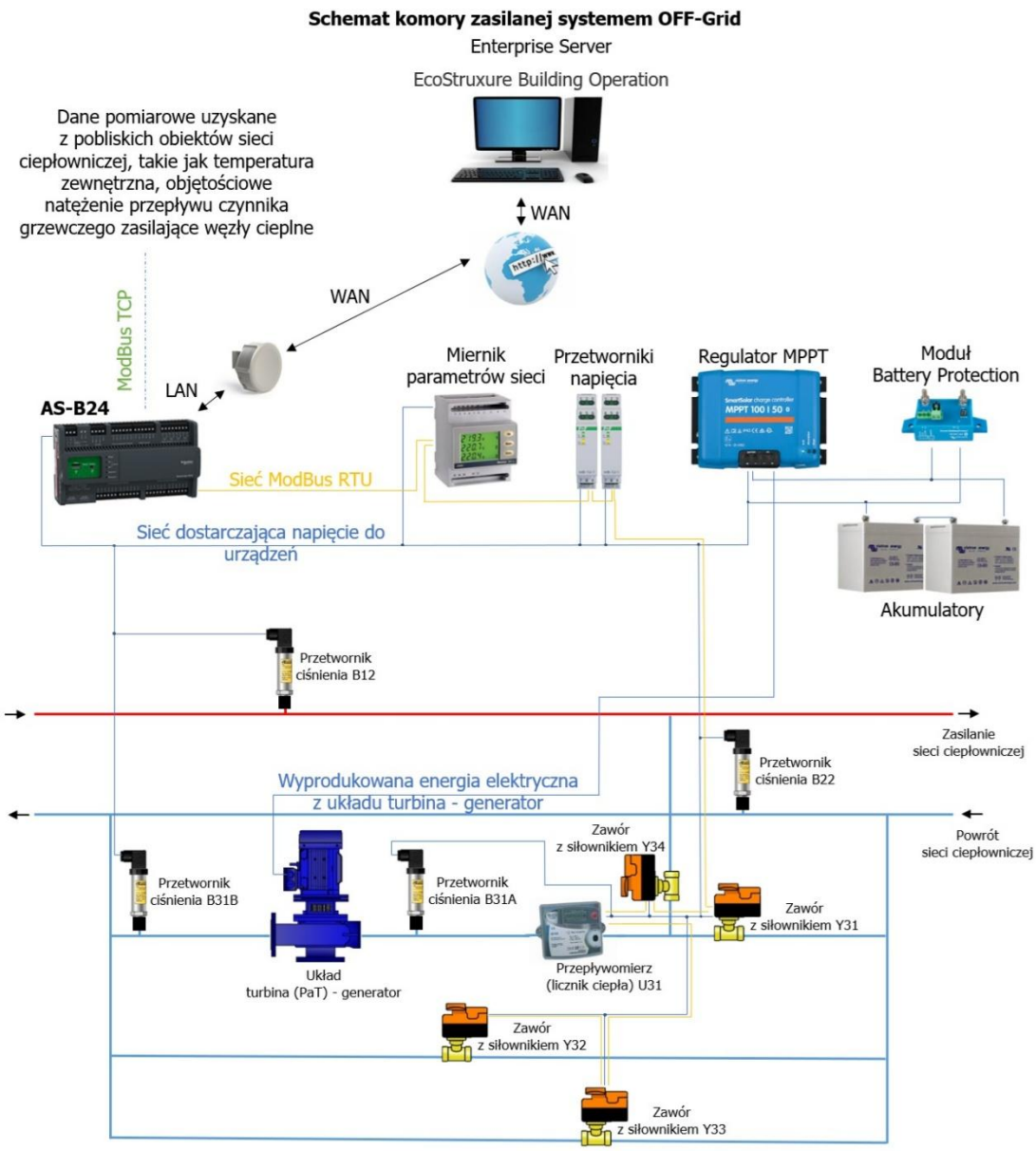
A. Cel instalacji

Celem instalacji jest stworzenie autonomicznego systemu zasilania dla urządzeń sterujących i pomiarowych w komorze ciepłowniczej, działającego niezależnie od zewnętrznej sieci elektroenergetycznej.

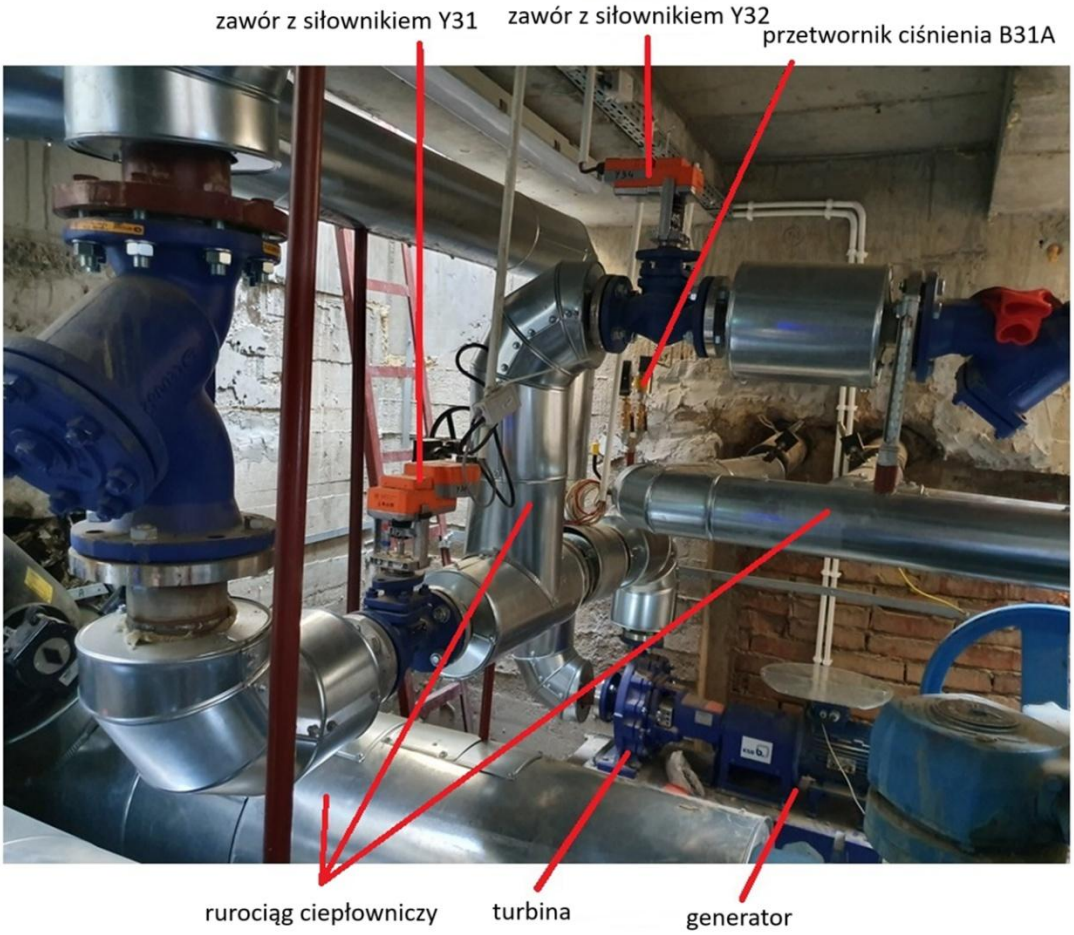
System OFF-Grid w komorze ciepłowniczej wykorzystuje energię uzyskaną z przepływu czynnika grzewczego do zasilania urządzeń sterujących i pomiarowych. Komora ciepłownicza wyposażona w układ zasilania OFF-Grid to autonomiczny system energetyczny, który działa niezależnie od zewnętrznej sieci elektroenergetycznej.

Głównym źródłem energii w instalacji jest pompa w ruchu turbinowym napędzana przepływem czynnika grzewczego w sieci ciepłowniczej, która zasila generator elektryczny. Energia elektryczna produkowana przez generator jest wykorzystywana do zasilania urządzeń sterujących, pomiarowych oraz zabezpieczających instalację ciepłowniczą.

Na rysunku 8.8. przedstawiono część układu elektrycznego i komunikacji cyfrowej instalacji komory ciepłowniczej zasilaniej w sposób OFF-Grid. Natomiast rysunek 8.9. ukazuje fotografię zrealizowanej instalacji



Rys.8.8. Schemat części instalacji elektrycznej i komunikacji cyfrowej w protokole ModBus RTU i TCP komory ciepłowniczej zasilanej OFF-Grid



Rys. 8.9. Gotowa instalacja komory ciepłowniczej zasilanej wyspowo – widok rzeczywisty

B. Elementy instalacji

Instalacja składa się z kilku kluczowych podzespołów:

- Układ generowania energii
  - Turbina wodna
    - Wykorzystuje energię hydrauliczną czynnika grzewczego do napędzania generatora.
    - Przepływ przez turbinę regulowany jest przez zawory sterujące.
  - Generator elektryczny
    - Wytwarza energię elektryczną na potrzeby systemu.
    - Pracuje w trybie niezależnym, dostosowując się do zmiennych warunków hydraulicznych.
  - Mostek prostowniczy

        - Konwertuje napięcie zmienne generowane przez turbinę na napięcie stałe dla odbiorników.
    - Regulator MPPT
        - Optymalizuje proces ładowania akumulatorów poprzez maksymalne wykorzystanie dostępnej mocy.
        - Dostosowuje napięcie i prąd do wymagań odbiorników.
    - Akumulatory
        - Magazynują energię elektryczną na potrzeby zasilania odbiorników w trybie autonomicznym.
        - Połączone szeregowo, aby uzyskać napięcie 24V.
    - Moduł Battery Protection
    - Chroni akumulatory przed nadmiernym rozładowaniem i przeciążeniem.
    - Odpowiada za sygnalizację stanów awaryjnych.
- Układ odbiorczy i sterujący
    - Szafy sterownicze wyposażona w sterownik PLC, liczniki elektryczne, bezpieczniki itp.
    - Napędy zaworów regulacyjnych sterujące przepływem czynnika grzewczego.
    - Pompa odwadniająca zapewniająca bezpieczeństwo instalacji.
    - Instalacja oświetleniowa umożliwiająca serwisowanie i monitoring urządzeń.

C. Zasada działania systemu

Zespół turbina - generator konwertuje energię hydrauliczną przepływającego czynnika grzewczego na energię elektryczną, która jest magazynowana w akumulatorach i dostarczana do odbiorników.

Struktura i obieg energii elektrycznej w systemie OFF-Grid:

- Energia wejściowa
    - Pochodzi z turbiny wodnej, która zamienia energię czynnika przepływającego na energię mechaniczną napędzającą generator.
    - Generator zasila regulator MPPT, który dostarcza energię pomiędzy odbiorniki i akumulatory.

- Magazynowanie energii
  - Nadwyżka energii wytwarzanej przez turbinę jest magazynowana w akumulatorach, które pozwalają na stabilne zasilanie systemu OFF-Grid.
  - Moduł Battery Protection zapobiega nadmiernemu rozładowaniu akumulatorów.
- Dystrybucja energii
  - Energia z akumulatorów i generatora jest dystrybuowana do odbiorników, takich jak zawory regulacyjne, sterowniki, przetworniki ciśnienia i oświetlenie.
  - W przypadku niewystarczającej ilości energii z generatora, układ pobiera energię zmagazynowaną w akumulatorach.

G. Modernizacja układu i jego efekty

Przed modernizacją, komora ciepłownicza działała bez systemu monitorowania i zasilania elektrycznego. W ramach wdrożenia zasilania OFF-Grid:

- Dodano turbinę i generator, co umożliwiło lokalną produkcję energii.
- Wprowadzono inteligentne sterowanie zaworami regulacyjnymi, co poprawiło efektywność pracy sieci ciepłowniczej.
- Zastosowano system SCADA, który umożliwia zdalne sterowanie i monitoring instalacji.
- Zastosowano układ magazynowania energii, co pozwala na pracę komory niezależnie od sieci elektroenergetycznej.

H. Komunikacja i zdalne sterowanie

System SCADA umożliwia monitorowanie i sterowanie pracą komory, archiwizację danych oraz integrację z siecią ciepłowniczą. Wizualizuje schemat technologiczny instalacji w czasie rzeczywistym.

System SCADA odgrywa kluczową rolę w zarządzaniu komorą ciepłowniczą:

- Zdalne sterowanie zaworami – operator może regulować przepływ czynnika bez fizycznej obecności w komorze na przykład w czasie awarii.
- Monitorowanie parametrów pracy – SCADA zbiera dane o ciśnieniu, przepływie i napięciu generowanym przez turbinę.

- Archiwizacja danych – diagnostyka awarii i pracy instalacji.

W przyszłości umożliwi:

- Automatyczną analizę danych – umożliwi optymalizację pracy systemu i diagnostykę awarii.
- Integrację z inteligentną siecią ciepłowniczą – możliwość dostosowania pracy komory do bieżącego zapotrzebowania na ciepło.

I. Wdrożenie systemu OFF-Grid w komorze ciepłowniczej ma na celu:

- Zwiększenie efektywności energetycznej poprzez wykorzystanie energii odzyskanej z przepływu czynnika grzewczego.
- Zasilanie układów sterujących i pomiarowych bez potrzeby podłączenia do sieci elektroenergetycznej.
- Zwiększenie niezależności operacyjnej i umożliwienie pracy komory nawet w przypadku awarii sieci elektrycznej.
- Integrację z systemem SCADA, co pozwala na pełną automatyzację i zdalne monitorowanie pracy układu i sieci ciepłowniczej.

J. Oczekiwane wyniki i zastosowania

Modernizacja komory ciepłowniczej poprzez wdrożenie systemu OFF-Grid przyniosła szereg korzyści:

A. Autonomia energetyczna – komora może pracować niezależnie od sieci elektroenergetycznej.
B. Oszczędność energii – wykorzystanie energii odzyskanej z przepływu czynnika grzewczego.
C. Optymalizacja zarządzania ciepłem – sterowanie zaworami poprawia stabilność sieci ciepłowniczej.
D. Zdalne sterowanie i monitorowanie – dzięki SCADA operator może zarządzać systemem w czasie rzeczywistym.

Poprawa bezpieczeństwa – monitoring SCADA minimalizują ryzyko awarii sieci ciepłowniczej.

K. Konfiguracja stanowiska badawczego

Instalacja komory ciepłowniczej pracująca w trybie OFF-Grid została wyposażona w następujące urządzenia i komponenty:

- Turbina wodna: ETN 050-032-250 GG firmy KSB, wykorzystująca przepływ czynnika grzewczego do napędu generatora.

- Generator elektryczny: Gener Volt GV100L-8, o mocy 2 kVA, napięciu wyjściowym 28 V, prądzie znamionowym 41,9 A, prędkości obrotowej 1020 obr./min i częstotliwości pracy 68 Hz.
- Regulator MPPT: Victron Energy BlueSolar MPPT 100/50, odpowiedzialny za maksymalizację wykorzystania mocy wytwarzanej przez generator i optymalizację procesu ładowania akumulatorów.
- Moduł Battery Protection: Victron Energy, zabezpieczający akumulatory przed przeładowaniem oraz głębokim rozładowaniem.
- Akumulatory AGM: Victron Energy Deep Cycle, 12 V, 60 Ah, przeznaczone do magazynowania energii elektrycznej.
- PLC: SmartX Controller AS-B-24, odpowiedzialny za sterowanie procesami, monitorowanie danych pomiarowych oraz komunikację z systemem nadrzędnym.
- System SCADA: EcoStruxure Building Operation, zapewniający zdalne monitorowanie parametrów systemu, archiwizację danych i wizualizację stanu instalacji w czasie rzeczywistym.
- Przetworniki napięcia: F&F, służące do pomiaru napięć w układzie elektrycznym.
- Miernik parametrów sieci: Nemo, umożliwiający pomiar napięcia, prądu oraz mocy elektrycznej produkowanej i zużywanej w instalacji.
- Przetworniki ciśnienia: Aplisens AS, o zakresie 0–16 bar, sygnał wyjściowy 4–20 mA, zamontowane w punktach pomiarowych B12, B22, B31A, B31B, umożliwiające dokładny monitoring warunków hydraulicznych.
- Siłowniki firmy Belimo: modele z komunikacją ModBus RTU, odpowiedzialne za sterowanie przepływem czynnika grzewczego (Y31, Y32, Y33, Y34).
- Licznik ciepła: Itron CF-55 (oznaczenie U31), komunikujący się w sieci ModBus RTU.

Dzięki wdrożeniu systemu OFF-Grid, komora ciepłownicza stała się w pełni autonomicznym, inteligentnym obiektem, który nie tylko pozwala lokalnie monitorować sieć ciepłowniczą, ale także umożliwia jej sterowaniem zwiększając w ten sposób niezawodność pracy sieci ciepłowniczej.

8.3.1. INTEGRACJA KOMORY O ZASILANIU OFF-GRID Z SYSTEMEM SCADA

Integracja urządzeń w instalacji komory ciepłowniczej została przeprowadzona poprzez zastosowanie standardowych protokołów komunikacyjnych, zapewniających spójność, niezawodność i zdalne monitorowanie całego układu.

Typy mediów transmisyjnych wykorzystanych w instalacji:

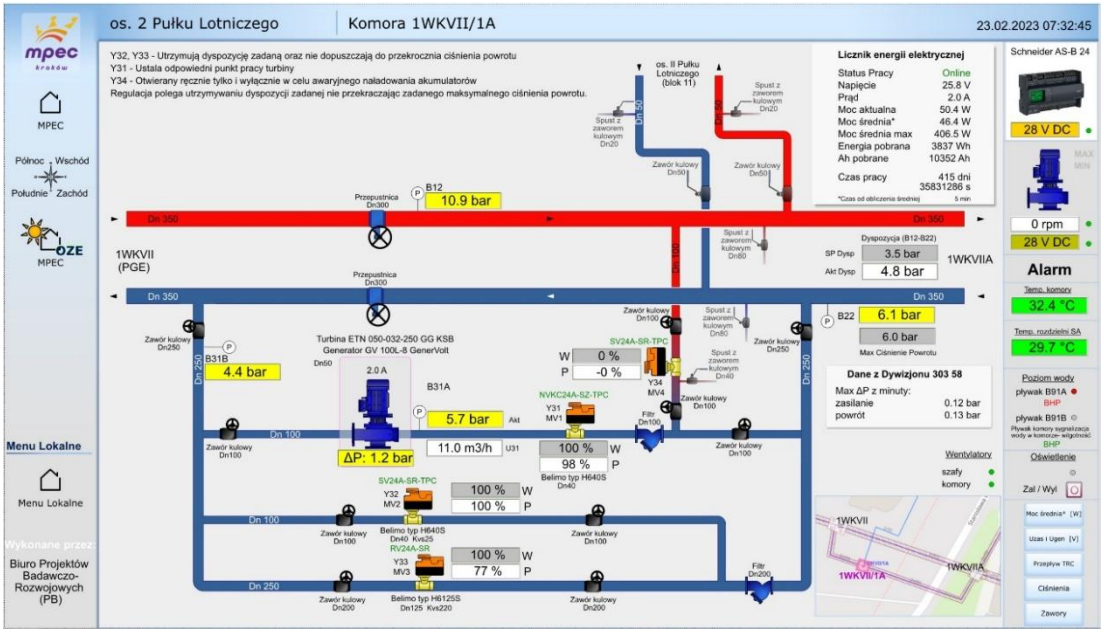
- RS485 – dla komunikacji urządzeń obsługujących ModBus RTU, takich jak siłowniki Belimo i licznik ciepła Itron CF-55 (U31).
- Ethernet TCP/IP – dla połączenia sterownika PLC AS-B-24 z systemem SCADA EcoStruxure Building Operation.
- Sygnały analogowe 4–20 mA – z przetworników ciśnienia Aplisens, przesyłające precyzyjne dane o ciśnieniu w układzie hydraulicznym.

Klasa i rodzaj sygnałów pomiarowych:

- Sygnały analogowe:
  - Komendy sterujące i statusy siłowników Belimo.
  - Napięcie i prąd elektryczny (miernik Nemo, przetworniki napięcia F&F).
  - Ciśnienie hydrauliczne (przetworniki Aplisens 4–20 mA).
  - Parametry objętościowego strumienia czynnika grzewczego (licznik ciepła Itron CF-55).
- Sygnały cyfrowe:
  - Możliwe komendy sterujące i statusy siłowników Belimo.
  - Statusy urządzeń przesyłane przez PLC do systemu SCADA.

System SCADA zbierał dane w czasie rzeczywistym, umożliwiając ich dynamiczną analizę, prezentację trendów oraz archiwizację wyników pomiarowych. Dzięki zastosowanej strukturze komunikacyjnej możliwe było pełne zarządzanie instalacją komory ciepłowniczej w trybie OFF-Grid, zapewniając autonomię energetyczną i zwiększając niezawodność układu nawet przy zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Integracja komory ciepłowniczej, działającej w trybie OFF-Grid, z systemem SCADA umożliwiła pełną kontrolę nad procesem zarządzania energią oraz jej efektywne wykorzystanie w układzie autonomicznym. Komora ciepłownicza została wyposażona w niezależny system energetyczny, wykorzystujący turbinę wodną do generacji energii elektrycznej, która następnie zasila systemy sterowania, pomiarowe oraz zabezpieczające instalację ciepłowniczą.

Dzięki wdrożeniu SCADA operatorzy mają możliwość monitorowania pracy całego układu w czasie rzeczywistym. System zbiera dane dotyczące temperatury, ciśnienia, przepływu czynnika grzewczego oraz parametrów elektrycznych, takich jak napięcie i poziom naładowania akumulatorów. Dane te można prezentować w formie wykresów, umożliwiając analizę trendów oraz prognozowanie przyszłych stanów systemu. SCADA pozwala również na automatyczne sterowanie zaworami regulacyjnymi, co znacząco wpływa na optymalizację pracy sieci ciepłowniczej oraz układu dostarczającego energii potrzebnej do zasilenia obiektu.



Rys. 8.10. Wizualizacja instalacji OFF-Grid w systemie SCADA dla układu zarządzania energią i przepływem czynnika grzewczego

Na rysunku 8.10. przedstawiono schemat wizualizacji komory ciepłowniczej w systemie SCADA. Widoczna jest turbina wodna, której energia mechaniczna przekształcana jest w energię elektryczną za pomocą generatora. Energia ta zasila układy sterowania, pomiarowe i zabezpieczające instalację ciepłowniczą. Dodatkowo, system SCADA zapewnia komunikację między komponentami układu, umożliwiając zdalne monitorowanie parametrów pracy, takich jak temperatura, ciśnienie oraz napięcie. System SCADA pozwala przedstawienie dynamiczne wykresów oraz schematów, które ilustrują pracę komory i pozwalają operatorowi analizować zmiany parametrów w czasie rzeczywistym.

Ważnym elementem integracji było także wprowadzenie systemu alarmowania i powiadomień o nieprawidłowościach. W przypadku wykrycia anomalii, takich jak nadmierny spadek napięcia, przegrzanie czy przekroczenie dopuszczalnego ciśnienia, system natychmiast powiadamia operatora, co pozwala na szybką reakcję i minimalizację ryzyka awarii. Zastosowanie SCADA w komorze ciepłowniczej umożliwiło nie tylko poprawę bezpieczeństwa i stabilności działania instalacji, ale również optymalizację zarządzania energią. Analiza danych pozwala na dostosowanie strategii sterowania do aktualnych potrzeb systemu.

Dzięki zastosowaniu SCADA w systemach badawczych oraz autonomicznych układach zasilania, możliwe stało się osiągnięcie pełnej kontroli nad procesami energetycznymi, optymalizacja ich działania oraz zwiększenie niezawodności całych instalacji. W efekcie stanowiska badawcze oraz komora ciepłownicza stały się bardziej efektywnymi i inteligentnymi systemami, które mogą być wykorzystywane zarówno w badaniach naukowych, jak i w praktycznych zastosowaniach przemysłowych.

Układ zasilania OFF-Grid wykorzystywał dane pozyskiwane z innego obiektu ciepłowniczego, przesyłane za pomocą protokołu ModBus TCP. Informacje dotyczące temperatury zewnętrznej oraz przepływów czynnika grzewczego w instalacjach były wykorzystywane do sterowania systemem.

9. STANOWISKA BADANIA TRANSMISJI DANYCH

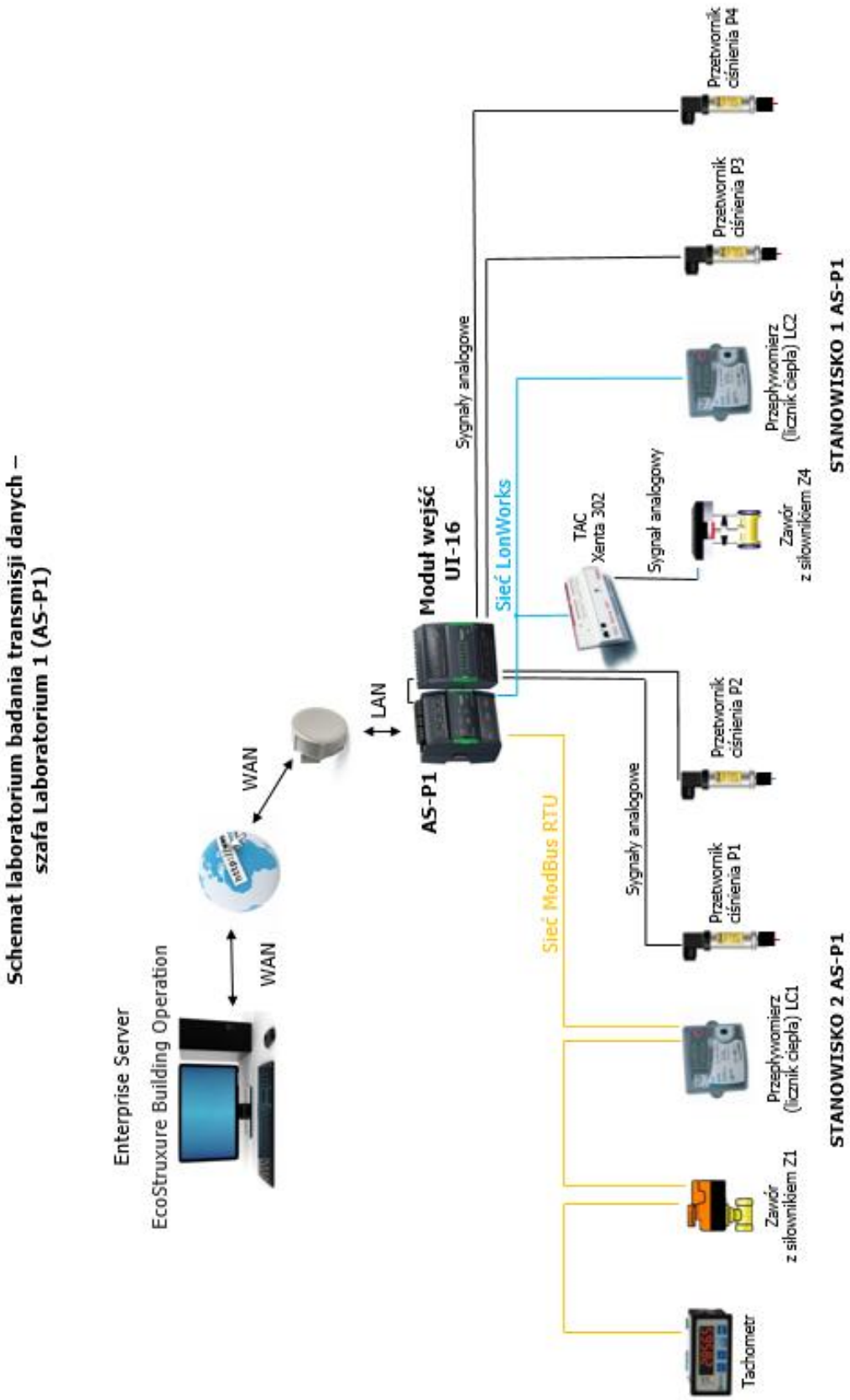
W ramach realizacji pracy badawczej zaprojektowano i wykonano stanowisko do analizy oraz testowania komunikacji pomiędzy sterownikami PLC. System składa się z dwóch szaf sterowniczo-komunikacyjnych, oznaczonych jako Laboratorium 1 oraz Laboratorium 2, których zdjęcia przedstawiono na rysunkach 9.1. i 9.3.

Laboratorium 1 (AS-P1) pełni podwójną funkcję – jest wykorzystywane zarówno do badań komunikacji, jak i jako stanowisko testowe dla systemów sterowania turbinami. W szafie tej zastosowano sterownik AS-P (AS-P1), będący programowalnym kontrolerem marki Schneider Electric z rodziny EcoStruxure Building Operation. Urządzenie to, jako zaawansowany serwer automatyki, umożliwia integrację i sterowanie różnymi systemami przemysłowymi, obsługując standardy komunikacyjne takie jak ModBus, BACnet, KNX oraz LonWorks.

Laboratorium 2 (AS-P2) zostało dedykowane wyłącznie do badań komunikacyjnych. W jego konfiguracji wykorzystano sterownik AS-P (AS-P2), identyczny technicznie z AS-P1, lecz przypisany do odrębnego układu badawczego.

Dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu obu stanowisk możliwe było przeprowadzenie testów i analiz różnych protokołów komunikacyjnych, takich jak ModBus TCP, ModBus RTU oraz LonWorks, w warunkach symulujących rzeczywiste środowisko przemysłowe. Stanowiska pozwalają na wszechstronną ocenę efektywności transmisji danych, stabilności komunikacji oraz wzajemnej integracji urządzeń pracujących w różnych architekturach sieciowych.

Rys. 9.1. Szafa sterowniczo-komunikacyjna – Laboratorium 1, wyposażona w sterownik AS-P1, wykorzystywana do badań komunikacji oraz jako stanowisko testowe do badania turbin



Rys. 9.2. Schemat szafy Laboratorium 1 badania transmisji danych

Na rysunku 9.2. przedstawiono schemat szafy sterowniczej Laboratorium 1 (AS-P1). Schemat ilustruje podział urządzeń komunikacyjnych przypisanych do dwóch stanowisk badawczych: Stanowiska 1 AS-P1 oraz Stanowiska 2 AS-P1.

Sterownik AS-P1 (SmartX Controller firmy Schneider Electric) jest centralnym elementem układu i został połączony:

- z modułem wejść analogowych UI-16 firmy Schneider Electric,
- oraz ze sterownikiem TAC Xenta 302 za pomocą magistrali LonWorks.

Urządzenia przypisane do Stanowiska 1 AS-P1 komunikują się w sieci LonWorks:

- licznik ciepła CF-55 (LC2),
- siłownik Z4, który komunikuje się pośrednio poprzez sterownik TAC Xenta 302 (Xenta przekształca sygnały na sygnały analogowe sterujące siłownikiem).

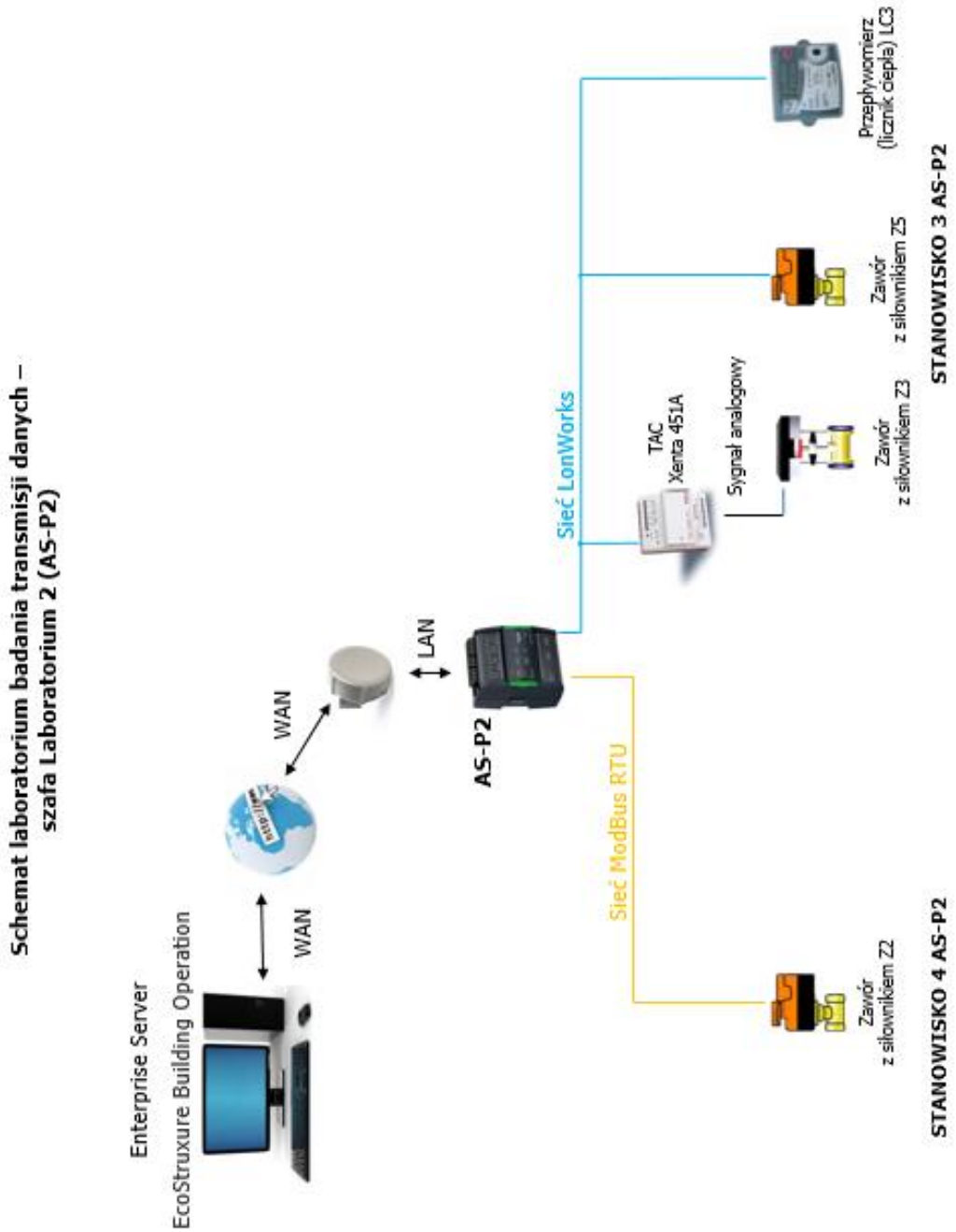
Urządzenia przypisane do Stanowiska 2 AS-P1 zostały zintegrowane w sieci ModBus RTU:

- siłownik Z1 (Belimo NVK24A-MOD),
- licznik ciepła CF-55 (LC1),
- tachometr, przesyłający prędkość obrotową w formacie cyfrowym.

Przetworniki ciśnienia przypisane do stanowisk P1, P2, P3 i P4 zostały połączone przewodowo (kablami ekranowanymi), przesyłając sygnały analogowe (4–20 mA) bezpośrednio do modułu wejść analogowych UI-16.

W szafie znajdują się również inne elementy, takie jak bezpieczniki, zasilacze oraz dodatkowe moduły komunikacyjne, które nie zostały umieszczone na przedstawionym schemacie ze względu na ich pomocniczy charakter bądź brak bezpośredniego udziału w procesie badania i analizy komunikacji

Rys. 9.3. Szafa sterowniczo-komunikacyjna – Laboratorium 2, wyposażona w sterownik AS-P2, przeznaczona do badań komunikacji



Rys. 9.4. Schemat szafy Laboratorium 2 badania transmisji danych

Na rysunku 9.4. przedstawiono schemat szafy sterowniczej Laboratorium 2 (AS-P2). Schemat ilustruje podział urządzeń komunikacyjnych przypisanych do dwóch stanowisk badawczych: Stanowiska 3 AS-P2 oraz Stanowiska 4 AS-P2.

Sterownik AS-P2 (SmartX Controller firmy Schneider Electric) jest centralnym elementem układu i został połączony:

- z modułem wyjść TAC Xenta 451A poprzez magistralę LonWorks.

Urządzenia przypisane do Stanowiska 3 (AS-P2) komunikują się w sieci LonWorks:

- licznik ciepła CF-55 (LC3),
- siłownik Z5, komunikujący się bezpośrednio w sieci LonWorks,
- siłownik Z3, który komunikuje się pośrednio poprzez moduł TAC Xenta 451A (Xenta pełni funkcję konwertera sygnału na wyjście analogowe).

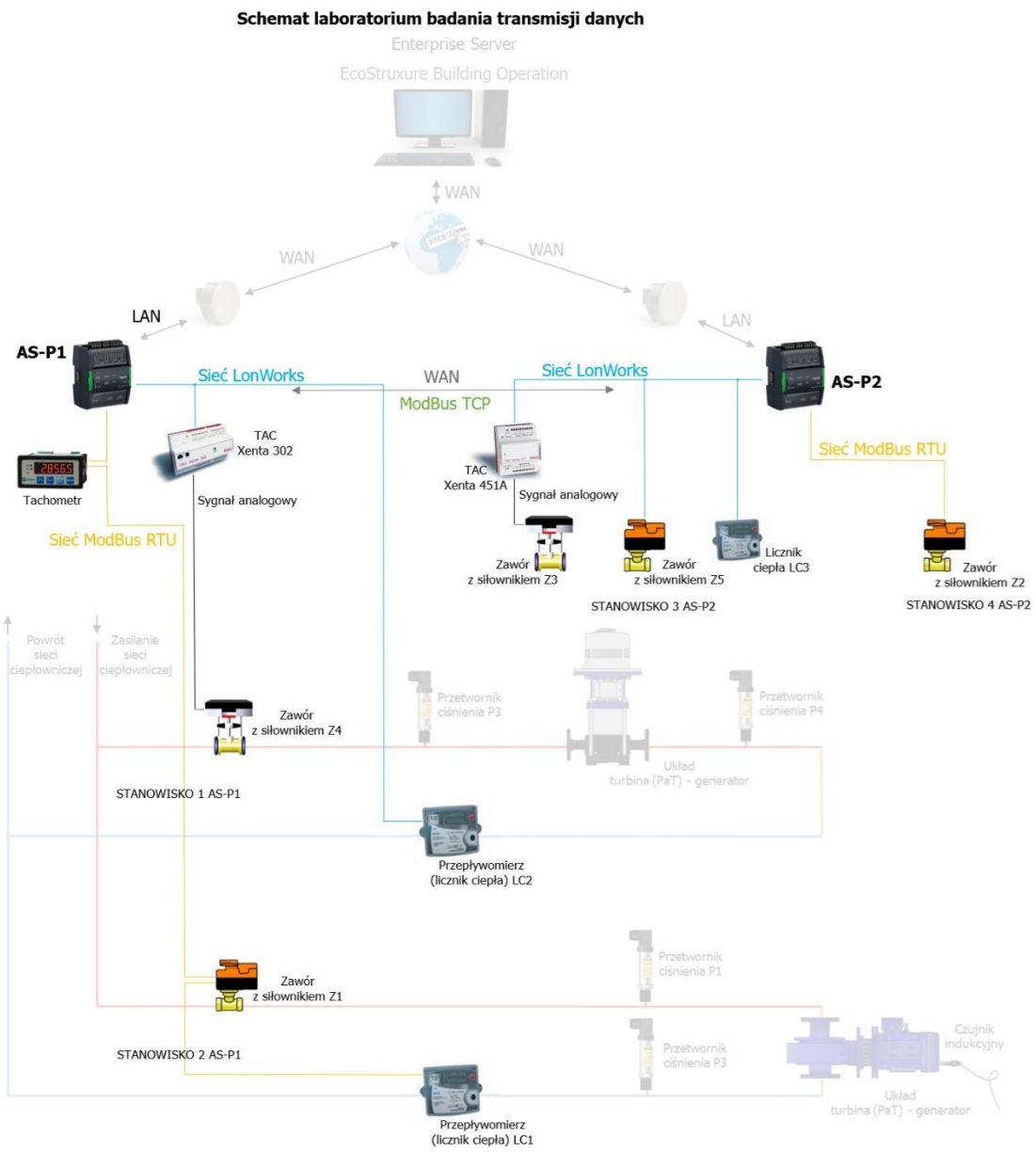
Urządzenia przypisane do Stanowiska 4 (AS-P2) zostały zintegrowane w sieci ModBus RTU:

- siłownik Z2, komunikujący się bezpośrednio w protokole ModBus.

Podobnie jak w przypadku Laboratorium 1, w szafie znajdują się także elementy pomocnicze, takie jak bezpieczniki, zasilacze oraz dodatkowe moduły komunikacyjne, które ze względu na ich pomocniczy charakter bądź brak bezpośredniego udziału w procesie badawczym nie zostały szczegółowo przedstawione na schemacie.

Stanowisko (rys. 9.5.) zostało zaprojektowane w oparciu o dwie szafy sterowniczo-komunikacyjne: Laboratorium 1 – AS-P1 oraz Laboratorium 2 – AS-P2. Każde laboratorium zostało dodatkowo podzielone na dwa odrębne stanowiska badawcze, dedykowane analizie konkretnych protokołów transmisji danych. Dzięki takiej strukturze możliwe było równoczesne prowadzenie badań nad komunikacją ModBus oraz LonWorks w różnych konfiguracjach topologicznych i przy użyciu różnych typów urządzeń wykonawczych.

W trakcie badań skupiono się na analizie poprawności przesyłu sygnałów, stabilności komunikacji, czasach odpowiedzi urządzeń oraz procesie konwersji danych między różnymi standardami transmisji. System został zintegrowany z platformą SCADA EcoStruxure Building Operation, umożliwiającą pełne monitorowanie, sterowanie oraz rejestrację parametrów sieciowych i procesowych w czasie rzeczywistym.



Rys.9.5. Schemat komunikacji cyfrowej w protokole ModBus RTU i TCP LonWorks Laboratorium 1 i 2 badania transmisji danych

Podsumowując stanowisko do badania transmisji danych składało się z dwóch niezależnych szaf sterowniczo-komunikacyjnych:

- Laboratorium 1 – AS-P1.
- Laboratorium 2 – AS-P2.

Każda szafa została podzielona na dwa odrębne stanowiska badawcze:

- Laboratorium 1 – AS-P1:

  - Stanowisko 1 – AS-P1: badania transmisji danych w protokole LonWorks.
  - Stanowisko 2 – AS-P1: badania transmisji danych w protokole ModBus.
- Laboratorium 2 – AS-P2:
  - Stanowisko 3 – AS-P2: badania transmisji danych w protokole ModBus.
  - Stanowisko 4 – AS-P2: badania transmisji danych w protokole LonWorks.

W ramach realizacji projektu, każde ze stanowisk zostało wyposażone w odpowiednią infrastrukturę sieciową, urządzenia wykonawcze, umożliwiające szczegółową analizę parametrów komunikacji w różnych topologiach i warunkach operacyjnych.

9.1. KONFIGURACJA STANOWISKA BADAWCZEGO

Stanowisko badawcze zostało wyposażone w podstawowe elementy automatyki przemysłowej, umożliwiające realizację testów komunikacji pomiędzy urządzeniami wykonawczymi, sterownikami PLC oraz systemem SCADA.

W skład konfiguracji wchodzą sterowniki, moduły komunikacyjne, siłowniki wykonawcze oraz system nadrzędny SCADA.

Poniżej przedstawiono główne komponenty wykorzystane w projekcie:

- Sterowniki PLC:
  - AS-P1 i AS-P2 (Schneider Electric, EcoStruxure Building Operation) – główne jednostki sterujące, umożliwiające obsługę sieci LonWorks, ModBus RTU oraz ModBus TCP.
  - Sterownik TAC Xenta 302 i Moduł TAC Xenta 451A – dla obsługi komunikacji w sieci LonWorks oraz sterowania urządzeniami analogowymi.
- Siłowniki wykonawcze:
  - Z1 - NVK24A-MOD Belimo – komunikacja ModBus RTU.
  - Z2 - NVK24A-MOD Belimo – komunikacja ModBus RTU.
  - Z3 - M800 Schneider Electric – sterowanie sygnałem analogowym poprzez magistralę LonWorks.

    - Z4 - M800 Schneider Electric – sterowanie sygnałem analogowym poprzez magistralę LonWorks.
    - Z5 - NVK24A-LON Belimo – komunikacja LonWorks.
- System SCADA: EcoStruxure Building Operation – platforma do monitorowania i wizualizacji danych w czasie rzeczywistym.
- Generatory sygnałów sterujących: funkcjonalności programowe w sterownikach AS-P1 i AS-P2, umożliwiające generowanie sygnałów testowych do analizy transmisji

9.2. INTEGRACJA STANOWISKA BADANIA TRANSMISJI DANYCH Z SYSTEMEM SCADA

Integracja układu transmisji danych została przeprowadzona poprzez budowę złożonej infrastruktury sieciowej, umożliwiającej równoczesną obsługę wielu przemysłowych protokołów komunikacyjnych. Odpowiednia architektura systemu zapewniła niezawodną wymianę danych pomiędzy sterownikami AS-P1 i AS-P2, urządzeniami wykonawczymi oraz systemem SCADA.

A. Typy wykorzystanych mediów transmisyjnych:
    - Ethernet TCP/IP – wykorzystywany do komunikacji sterowników AS-P z systemem SCADA oraz do przesyłu danych w protokole ModBus TCP pomiędzy AS-P1 i AS-P2.
    - RS485 – stosowany do komunikacji urządzeń obsługujących protokół ModBus RTU, takich jak siłowniki Belimo NVK24A-MOD (Z1 i Z2) licznik ciepła (LC1), tachometr.
    - LonWorks FT-10A (Free Topology) – dedykowany dla urządzeń pracujących w standardzie LonWorks, takich jak siłownik Belimo NVK24A-LON (Z5) oraz licznik ciepła (LC2).

B. Klasa i rodzaj mierzonych sygnałów:
    - Sygnały cyfrowe:
        - Przesyłanie zmiennych sterujących (wartości pomiarowe, pozycje siłowników) za pomocą protokołów ModBus RTU, ModBus TCP oraz LonWorks.

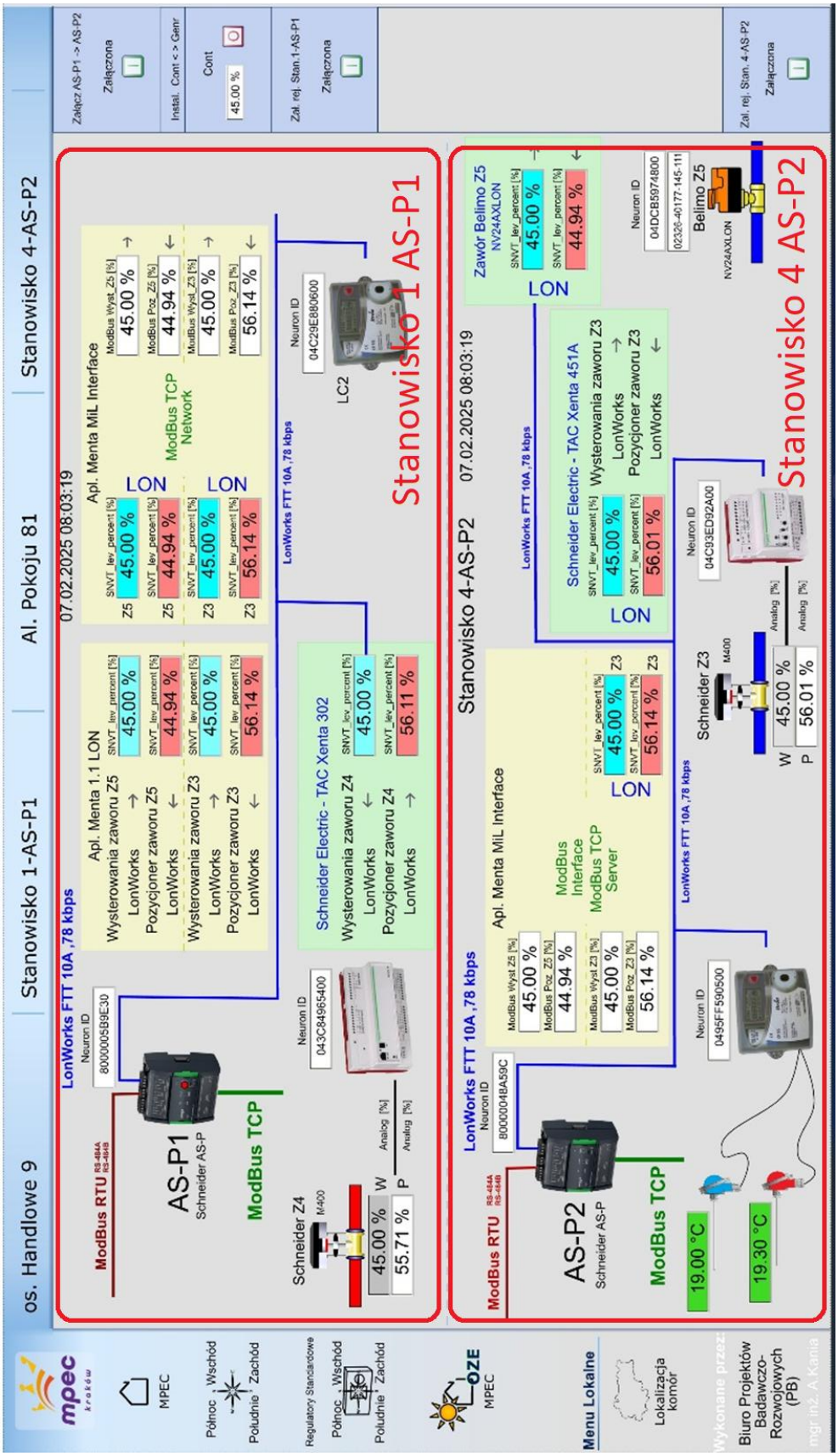
    - Monitorowanie poprawności komunikacji urządzeń oraz rejestracja parametrów sieciowych.
- Sygnały analogowe:
    - Sterowanie pozycją siłowników w systemach analogowych (siłowników M800 Schneider Electric – Z3 i Z4, pośrednio poprzez magistralę LonWorks).
    - Pomiar parametrów procesu, takich jak ciśnienie.

Wszystkie dane zbierane z urządzeń wykonawczych oraz czujników były rejestrowane w systemie SCADA EcoStruxure Building Operation, który umożliwiał ich analizę w czasie rzeczywistym. Dzięki zastosowanym wizualizacjom możliwe było monitorowanie topologii sieci, identyfikowanie ewentualnych opóźnień w transmisji danych, analizowanie procesów konwersji między różnymi protokołami oraz weryfikacja poprawności działania całej struktury komunikacyjnej.

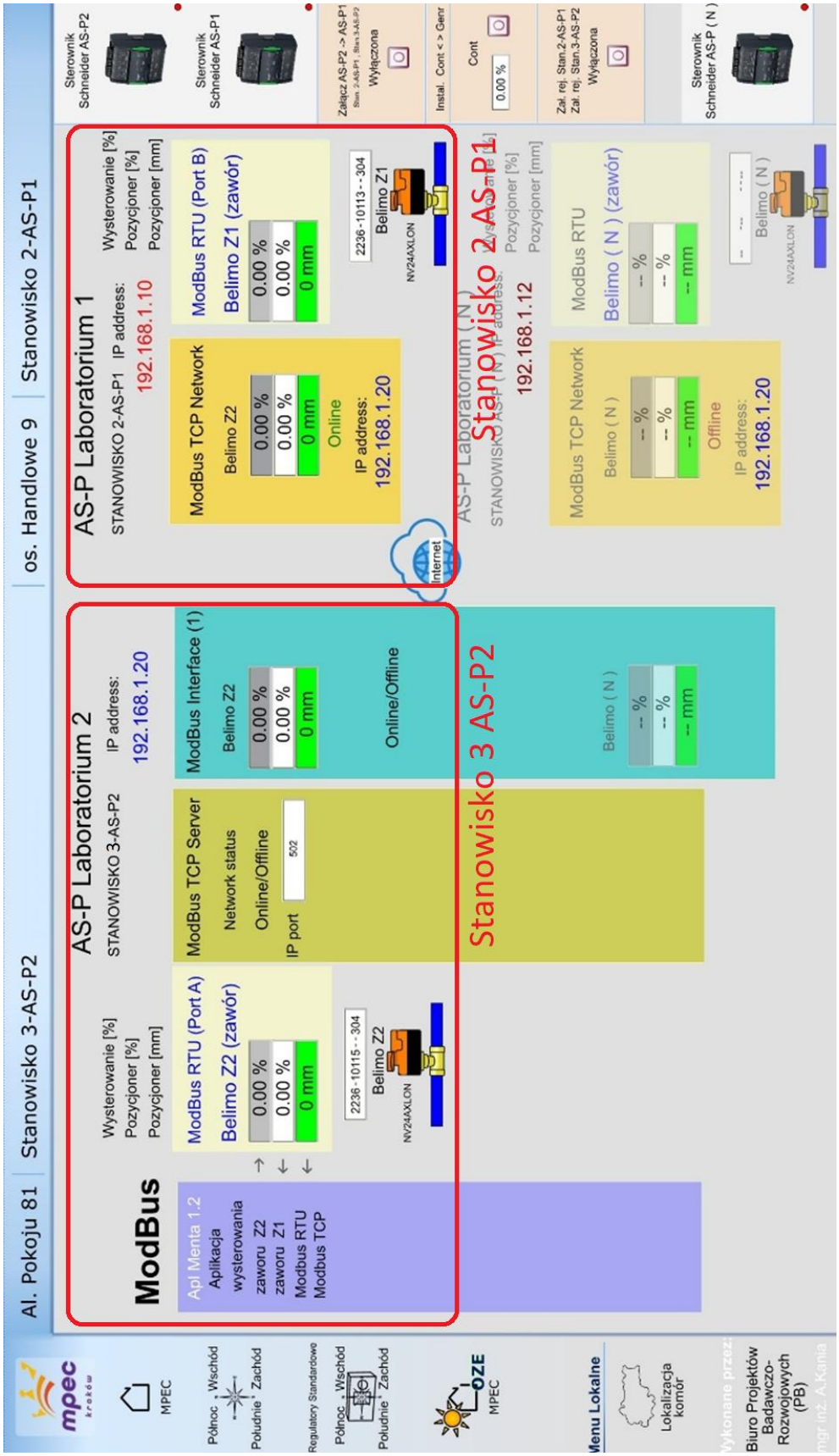
W ramach realizacji badań komunikacji opracowano trzy wizualizacje systemu sterowania i wymiany danych pomiędzy sterownikami AS-P1 i AS-P2.

Poniższa wizualizacja (rys. 9.6.) przedstawia pierwszą z nich, ilustrującą strukturę sieci oraz przebieg sygnałów w badanym układzie. Rysunek ten przedstawia strukturę komunikacyjną pomiędzy stanowiskami 1 AS-P1 (Laboratorium 1) oraz stanowiskiem 4 AS-P2 (Laboratorium 2) a urządzeniami wykonawczymi, z wykorzystaniem protokołów ModBus TCP oraz LonWorks. Schemat zawiera informacje dotyczące przesyłanych wartości zmiennych, konwersji danych pomiędzy protokołami oraz stanów urządzeń wykonawczych, takich jak zawory.

Druga z opracowanych wizualizacji (rys. 9.7.) przedstawia szczegółowy przebieg sygnałów sterujących w różnych architekturach komunikacyjnych: ModBus RTU oraz ModBus TCP, zarówno pomiędzy sterownikami AS-P1 i AS-P2, jak i pomiędzy sterownikiem a urządzeniami wykonawczymi. Wizualizacja obrazuje komunikację realizowaną w Laboratorium 1 oraz Laboratorium 2, odpowiednio na Stanowisku 2 AS-P1 (Laboratorium 1) i Stanowisku 4 AS-P2 (Laboratorium 2), w których zastosowano standardy transmisji ModBus RTU i ModBus TCP.



Rys. 9.6. Wizualizacja systemu sterowania i komunikacji – Laboratorium 1 i 2, stanowiska 1 AS-P1 oraz 4 AS-P2 – komunikacja po sieci LonWorka i ModBus TCP



Rys. 9.7. Wizualizacja przebiegu sygnałów sterujących w Laboratorium 1 i 2, stanowiska 2 AS-P1 oraz 4 AS-P2 – komunikacja po ModBus RTU i ModBus TCP

Rysunek 9.8. przedstawia przebieg transmisji sygnałów sterujących, z podziałem na dwa segmenty komunikacyjne: LonWorks oraz ModBus.Prawa część wizualizacji ilustruje proces przesyłania wartości sterujących w sieci LonWorks, natomiast lewa część przedstawia komunikację realizowaną za pomocą ModBus RTU. Na wizualizacji widoczne są również wartości sygnałów sterujących, pozycje urządzeń wykonawczych oraz zmienne pośredniczące w procesie transmisji.

Wszystkie opracowane wizualizacje stanowią kompleksową podstawę do analizy przebiegu sygnałów sterujących, monitorowania komunikacji oraz oceny efektywności wymiany danych w systemach automatyki przemysłowej opartych na protokołach ModBus i LonWorks. Pozwalają one na analizę działania systemu sterowania, diagnostykę komunikacji oraz monitoring parametrów procesowych w czasie rzeczywistym.

Opracowane modele umożliwiły szczegółową analizę struktury komunikacyjnej systemu, w tym przepływu sygnałów sterujących oraz wymiany danych pomiędzy sterownikami AS-P1, AS-P2 i urządzeniami wykonawczymi. Dzięki nim można szybko ocenić stan sieci, identyfikować potencjalne problemy oraz na bieżąco analizować komunikację pomiędzy poszczególnymi komponentami instalacji.

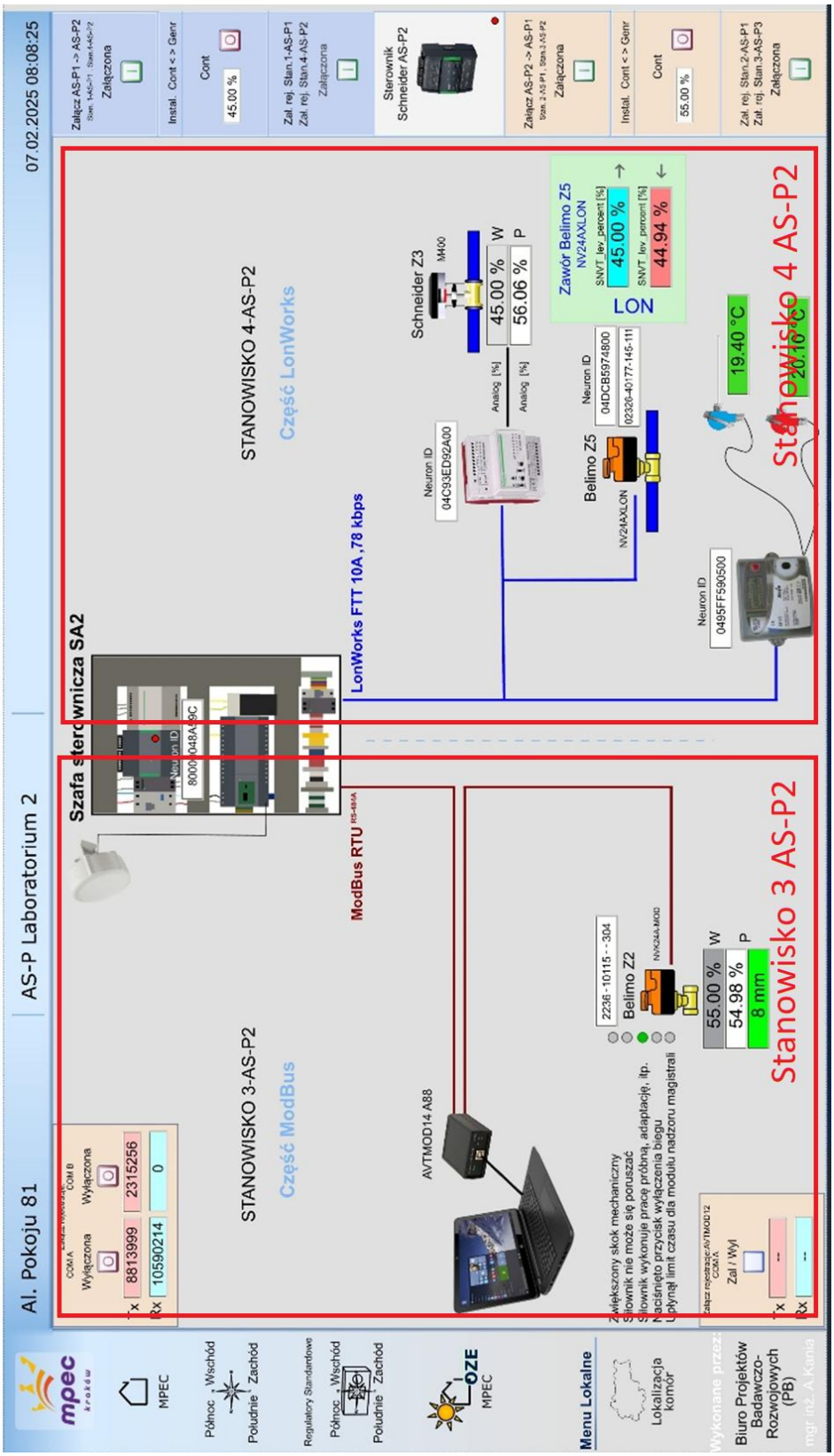
Sterowniki AS-P1 i AS-P2 odgrywają kluczową rolę w realizacji procesu sterowania oraz wymiany danych. Odpowiadają za odbiór i wysyłanie sygnałów sterujących, a także za integrację różnych protokołów komunikacyjnych, co zapewnia elastyczność, skalowalność i niezawodność całego systemu.

Wizualizacje odzwierciedlają współpracę systemów opartych na protokołach ModBus (TCP i RTU) oraz LonWorks, umożliwiając skuteczną wymianę danych pomiędzy urządzeniami różnych producentów. Pozwala to na budowę bardziej złożonych i funkcjonalnych systemów automatyki przemysłowej.

System SCADA pełni funkcję centralnego punktu gromadzenia, analizy i wizualizacji danych, co znacząco usprawnia zarządzanie procesami technologicznymi. Opracowane wizualizacje stanowią przykład efektywnego zastosowania technologii SCADA do bieżącego monitorowania i zarządzania systemem sterowania.

Podsumowując, wizualizacje systemów sterowania odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu przejrzystości działania układów automatyki. Umożliwiają zarówno analizę i diagnostykę procesów w czasie rzeczywistym, jak i skuteczne zarządzanie zasobami technicznymi. Integracja sterowników AS-P z systemem SCADA oraz zastosowanie różnych protokołów komunikacyjnych pozwala na budowę

nowoczesnych, wydajnych i skalowalnych systemów, które mogą być wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu i infrastruktury.



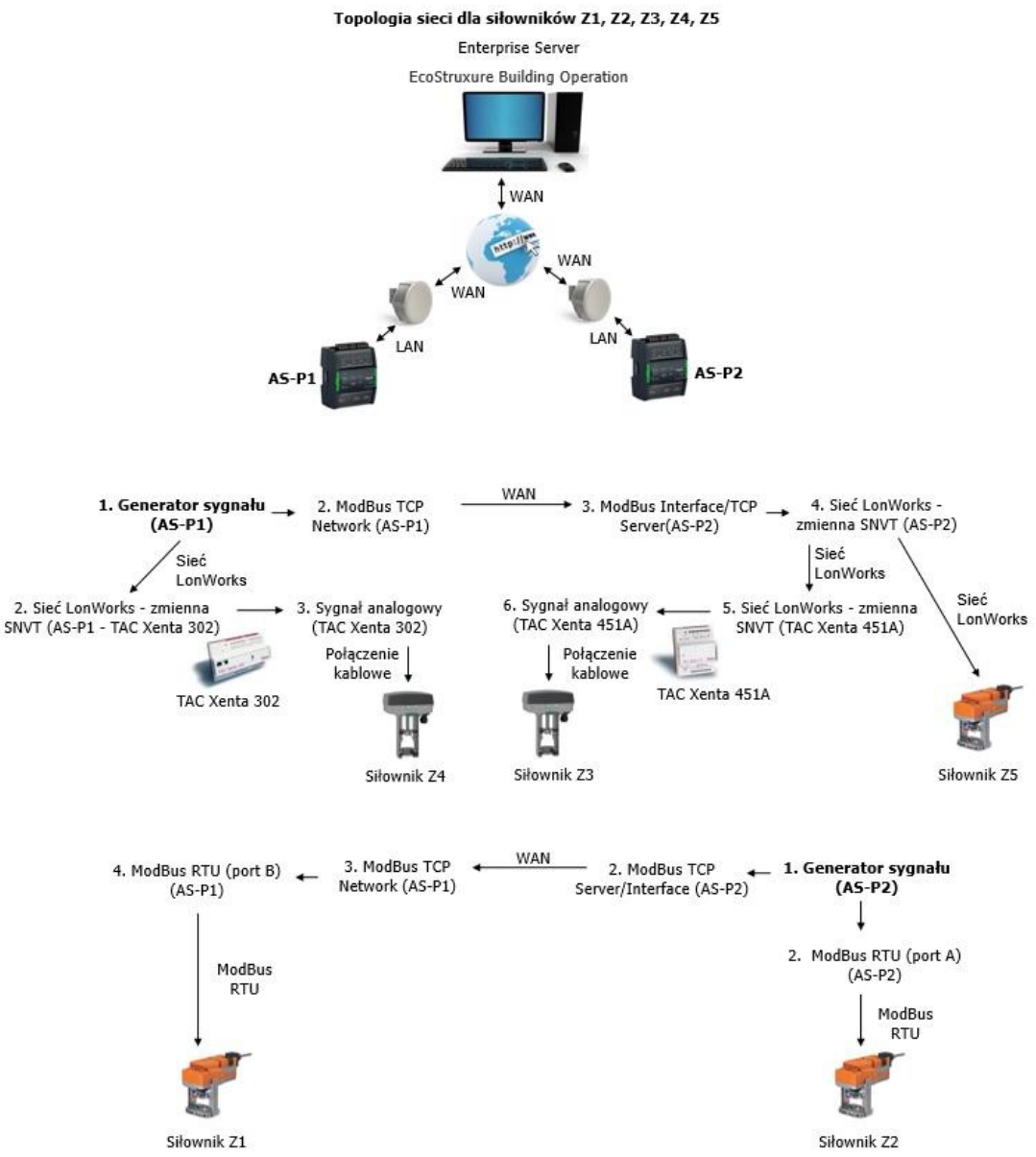
Rys. 9.8. Wizualizacja przebiegu sygnałów sterujących w Laboratorium 2, stanowiska 3 AS-P2 oraz 4 AS-P2 – komunikacja po ModBus RTU i ModBus TCP

10. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO DO ANALIZY TRANSMISJI DANYCH

Stanowisko badawcze zostało opracowane z myślą o analizie procesów transmisji danych zachodzących w rozproszonych systemach automatyki, ze szczególnym uwzględnieniem aplikacji w automatyce ciepłowniczej. Celem prowadzonych badań było monitorowanie, porównanie oraz ocena wydajności i niezawodności różnych protokołów komunikacyjnych – takich jak ModBus RTU, ModBus TCP oraz LonWorks – w zróżnicowanych konfiguracjach topologicznych. Analizie poddano zarówno propagację sygnału, jak i jego transformację pomiędzy warstwami komunikacyjnymi w środowisku sieci rozproszonej.

Badawcza architektura systemu oparta została na dwóch sterownikach programowalnych AS-P (oznaczonych jako AS-P1 oraz AS-P2) oraz systemie zarządzającym SCADA (EcoStruxure Building Operation). Kontrolery komunikują się ze sobą przez infrastrukturę WAN/Ethernet, stanowiąc część zintegrowanego systemu automatyki. Transmisja danych do urządzeń wykonawczych – takich jak siłowniki – odbywa się z wykorzystaniem różnych protokołów (ModBus RTU, LonWorks) lub poprzez analogowe sygnały sterujące.

Schemat ideowy stanowiska (rys. 10.1.) przedstawia konfigurację sprzętową, powiązania logiczne oraz pełną ścieżkę transmisji sygnałów sterujących dla wszystkich pięciu siłowników (Z1–Z5). Przykładowe ścieżki transmisji obejmują konwersje sygnału pomiędzy ModBus TCP i RTU, a także wykorzystanie zmiennych SNVT w architekturze LonWorks. Do przesyłu danych pomiędzy sterownikami AS-P1 i AS-P2 wykorzystywany jest protokół komunikacyjny ModBus TCP.



Rys. 10.1. Schemat stanowiska badawczego transmisji danych

a) System zarządzania i wizualizacji (SCADA)
   - Centralnym elementem zarządzania i wizualizacji danych jest oprogramowanie SCADA EcoStruxure Building Operation firmy Schneider Electric.
   - Aplikacja SCADA została zainstalowana na komputerze PC, który komunikuje się z pozostałymi komponentami infrastruktury za pośrednictwem interfejsu Ethernet.

b) Urządzenia sterujące i sieciowe

- Sterowniki programowalne AS-P (AS-P1, AS-P2) firmy Schneider Electric, pełniące funkcję lokalnych serwerów automatyki.
- Sterownik programowalny TAC Xenta 302 firmy Schneider Electric.
- Moduł wyjść TAC Xenta 451A firmy Schneider Electric.
- Każdy ze sterowników AS-P wyposażony jest w interfejsy umożliwiające komunikację z wykorzystaniem protokołów ModBus TCP/RTU oraz LonWorks.
- Sterownik TAC Xenta 302 oraz moduł TAC Xenta 451A są połączone z odpowiednimi sterownikami AS-P magistralą LonWorks – pomiędzy urządzeniami TAC Xenta a sterownikami AS-P zmienne przesyłane są za pomocą zmiennych SNVT (LonWorks). Urządzenia TAC Xenta sterują siłownikami Z3 i Z4 sygnałem analogowym.

c) Urządzenia wykonawcze
- Siłowniki wykonawcze pełniące funkcję elementów końcowych systemu sterowania:
  - Z1, Z2: Siłowniki typu NVK24A-MOD firmy Belimo, komunikujące się za pomocą protokołu ModBus RTU.
  - Z3, Z4: Siłowniki M800 firmy Schneider Electric, sterowane sygnałami analogowymi.
  - Z5: Siłownik NVK24A-LON firmy Belimo, pracujący w środowisku LonWorks.

d) Topologie i protokoły komunikacyjne
- Badania przeprowadzono w kilku konfiguracjach topologicznych, uwzględniających różne scenariusze transmisji:
  - Transmisja przez ModBus TCP/RTU (rys. 10.2., 10.3.),
  - Złożone układy hybrydowe z użyciem ModBus TCP oraz LonWorks (rys. 10.4., 10.6.),
  - Topologie z pełnym wykorzystaniem protokołu LonWorks (rys. 10.5.).

e) Generatory sygnałów sterujących
- Dwa niezależne generatory sygnałów:
  - AS-P1 – wykorzystywany w analizie transmisji LonWorks,

- AS-P2 – odpowiedzialny za generowanie sygnałów dla ModBus.

- Sygnały są generowane programowo, a ich trasa przebiegu zależy od zdefiniowanej architektury sieciowej.
- Przykładowy scenariusz transmisji dla siłownika Z1:
  w transmisji do siłownika Z1 sygnał przechodzi przez warstwy ModBus TCP i ModBus RTU, zanim trafi do urządzenia wykonawczego.

f) Metody transmisji i monitoringu

W ramach prowadzonych badań analizowano:

- Procesy transformacji sygnałów,
- Propagację sygnału w sieciach rozproszonych (z uwzględnieniem opóźnień, konwersji protokołów),
- Odpowiedź urządzeń wykonawczych na sygnały sterujące w zależności od konfiguracji sieciowej,
- Monitorowanie parametrów transmisji za pomocą narzędzi SCADA oraz lokalnych rejestratorów danych.

10.1. TOPOLOGIE SIECI

W niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółową analizę topologii sieci transmisyjnych zastosowanych w środowisku badawczym. Celem opracowania jest ukazanie sposobu, w jaki sygnały sterujące są generowane, przesyłane i przekształcane w zależności od użytej konfiguracji sprzętowej oraz wybranego protokołu komunikacyjnego.

Zaprojektowane scenariusze testowe odzwierciedlają zarówno typowe, jak i złożone architektury stosowane w systemach automatyki, opartych na protokołach takich jak ModBus RTU, ModBus TCP oraz LonWorks. Każda z analizowanych topologii ukazuje pełną ścieżkę sygnału – od momentu jego wygenerowania w kontrolerze, przez kolejne warstwy transmisyjne i konwersje protokołów, aż po urządzenie wykonawcze.

Dzięki rozróżnieniu etapów transmisji możliwe jest nie tylko szczegółowe prześledzenie propagacji sygnału w sieciach rozproszonych, ale także identyfikacja

potencjalnych punktów krytycznych, opóźnień oraz weryfikacja poprawności działania w warunkach rzeczywistych.

W dalszej części rozdziału zaprezentowano schematy logiczne wybranych układów transmisji dla siłowników Z1–Z5, z wyszczególnieniem wszystkich etapów komunikacji.

Schemat (rys. 10.2.) przedstawia strukturę transmisji sygnału sterującego pomiędzy sterownikiem AS-P2 a siłownikiem Z1, z wykorzystaniem protokołów ModBus RTU i ModBus TCP. Sygnał sterujący generowany w AS-P2 przechodzi przez dwa różne standardy komunikacyjne i dociera do siłownika za pośrednictwem AS-P1.

Etapy transmisji:

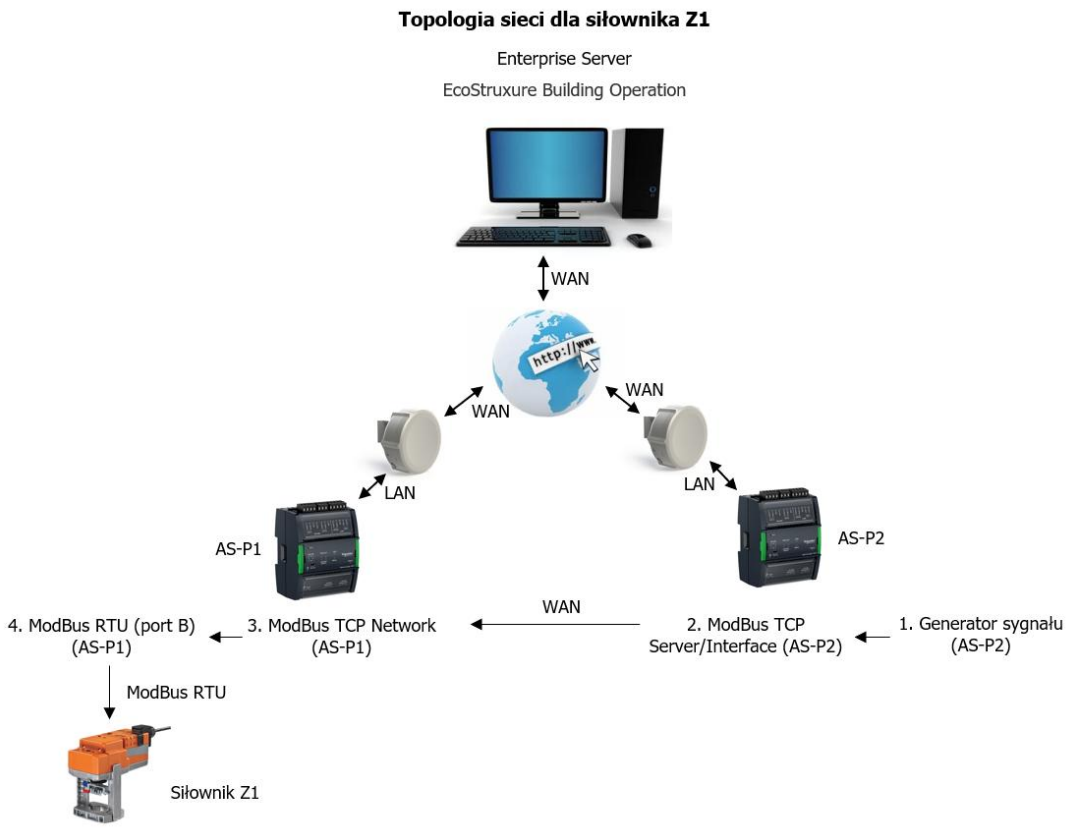
A. Generowanie sygnału w sterowniku AS-P2,
B. Przesłanie sygnału przez port A (ModBus RTU) w AS-P2,
C. Przekształcenie sygnału na interfejs ModBus TCP (Server/Interface) w AS-P2,
D. Transmisja sygnału przez sieć ModBus TCP do sterownika AS-P1,
E. Przekazanie sygnału przez port B (ModBus RTU) w AS-P1 do siłownika Z1.

Etapy transmisji dla Z1:

1. Generator sygnału (AS-P2) → 2. ModBus RTU (port A) (AS-P2)

→3. ModBus TCP Server/Interface (AS-P2)

→ 4. ModBus TCP Network (AS-P1) →5. ModBus RTU (port B) (AS-P1)



Rys. 10.2. Topologia sieci transmisyjnej dla siłownika Z1 z wykorzystaniem protokołu ModBus TCP/RTU

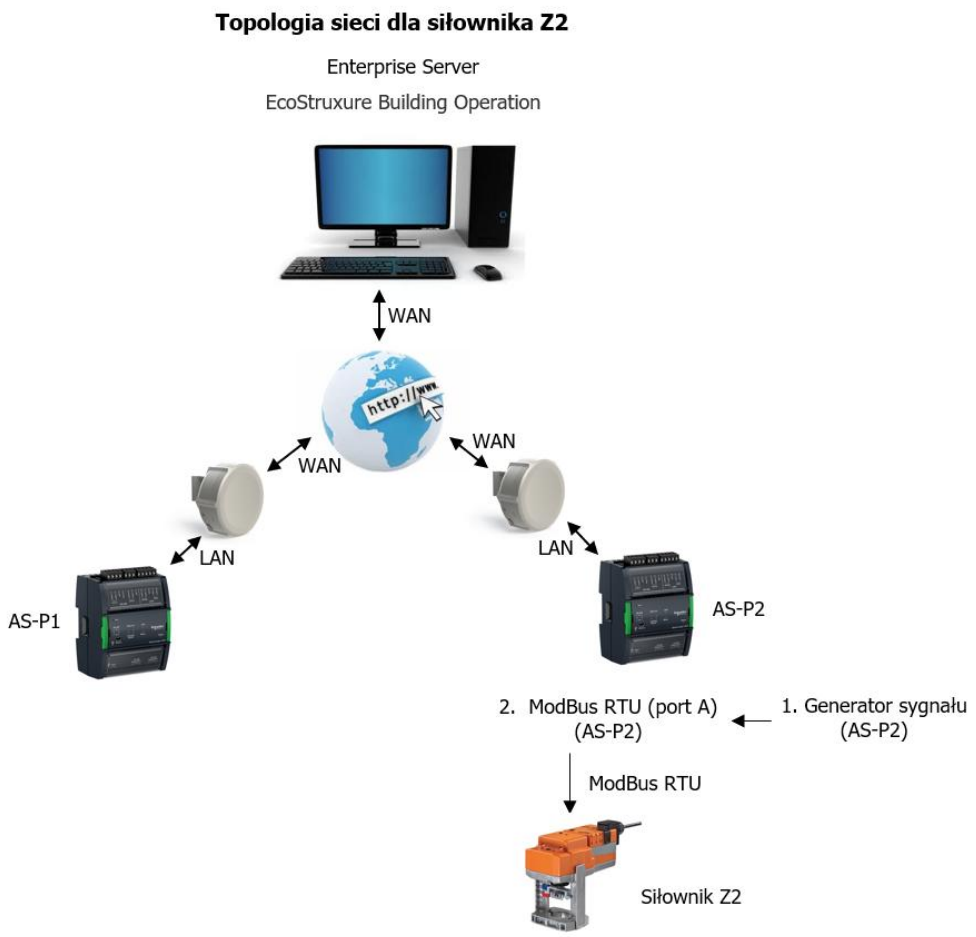
Schemat (rys. 10.3.) przedstawia lokalną transmisję sygnału sterującego pomiędzy sterownikiem AS-P2 a siłownikiem Z2. Komunikacja odbywa się bezpośrednio, z wykorzystaniem portu A i protokołu ModBus RTU.

Etapy transmisji:

A. Generowanie sygnału sterującego w AS-P2,
B. Przesłanie sygnału przez port A z użyciem ModBus RTU bezpośrednio do siłownika Z2.

Etapy transmisji dla Z2:

1. Generator sygnału (AS-P2) → 2. ModBus RTU (port A)



Rys. 10.3. Topologia sieci transmisyjnej dla siłownika Z2 z bezpośrednią komunikacją ModBus RTU

Schemat (rys. 10.4.) ilustruje złożoną strukturę komunikacyjną z wykorzystaniem protokołów ModBus TCP, LonWorks oraz konwersji do sygnału analogowego. Sygnał generowany w AS-P1 przechodzi przez szereg etapów transmisji między sterownikami i urządzeniami pośrednimi.

Etapy transmisji:

A. Generowanie sygnału w AS-P1,
B. Transmisja przez sieć ModBus TCP do AS-P2,
C. Odbiór sygnału przez interfejs TCP w AS-P2,
D. Konwersja sygnału do zmiennej SNVT i przesłanie przez sieć LonWorks,
E. Odbiór przez moduł TAC Xenta 451A (LonWorks),
F. Konwersja zmiennej SNVT na sygnał analogowy,
G. Sterowanie siłownikiem Z3 sygnałem analogowym.

Etapy transmisji dla Z3:

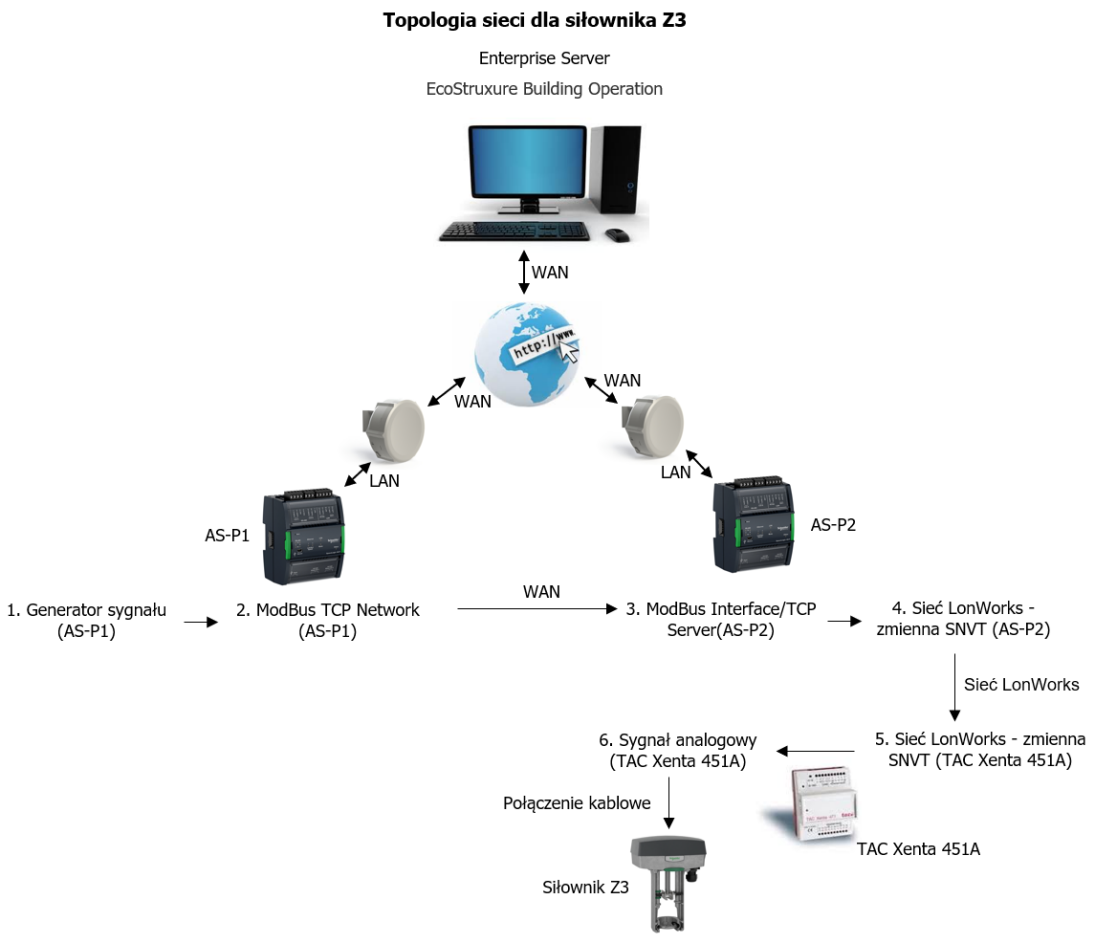
1. Generator sygnału (AS-P1) → 2. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (AS-P1)

→ 3. ModBus TCP Network (AS-P1) → 4. ModBus Interface/TCP Server(AS-P2)

→ 5. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (AS-P2)

→ 6. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (TAC Xenta 451A)

→ 7. Sygnał analogowy (TAC Xenta 451A)



Rys. 10.4. Topologia sieci transmisyjnej dla siłownika Z3 z wykorzystaniem protokołów ModBus TCP i LonWorks

Schemat (rys. 10.5.) przedstawia przypadek gdzie komunikacja odbywa się w całości w ramach sieci LonWorks. Sygnał generowany przez AS-P1 przesyłany jest jako

zmienna SNVT do sterownika TAC Xenta 302, a następnie konwertowany na sygnał analogowy.

Etapy transmisji:

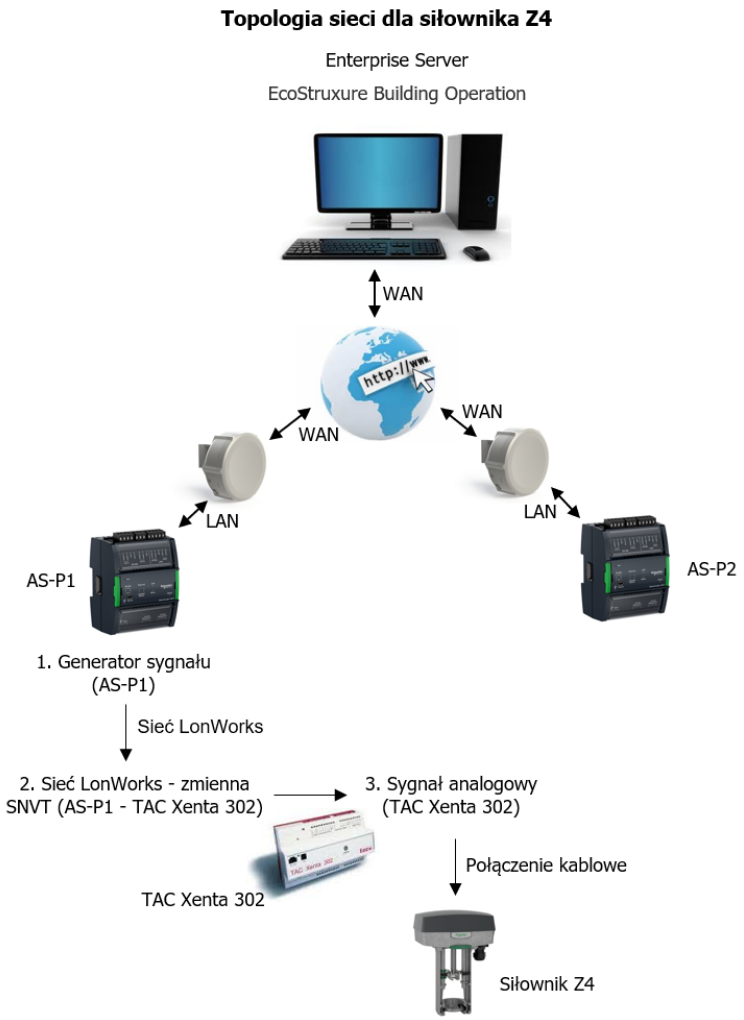
A. Generowanie sygnału w AS-P1,
B. Przesłanie zmiennej SNVT przez sieć LonWorks do TAC Xenta 302,
C. Konwersja na sygnał analogowy i przesłanie do siłownika Z4.

Etapy transmisji dla Z4:

1. Generator sygnału (AS-P1)

→ 2. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (AS-P1 - TAC Xenta 302)

→ 3. Sygnał analogowy (TAC Xenta 302)



Rys. 10.5. Topologia sieci transmisyjnej dla siłownika Z4 z wykorzystaniem protokołu LonWorks

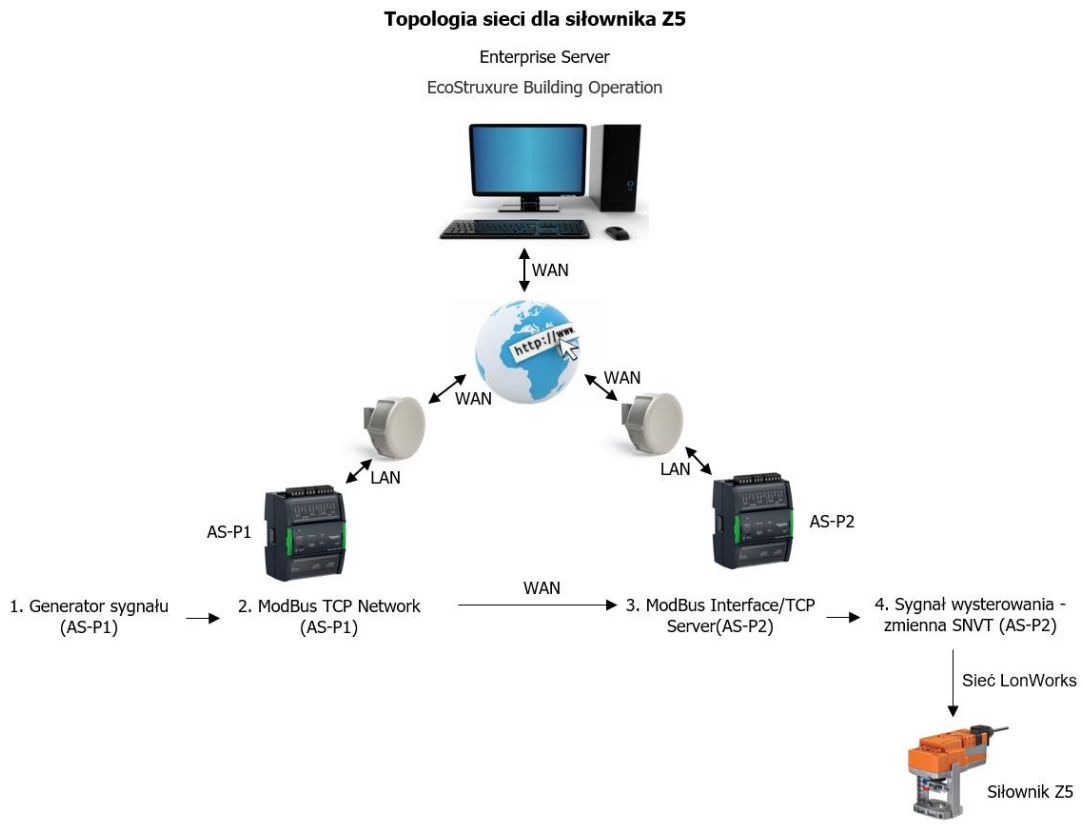
Schemat (rys. 10.6.) przedstawia transmisję sygnału generowanego w AS-P1, który przesyłany jest przez sieć ModBus TCP do AS-P2, gdzie następuje konwersja do zmiennej SNVT i przesłanie do siłownika Z5 w sieci LonWorks.

Etapy transmisji:

A. Generowanie sygnału w AS-P1,
B. Transmisja przez ModBus TCP do AS-P2,
C. Konwersja sygnału na zmienną SNVT,
D. Przesłanie zmiennej SNVT przez sieć LonWorks do siłownika Z5.

Etapy transmisji dla Z5:

1. Generator sygnału (AS-P1) → 2 2. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (AS-P1) → 3. ModBus TCP Network (AS-P1) → 4. ModBus Interface/TCP Server(AS-P2) → 5. Sygnał wysterowania - zmienna SNVT (AS-P2)



Rys. 10.6. Topologia sieci transmisyjnej dla siłownika Z5 z wykorzystaniem protokołu ModBus TCP i sieci LonWorks

10.2. METODYKA BADAŃ I PARAMETRY SYGNAŁU STERUJĄCEGO

W celu przeprowadzenia analizy przebiegów transmisji sygnału sterującego zaprojektowano i zaimplementowano jednolity, powtarzalny scenariusz generowania sygnału. Sygnał testowy generowany był programowo w sterownikach AS-P1 lub AS-P2, w zależności od konfiguracji układu transmisyjnego. Sygnał ten był następnie przesyłany przez zaprojektowaną topologię sieciową do odpowiednich urządzeń wykonawczych (siłowników Z1–Z5).

Do badań wykorzystano cykliczny sygnał sinusoidalny, którego parametry były następujące:

- Czas trwania pełnego cyklu sygnału (okres): 1000 s,
- Amplituda sygnału: 100 jednostek logicznych (np. % otwarcia siłownika),
- Krok próbkowania (częstotliwość próbkowania): 1 s,
- Tryb pracy generatora: ciągły.

Dla każdego przypadku pomiarowego rejestrowano czasy propagacji sygnału pomiędzy kolejnymi etapami komunikacyjnymi (np. od wyjścia z generatora do interfejsu TCP, następnie przez sieć i konwersję do innego protokołu itd.).

10.2.1. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA PRZEBIEGÓW TRANSMISJI SYGNAŁÓW STERUJĄCYCH

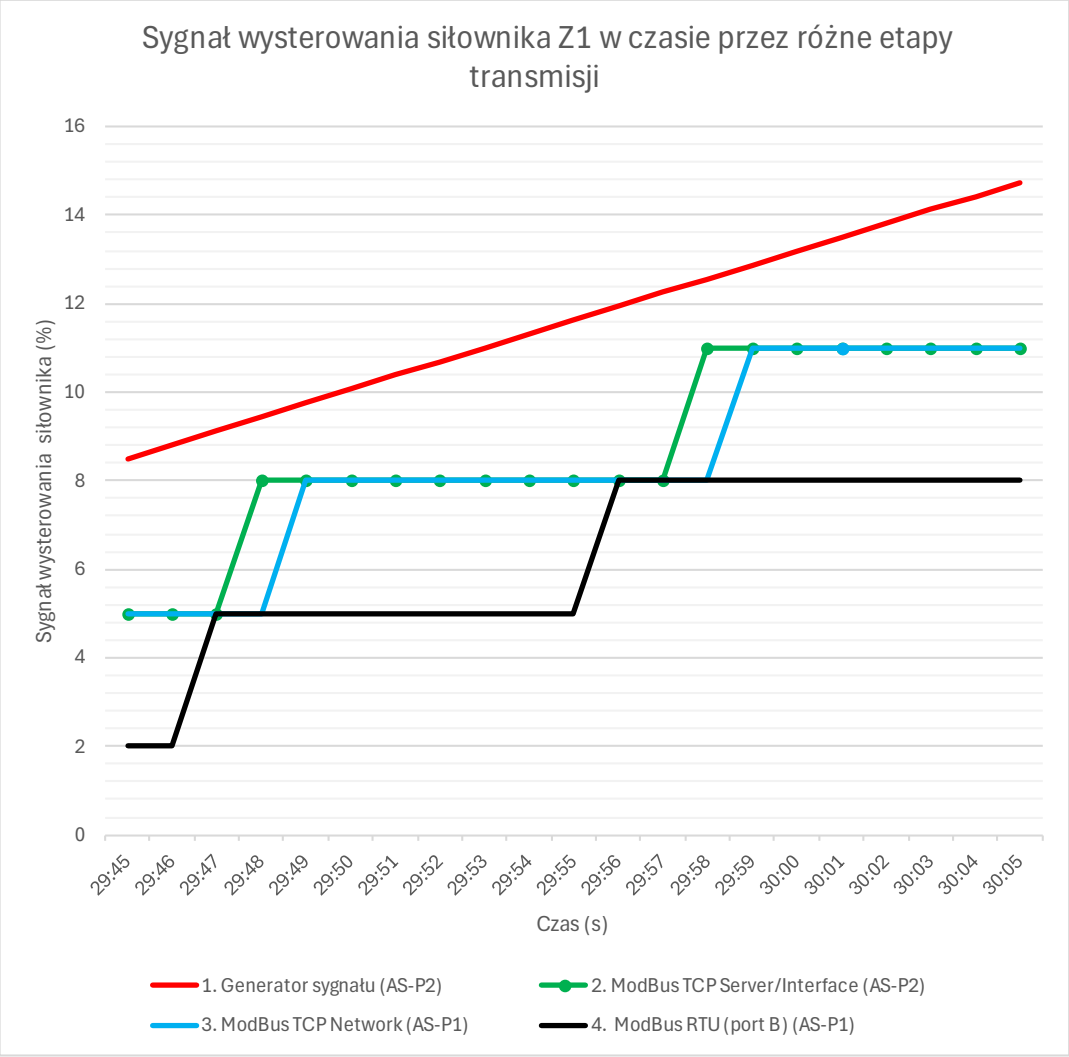
W niniejszej części przedstawiono wyniki eksperymentalnych pomiarów czasów transmisji sygnałów sterujących dla pięciu siłowników (Z1–Z5) pracujących w różnych konfiguracjach komunikacyjnych i topologiach sieci transmisyjnych. Celem analizy było określenie wpływu rodzaju zastosowanego protokołu, liczby etapów transmisji oraz rodzaju medium (ModBus TCP, ModBus RTU, LonWorks, sygnał analogowy) na całkowity czas propagacji sygnału od jego wygenerowania w sterowniku do momentu dotarcia do urządzenia wykonawczego.

Dla każdego z siłowników zarejestrowano przebiegi transmisji w funkcji czasu na podstawie 1000 punktów pomiarowych. Dla celów porównawczych, wyniki zostały również zaprezentowane na wykresach dla trzech różnych zakresów próbkowania: 20, 100 oraz 1000 punktów.

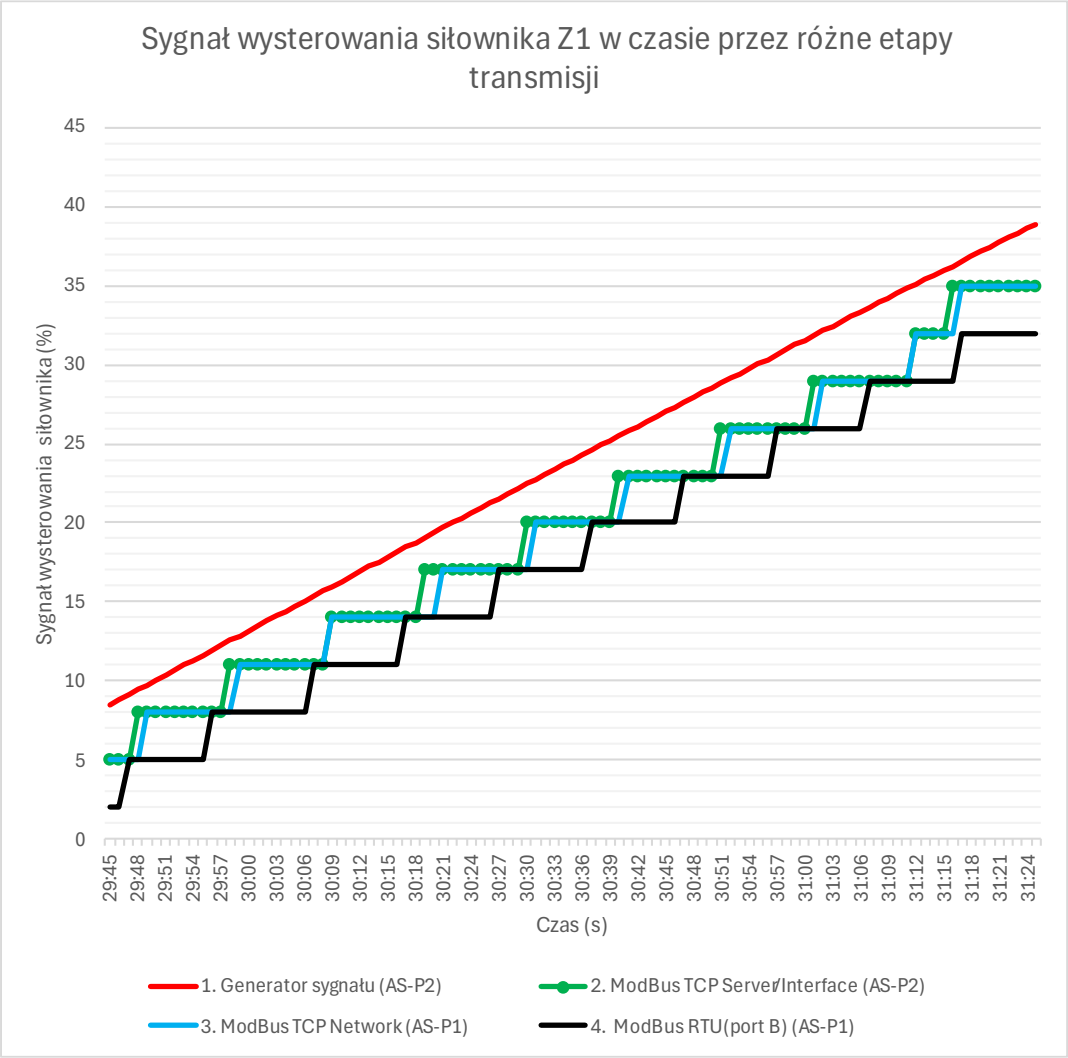
Mniejsza liczba próbek pozwoliła lepiej uwidocznić przesunięcia czasowe pomiędzy kolejnymi etapami transmisji, natomiast większa – umożliwiła dokładniejsze odwzorowanie dynamiki propagacji sygnału w czasie rzeczywistym.

Rysunki 10.7. –10.9. przedstawiają przebiegi transmisji sygnału sterującego dla siłownika Z1 zarejestrowane przy liczbie punktów pomiarowych: 20, 100 oraz 1000. Zastosowanie mniejszej liczby próbek ułatwia identyfikację przesunięć czasowych między etapami komunikacji: od generatora sygnału w AS-P2, przez interfejs ModBus TCP, aż po konwersję na ModBus RTU w AS-P1.

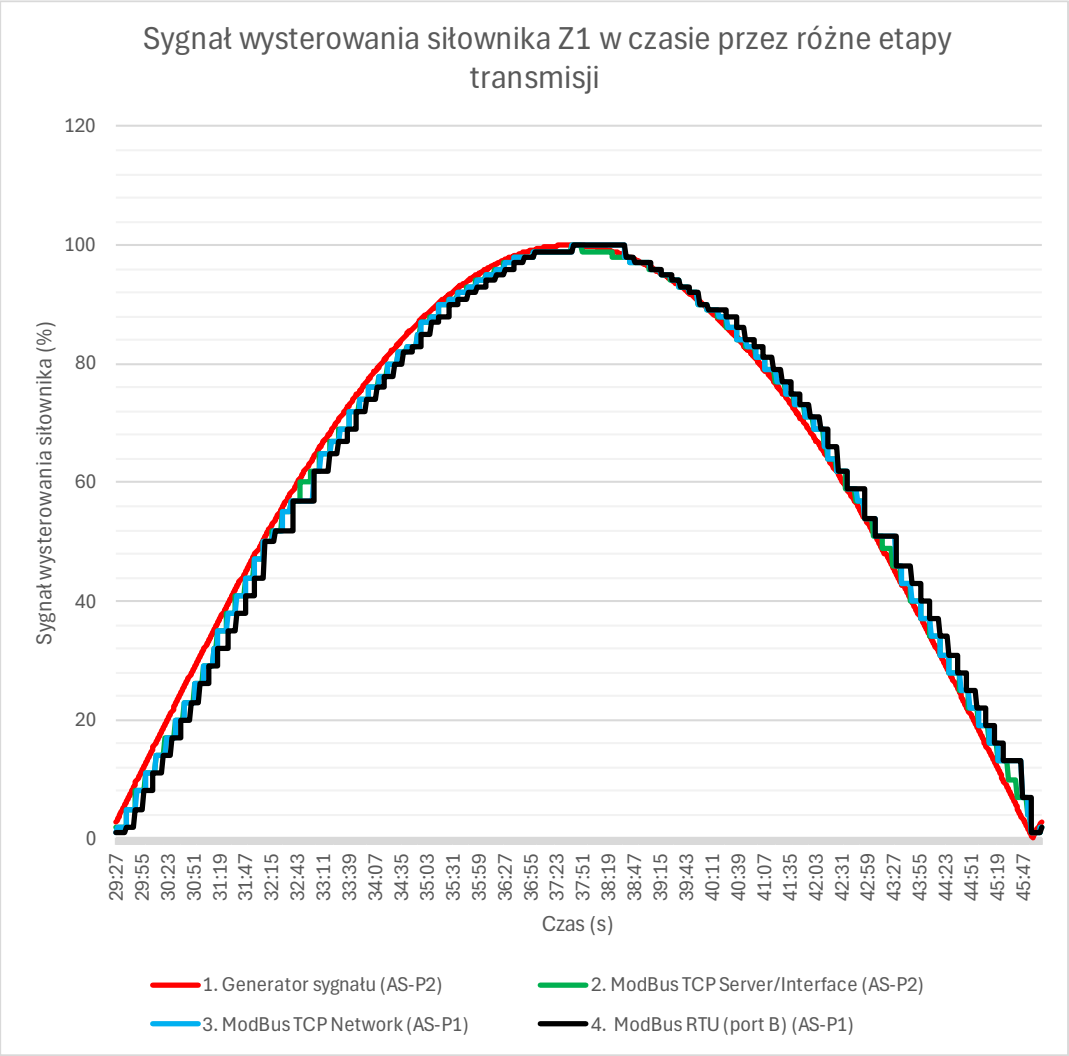
Największe opóźnienia odnotowano w pierwszym etapie transmisji, co może wskazywać na czasochłonność operacji inicjalizacji sygnału i jego konwersji przed przesłaniem do sieci.



Rys. 10.7. Przebieg transmisji sygnału sterującego dla siłownika Z1 – konfiguracja ModBus TCP/RTU, 20 punktów pomiarowych

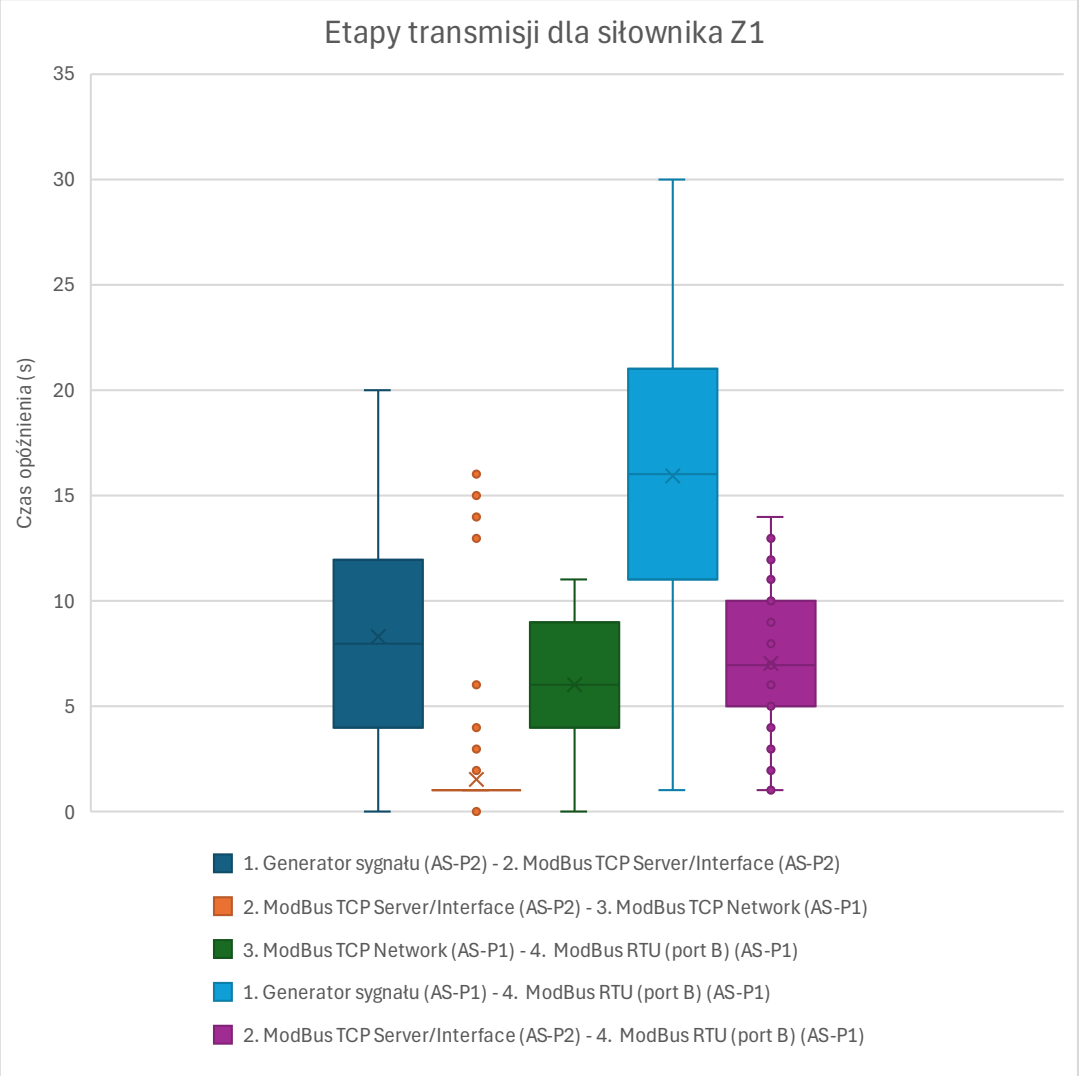


Rys. 10.8. Przebieg transmisji sygnału sterującego dla siłownika Z1 – konfiguracja ModBus TCP/RTU, 100 punktów pomiarowych



Rys. 10.9. Przebieg transmisji sygnału sterującego dla siłownika Z1 – konfiguracja ModBus TCP/RTU, 1000 punktów pomiarowych

Wykres (rys. 10.10.) przedstawia rozrzut czasów propagacji sygnału pomiędzy kolejnymi etapami transmisji, z wyraźnie zaznaczonym opóźnieniem w pierwszym etapie.



Rys. 10.10. Analiza statystyczna czasu propagacji sygnału sterującego dla siłownika Z1

1. Generator sygnału (AS-P2) → 2. ModBus TCP Server/Interface (AS-P2)

- Max: 20 s
- Min: 0 s
- Średni: 8,338 s

2. ModBus TCP Server/Interface (AS-P2) → 3. ModBus TCP Network (AS-P1)

- Max: 16 s
- Min: 0 s
- Średni: 1,555 s

3. ModBus TCP Network (AS-P1) → 4. ModBus RTU (port B) (AS-P1)

- Max: 11 s

- Min: 0 s
- Średni: 6,025 s

1. Generator sygnału (AS-P1) → 4. ModBus RTU (port B) (AS-P1)

- Max: 30 s
- Min: 1 s
- Średni: 15,919 s

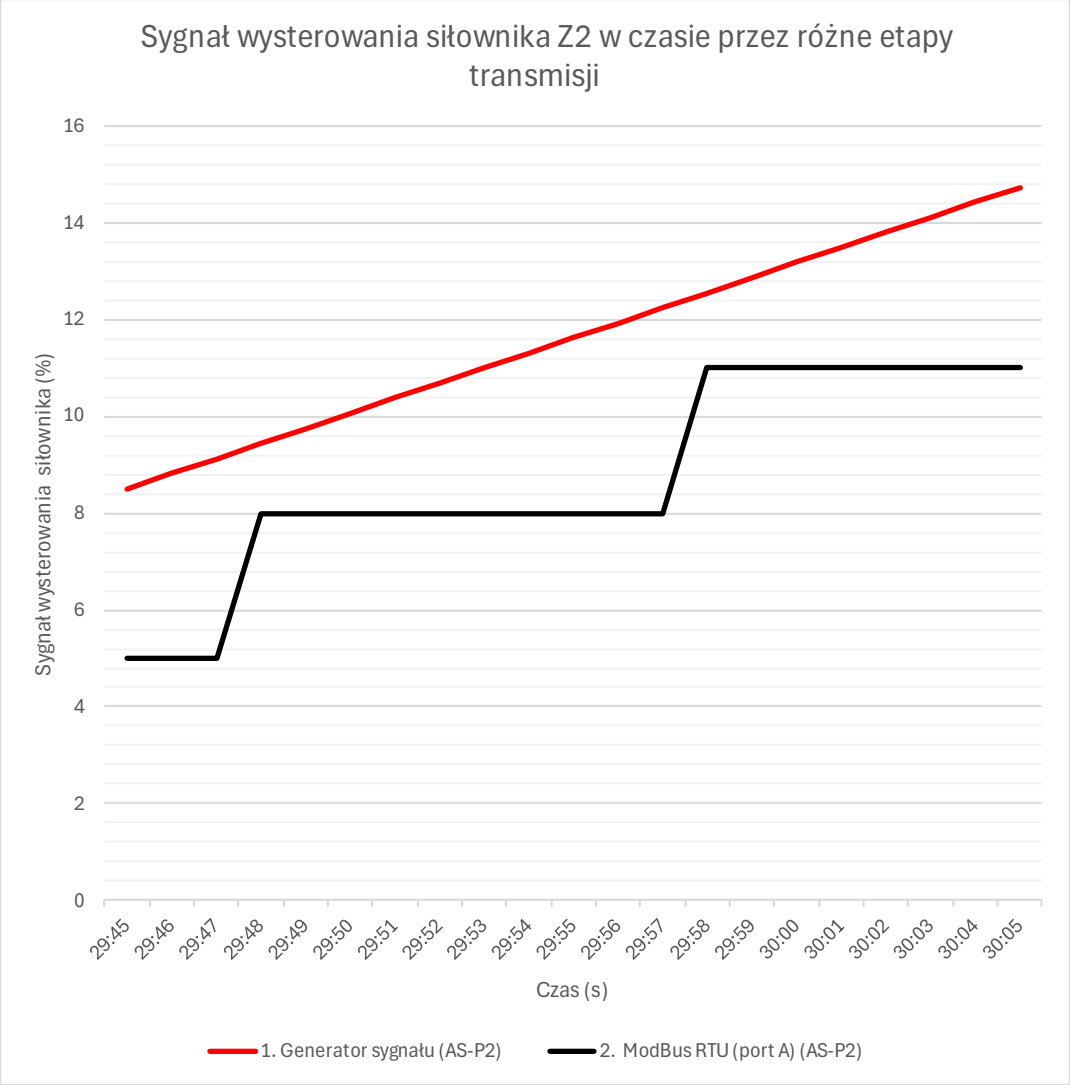
Dane pomiarowe transmisji bez pierwszego etapu:

2. ModBus TCP Server/Interface (AS-P2) → 4. ModBus RTU (port B) (AS-P1)

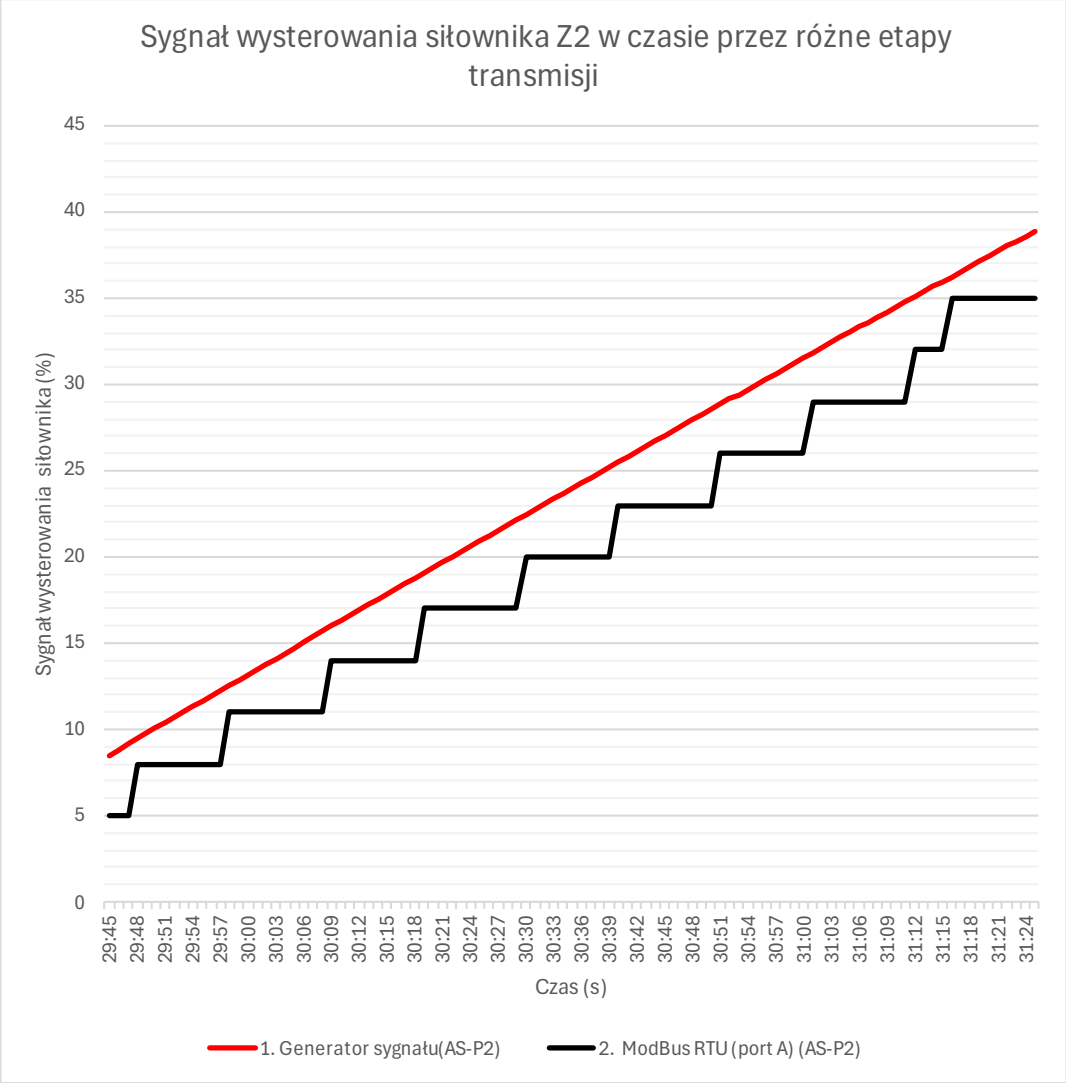
- Max: 14 s
- Min: 1 s
- Średni: 7,055 s

Rysunki 10.11.–10.13. prezentują wyniki pomiarów transmisji lokalnej dla siłownika Z2, zrealizowanej w oparciu o protokół ModBus RTU. Sygnał przesyłany był bezpośrednio z AS-P2 do siłownika, bez udziału konwersji protokołów ani transmisji sieciowej.

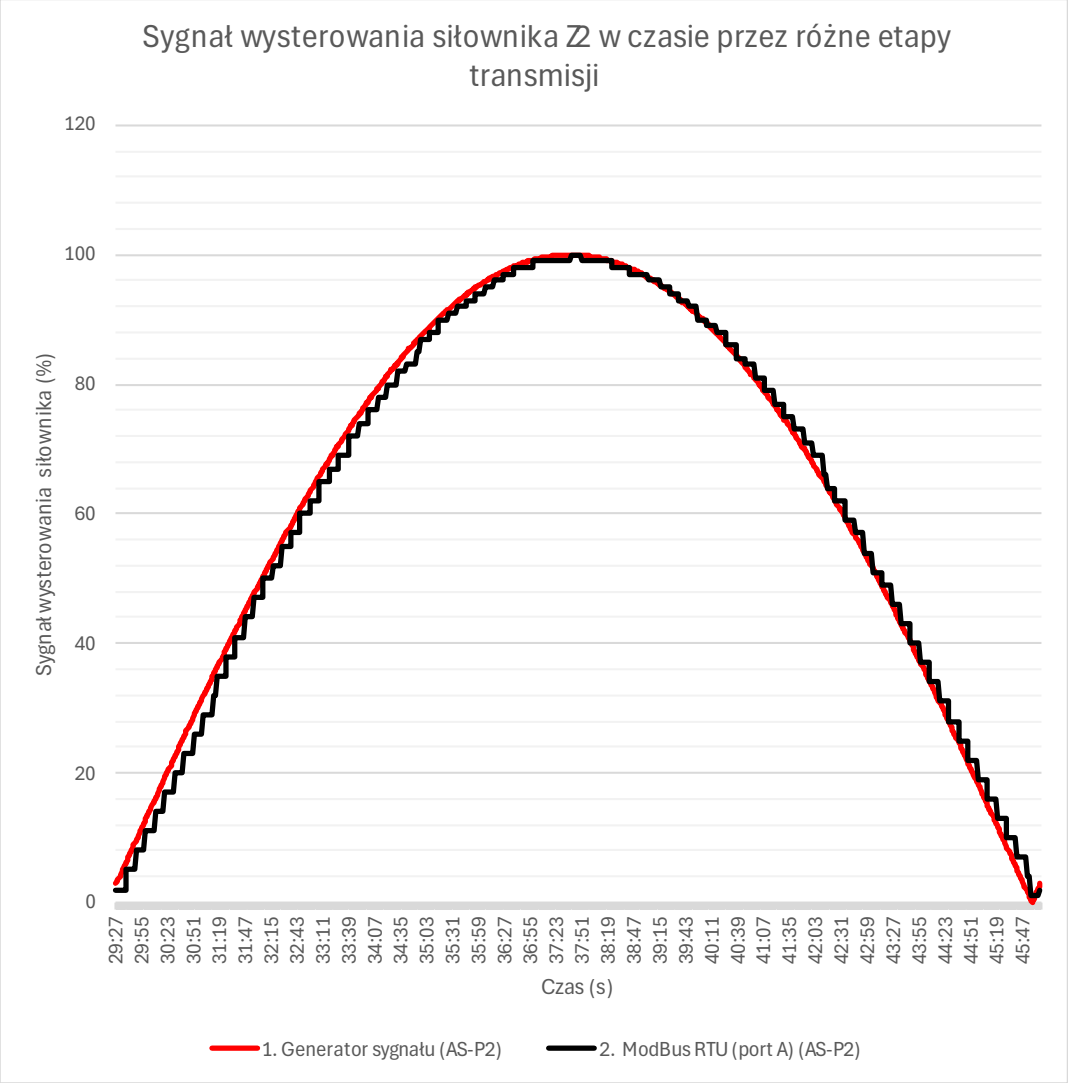
Zarejestrowane czasy wskazują na stabilność transmisji, choć ich wartości są zbliżone do bardziej złożonych struktur.



Rys. 10.11. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z2 – lokalna komunikacja ModBus RTU, 20 punktów pomiarowych

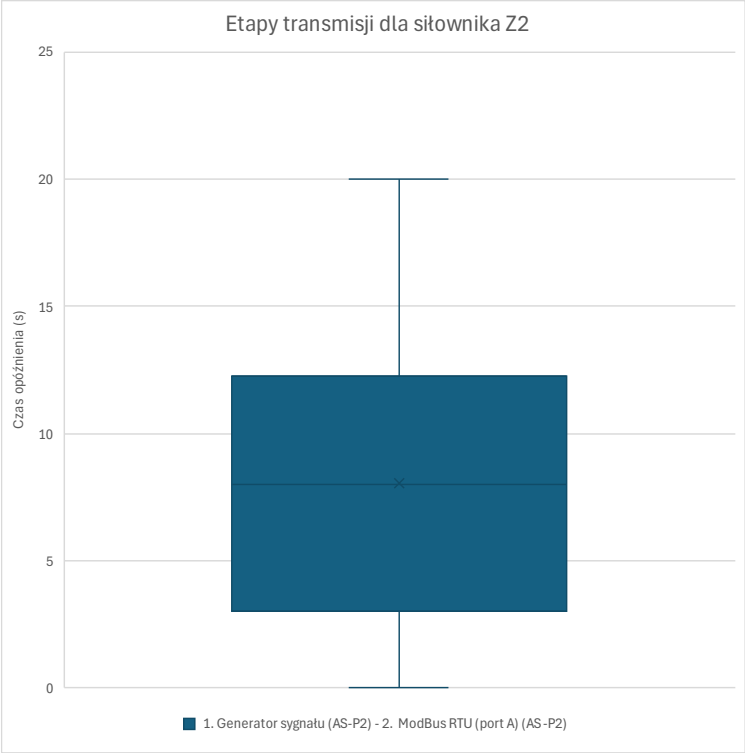


Rys. 10.12. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z2 – lokalna komunikacja ModBus RTU, 100 punktów pomiarowych



Rys. 10.13. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z2 – lokalna komunikacja ModBus RTU, 1000 punktów pomiarowych

Wykres (rys. 10.14.) przedstawia jednoetapową strukturę komunikacji w postaci transmisji lokalnej w protokole ModBus RTU.



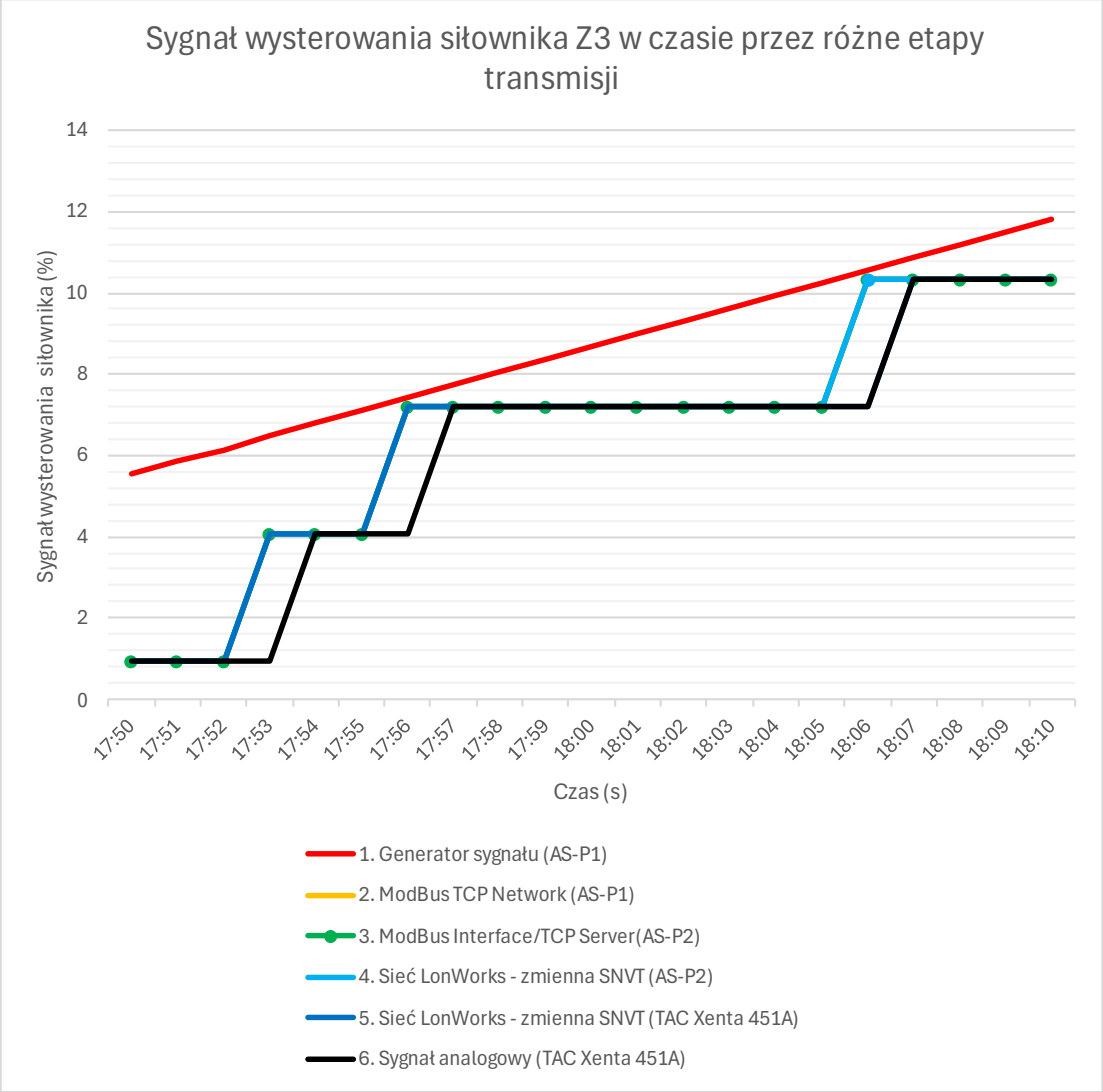
Rys. 10.14. Analiza statystyczna czasu propagacji sygnału sterującego dla siłownika Z2

1. Generator sygnału (AS-P2) → 2. ModBus RTU (port A) (AS-P2)

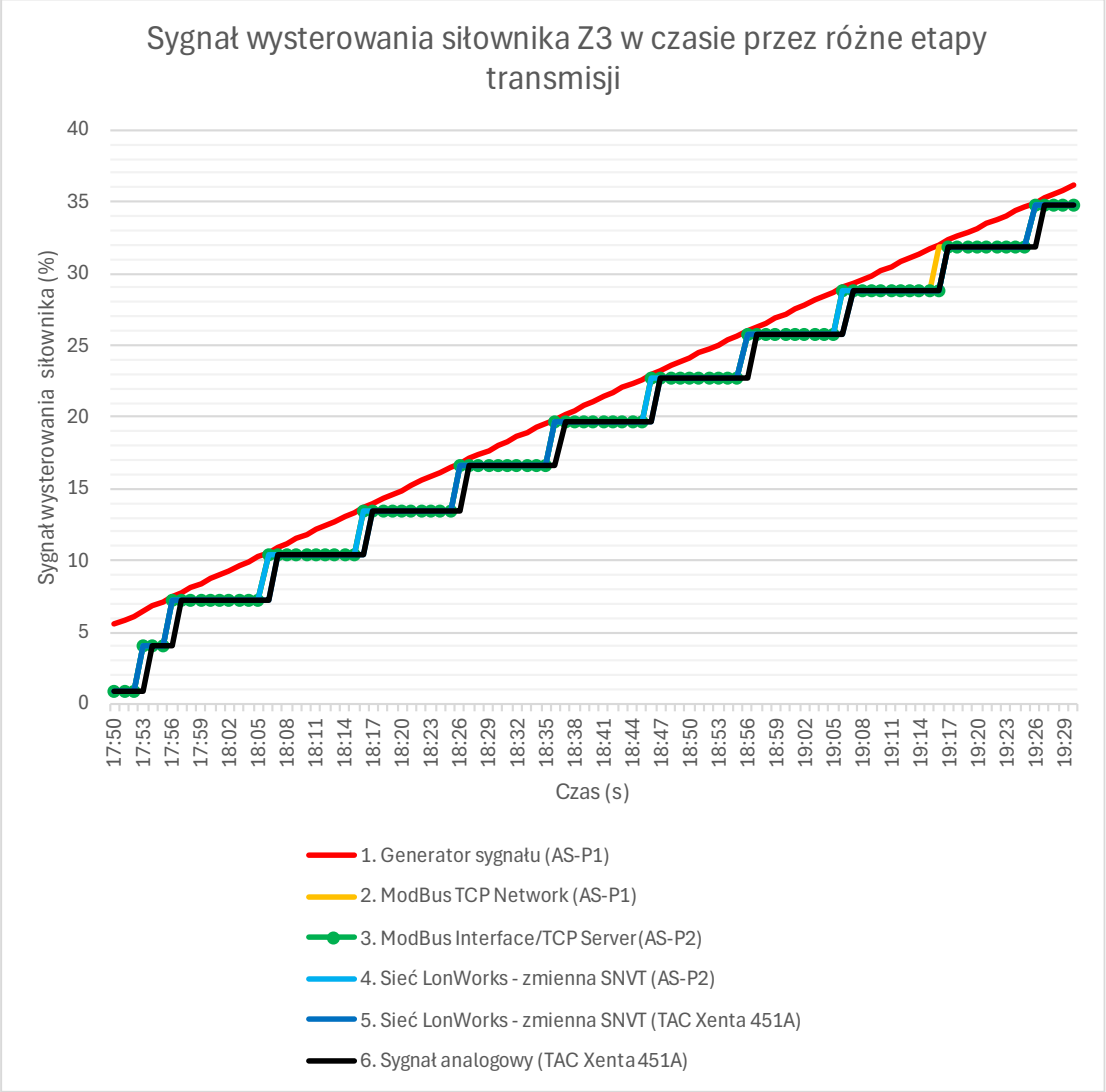
- Max: 20 s
- Min: 0 s
- Średni: 8,04 s

Rysunki 10.15.–10.17. przedstawiają transmisję sygnału dla siłownika Z3, obejmującą sześć etapów komunikacji: od ModBus TCP, przez LonWorks, aż do sterowania sygnałem analogowym.

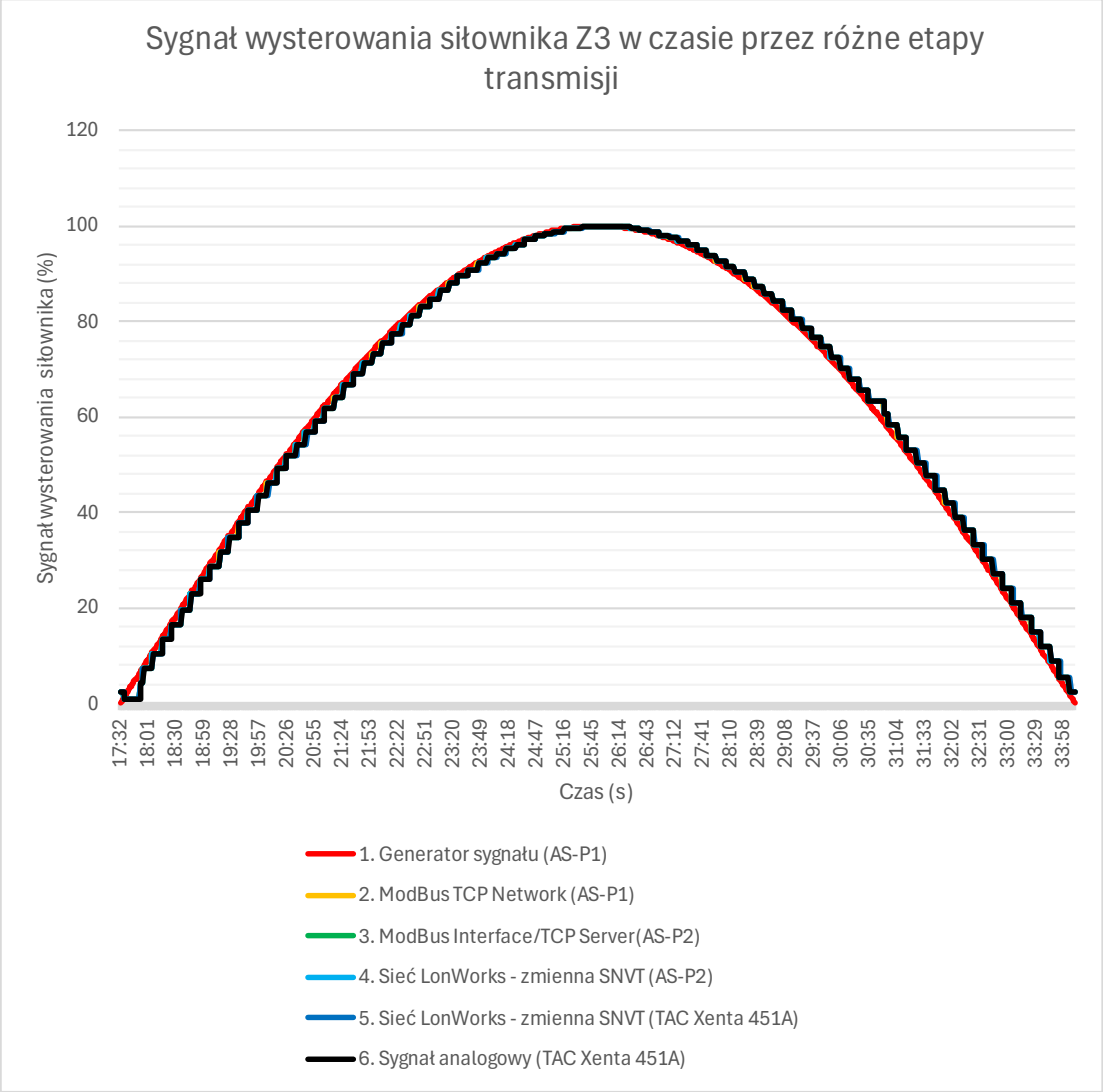
Pomimo wieloetapowej struktury, system wykazuje bardzo dobrą responsywność. Przy mniejszych próbkowaniach możliwa była dokładna identyfikacja opóźnień pomiędzy konwersją ModBus – LonWorks, natomiast wykresy z 1000 punktami potwierdzają stabilność całego łańcucha komunikacyjnego.



Rys. 10.15. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z3 – konfiguracja ModBus TCP + LonWorks + sygnał analogowy, 20 punktów pomiarowych

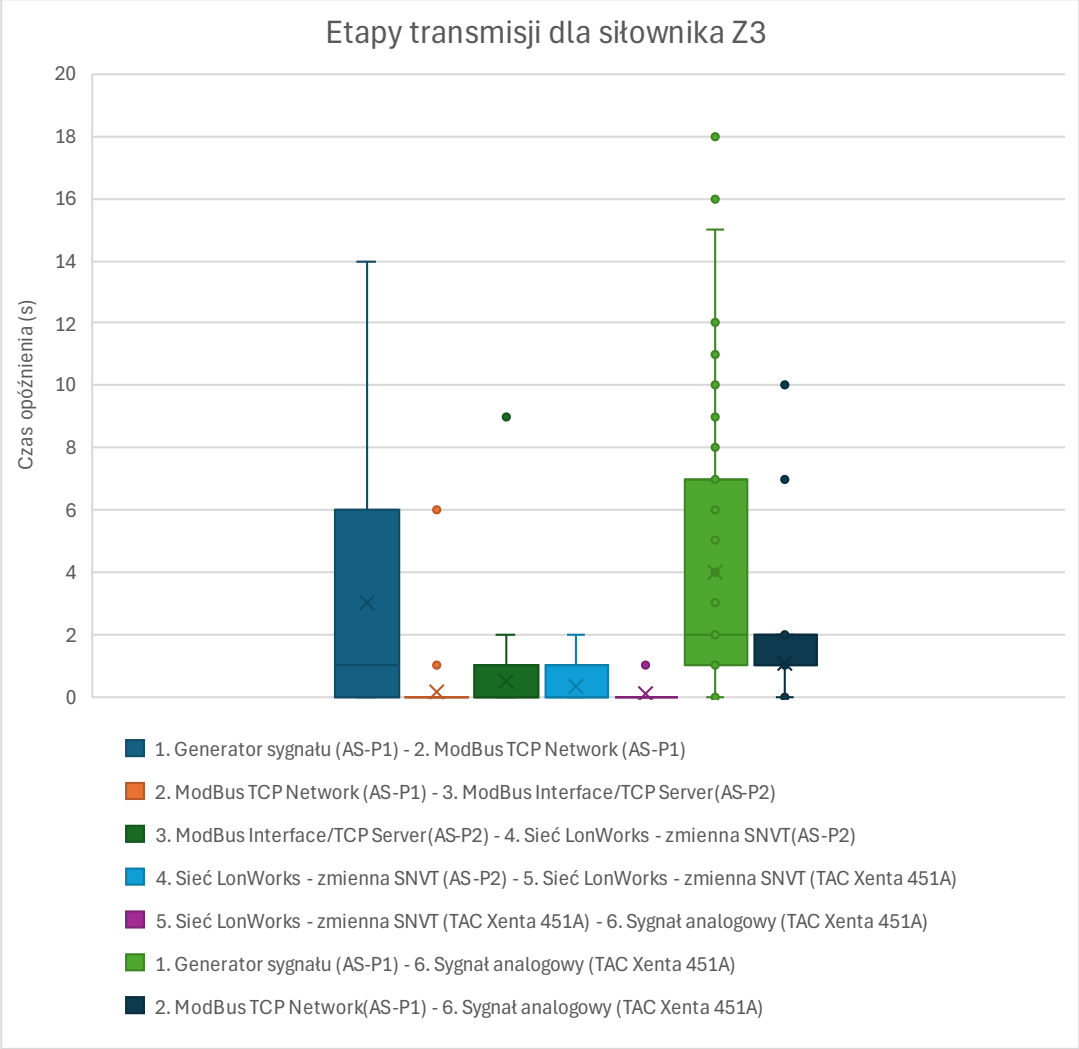


Rys. 10.16. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z3 – konfiguracja ModBus TCP + LonWorks + sygnał analogowy, 100 punktów pomiarowych



Rys. 10.17. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z3 – konfiguracja ModBus TCP + LonWorks + sygnał analogowy, 1000 punktów pomiarowych

Wykres (rys. 10.18.) przedstawia czasy transmisji dla siłownika Z3, w którym sygnał przechodzi przez złożoną strukturę: ModBus TCP, LonWorks i konwersję na sygnał analogowy. Widoczny jest niski poziom zmienności w późniejszych etapach transmisji, co świadczy o wysokiej stabilności systemu.



Rys. 10.18. Analiza statystyczna czasu propagacji sygnału sterującego dla siłownika Z3

1. Generator sygnału (AS-P1) → 2. ModBus TCP Network (AS-P1)

- Max: 14 s
- Min: 0 s
- Średni: 2,995 s

2. ModBus TCP Network (AS-P1) → 3. ModBus Interface/TCP Server(AS-P2)

- Max: 6 s
- Min: 0 s
- Średni: 0,145 s

3. ModBus Interface/TCP Server(AS-P2) → 4. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (AS-P2)

- Max: 9 s
- Min: 0 s
- Średni: 0,495 s

4. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (AS-P2) → 5. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (TAC Xenta 451A)

- Max: 2 s
- Min: 0 s
- Średni: 0,325 s

5. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (TAC Xenta 451A) → 6. Sygnał analogowy (TAC Xenta 451A)

- Max: 1 s
- Min: 0 s
- Średni: 0,11 s

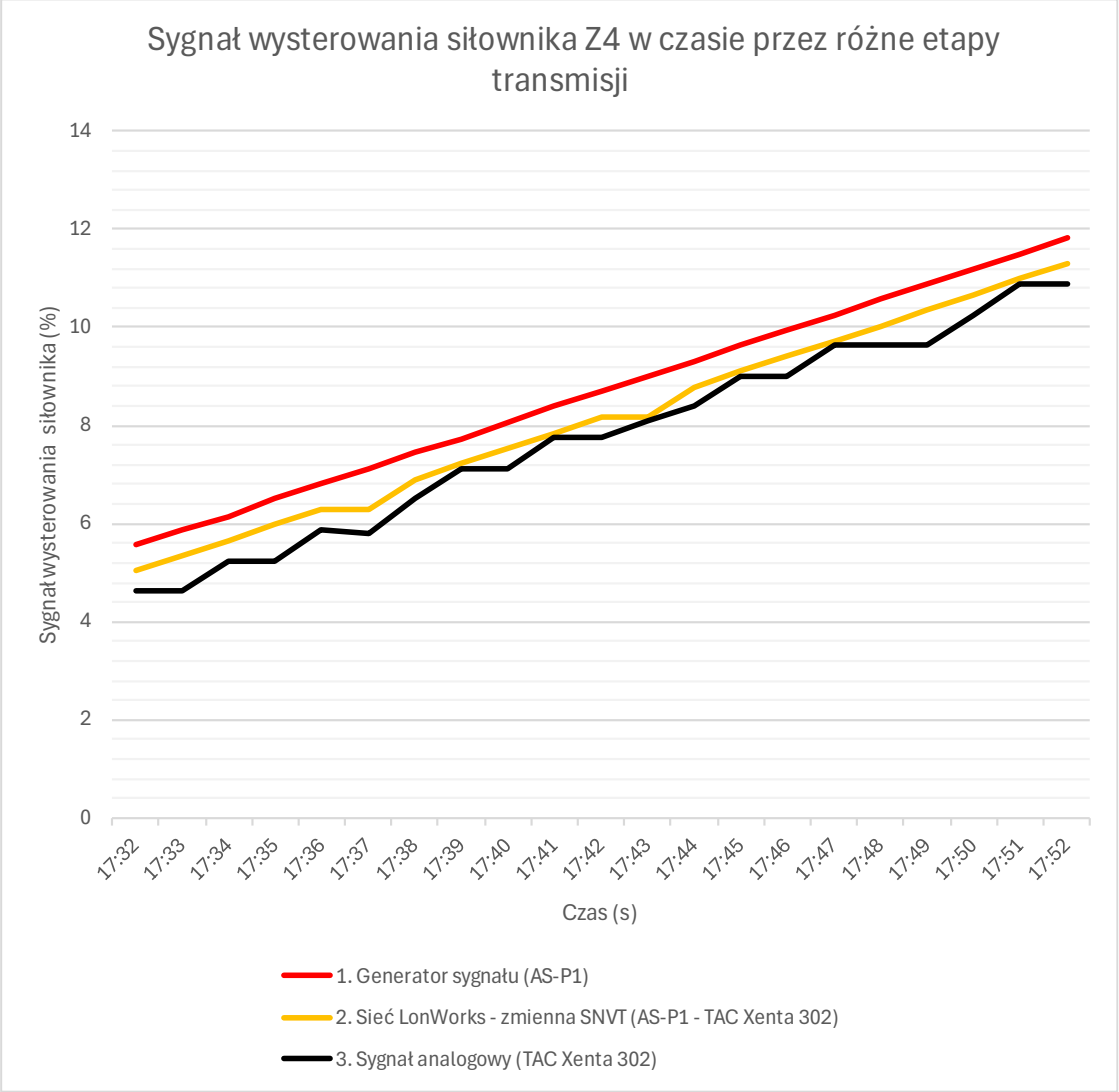
1. Generator sygnału (AS-P1) → 6. Sygnał analogowy (TAC Xenta 451A)

- Max: 18 s
- Min: 0 s
- Średni: 3,635 s

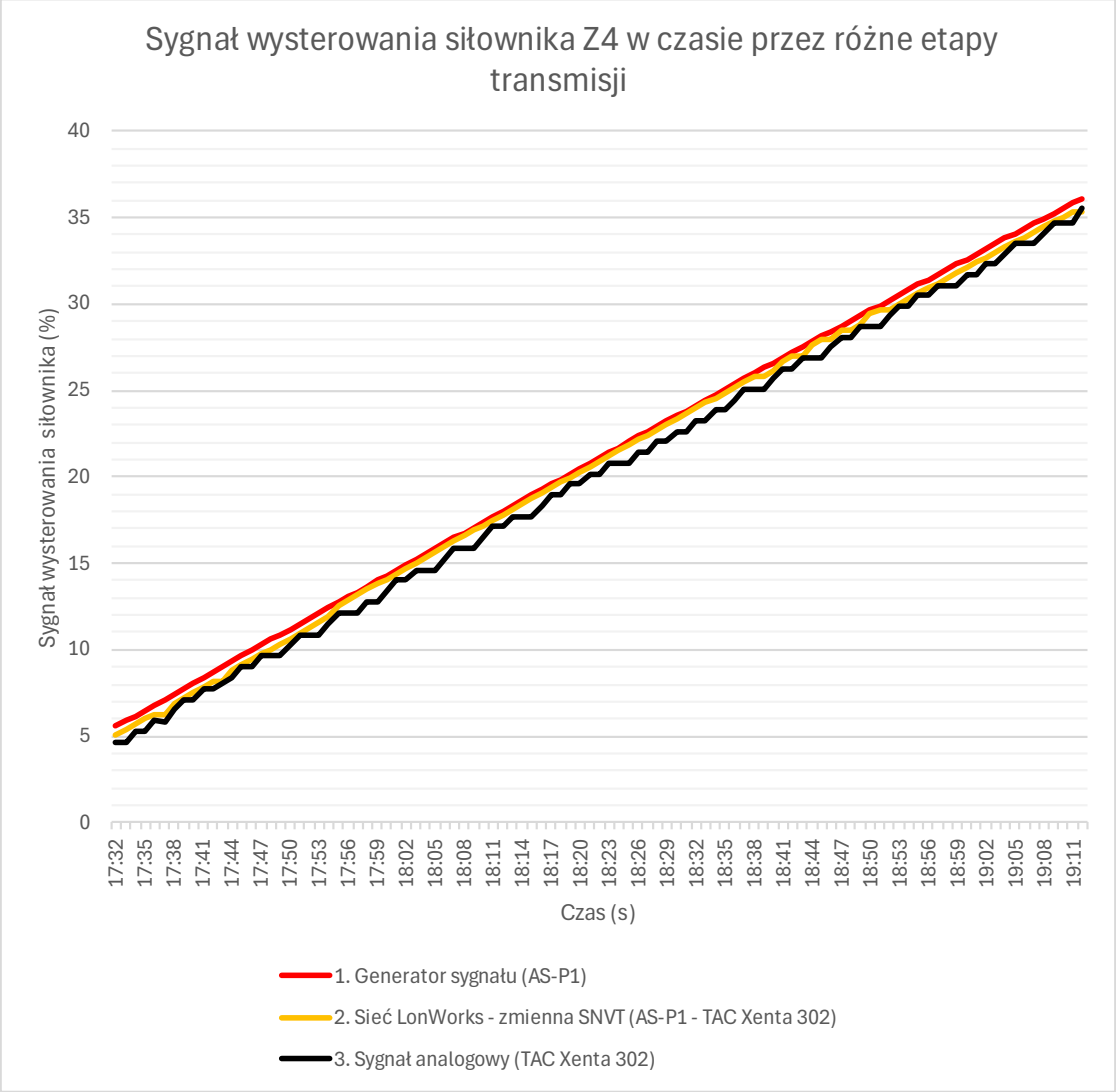
Dane pomiarowe transmisji bez pierwszego etapu:
2. ModBus TCP Network (AS-P1) → 6. Sygnał analogowy (TAC Xenta 451A)

- Max: 10 s
- Min: 0 s
- Średni: 1,075 s

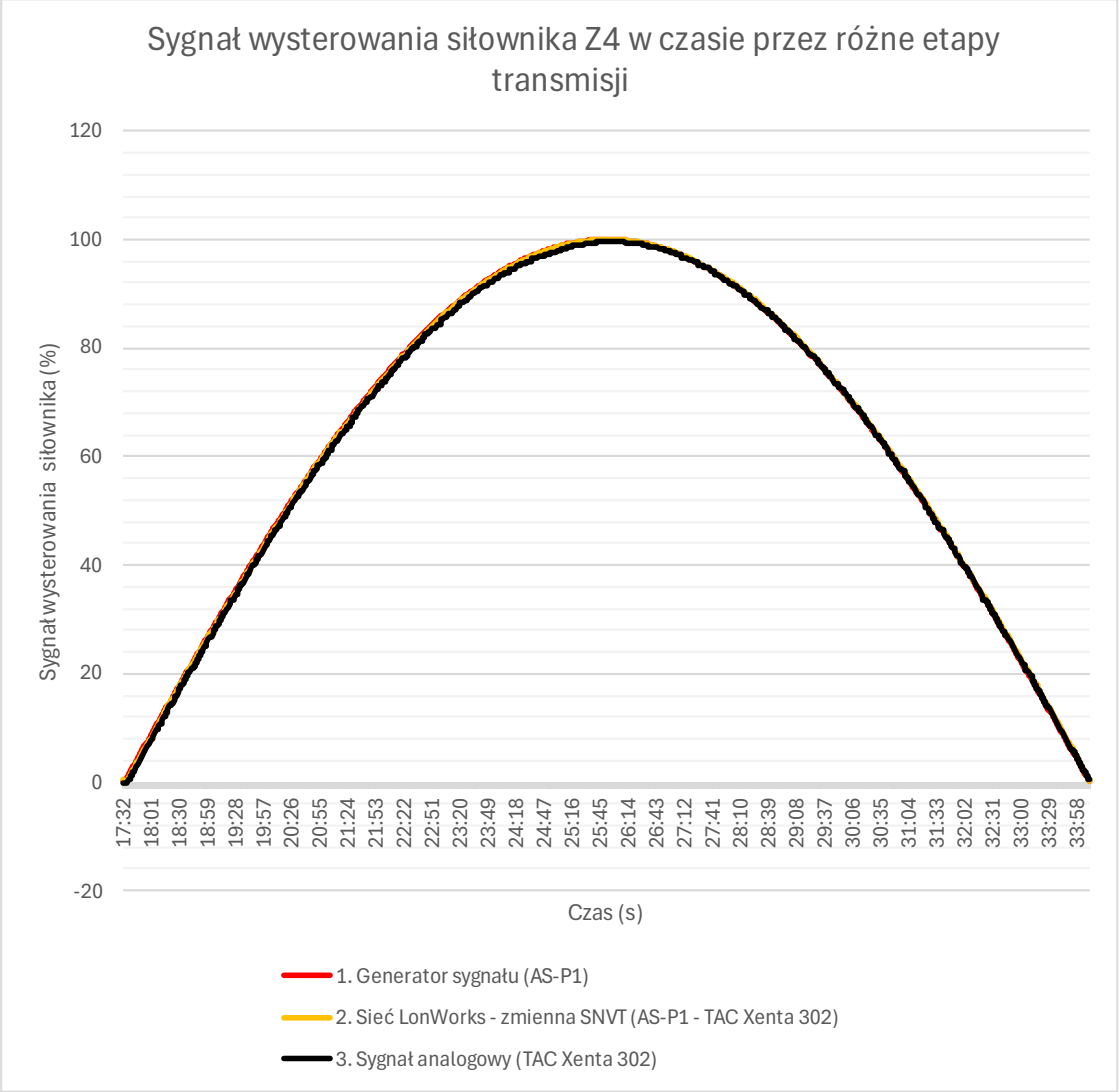
Rys. 10.19. –10.21. prezentują wyniki transmisji sygnału do siłownika Z4, realizowanej w pełni z wykorzystaniem sieci LonWorks oraz sygnału analogowego. System ten, dzięki najprostszej konfiguracji, charakteryzuje się najniższymi wartościami opóźnień i bardzo wysoką stabilnością.
Wykresy przy małych próbkowaniach pozwalają na rozróżnienie etapów związanych z transmisją zmiennej SNVT oraz konwersją na sygnał analogowy, a przy większej liczbie punktów potwierdzają równomierność przesyłu.



Rys. 10.19. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z4 – komunikacja LonWorks + sygnał analogowy, 20 punktów pomiarowych

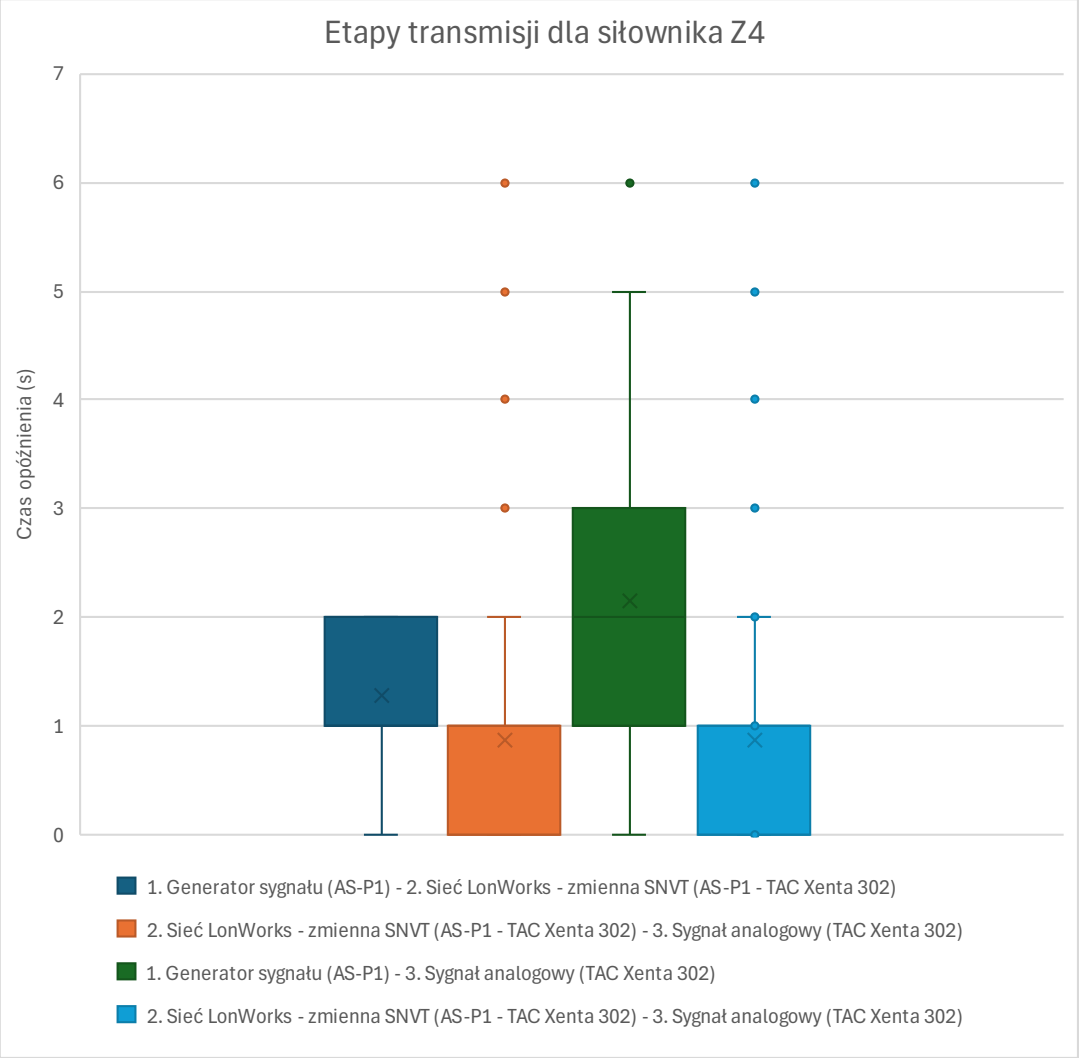


Rys. 10.20. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z4 – komunikacja LonWorks + sygnał analogowy, 100 punktów pomiarowych



Rys. 10.21. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z4 – komunikacja LonWorks + sygnał analogowy, 1000 punktów pomiarowych

Wykres (rys. 10.22.) przedstawia transmisję dla siłownika Z4, którego ścieżka sygnału oparta jest wyłącznie na sieci LonWorks i wyjściu analogowym. Rozkład czasów wskazuje na przewidywalne i równomierne działanie obu etapów przesyłu.



Rys. 10.22. Analiza statystyczna czasu propagacji sygnału sterującego dla siłownika Z4

1. Generator sygnału (AS-P1) - 2. Sieć LonWorks → zmienna SNVT (AS-P1 - TAC Xenta 302)

- Max: 2 s
- Min: 0 s
- Średni: 1,275 s

2. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (AS-P1 - TAC Xenta 302) → 3. Sygnał analogowy (TAC Xenta 302)

- Max: 6 s
- Min: 0 s
- Średni: 0,87 s

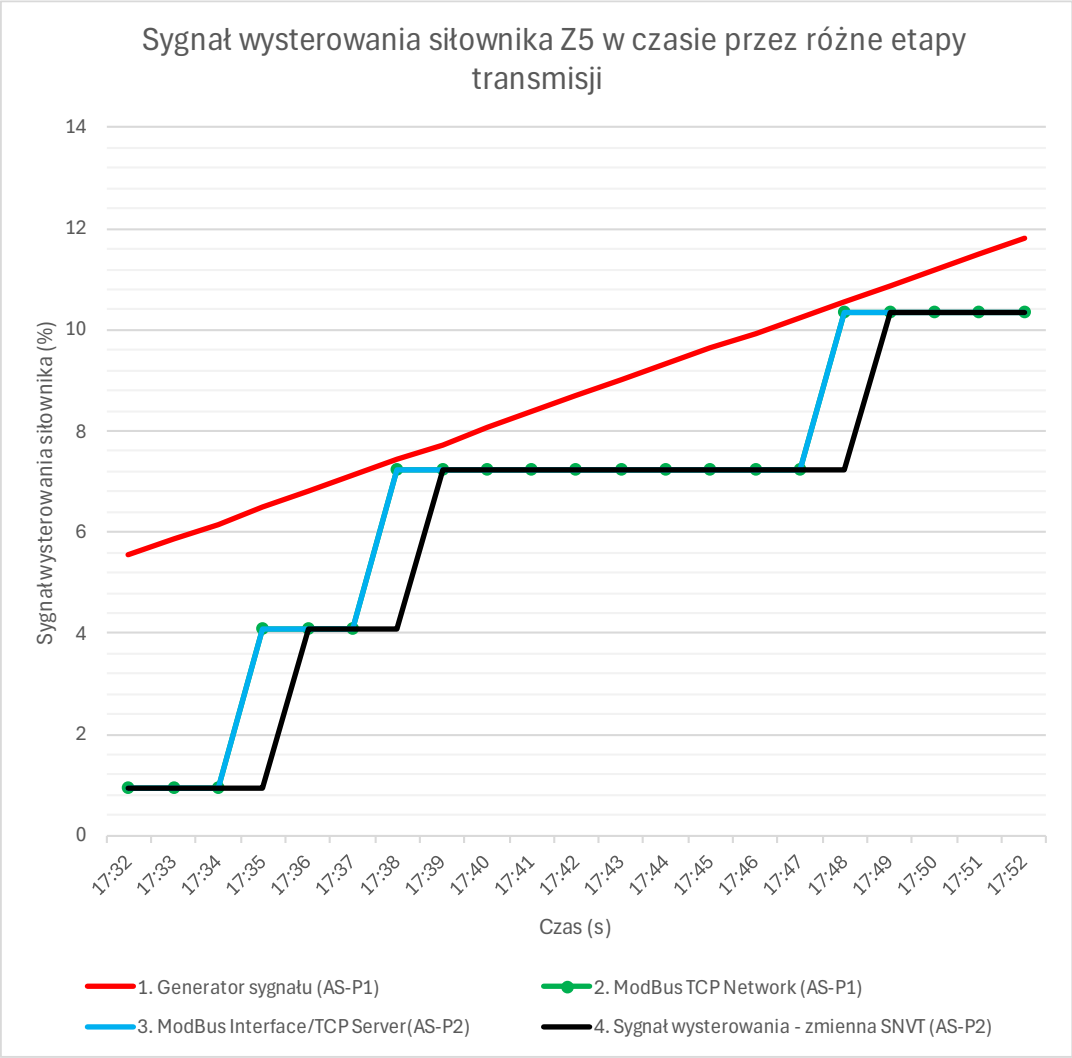
1. Generator sygnału (AS-P1) → 3. Sygnał analogowy (TAC Xenta 302)

- Max: 6 s
- Min: 0 s
- Średni: 2,145 s

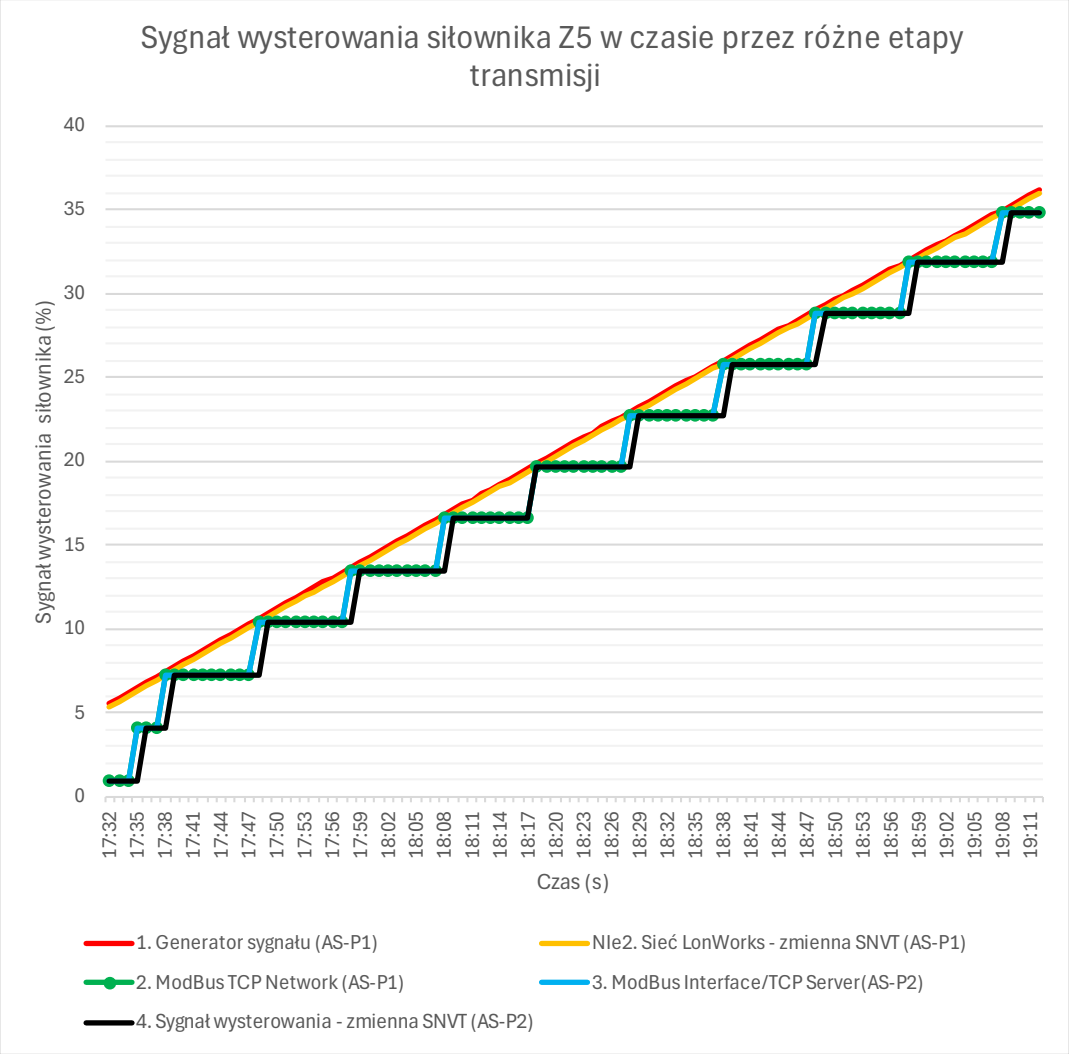
Dane pomiarowe transmisji bez pierwszego etapu:
2. Sieć LonWorks - zmienna SNVT (AS-P1 - TAC Xenta 302) → 3. Sygnał analogowy (TAC Xenta 302)

- Max: 6 s
- Min: 0 s
- Średni: 0,87 s

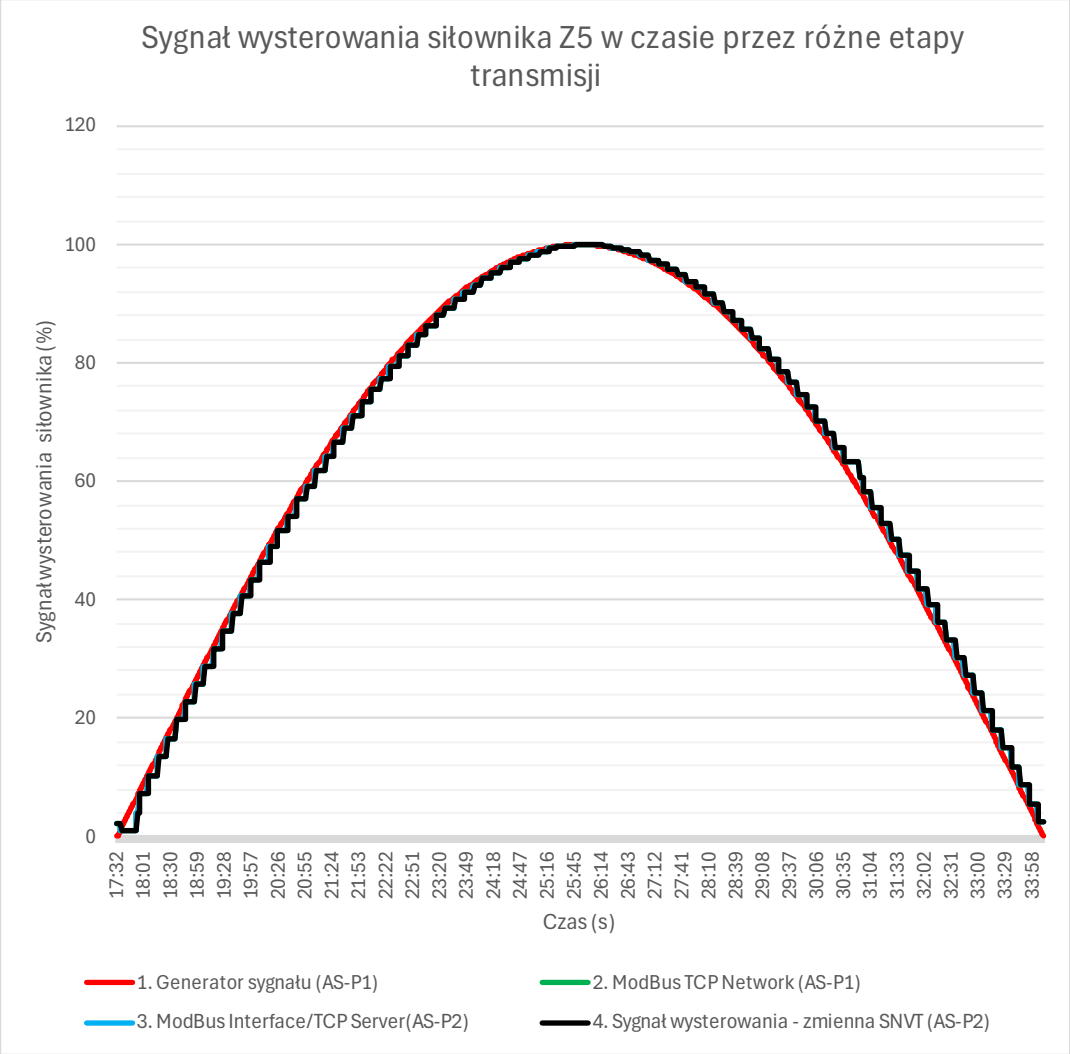
Rysunki 10.23. –10.25. ukazują przebiegi transmisji dla siłownika Z5, zrealizowanej w konfiguracji hybrydowej ModBus TCP + LonWorks. Sygnał przesyłany był z AS-P1 do AS-P2 poprzez TCP, a następnie konwertowany na zmienną SNVT i przekazywany do siłownika.
Analiza wykresów pokazuje, że najdłuższe opóźnienia występują w etapie transmisji TCP. Mimo tego, system działa stabilnie, a rozkład czasów przy 1000 próbkach wskazuje na powtarzalność działania całej struktury transmisyjnej.



Rys. 10.23. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z5 – konfiguracja ModBus TCP + LonWorks, 20 punktów pomiarowych

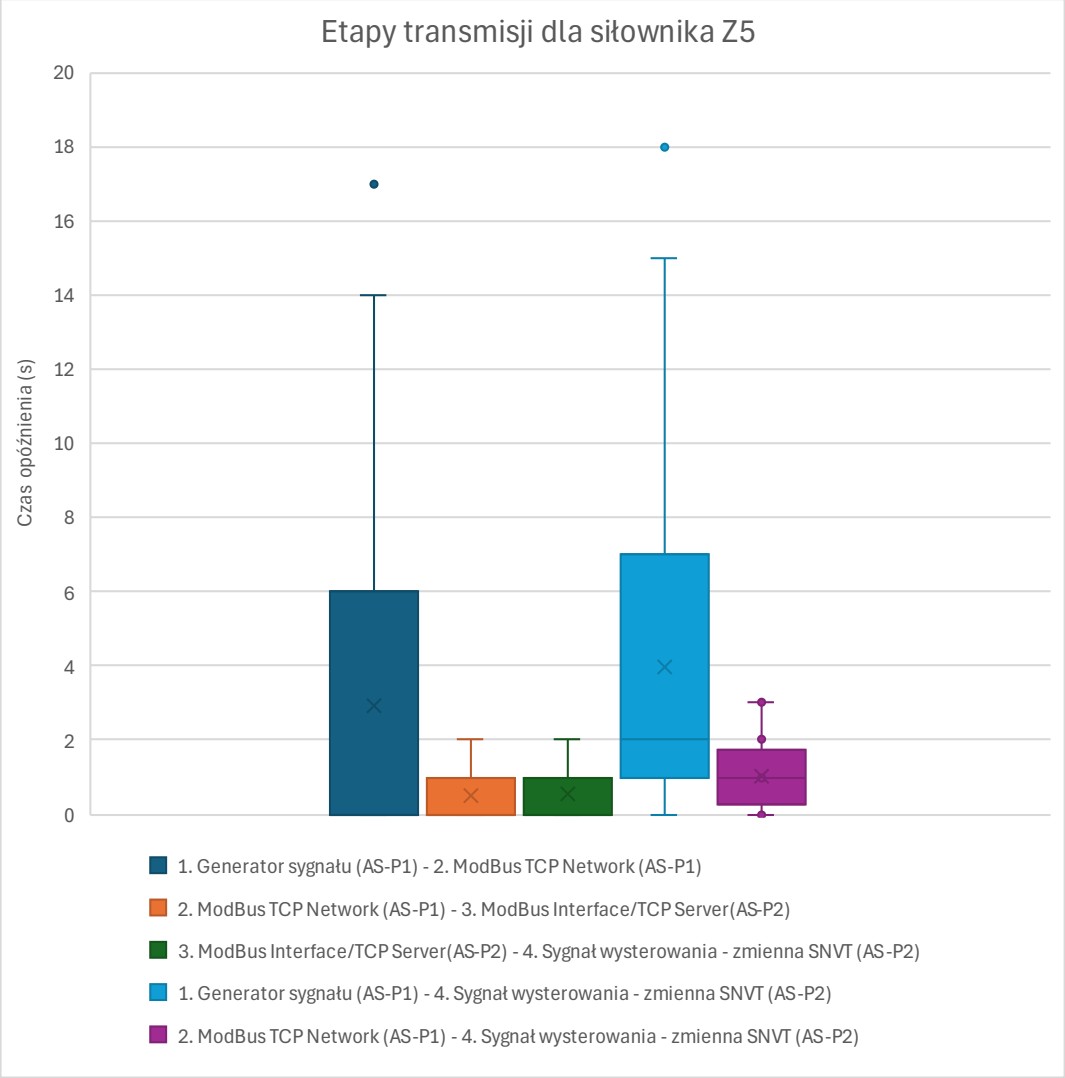


Rys. 10.24. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z5 – konfiguracja ModBus TCP + LonWorks, 100 punktów pomiarowych



Rys. 10.25. Przebieg transmisji sygnału dla siłownika Z5 – konfiguracja ModBus TCP + LonWorks, 1000 punktów pomiarowych

Wykres (rys. 10.26.) przedstawia rozrzut czasów propagacji sygnału pomiędzy kolejnymi etapami transmisji.



Rys. 10.26. Analiza statystyczna czasu propagacji sygnału sterującego dla siłownika Z5

1. Generator sygnału (AS-P1) → 2. ModBus TCP Network (AS-P1)

- Max: 17 s
- Min: 0 s
- Średni: 2,945 s

2. ModBus TCP Network (AS-P1) → 3. ModBus Interface/TCP Server(AS-P2)

- Max: 2 s
- Min: 0 s
- Średni: 0,495 s

3. ModBus Interface/TCP Server(AS-P2) → 4. Sygnał wysterowania - zmienna SNVT (AS-P2)

- Max: 2 s
- Min: 0 s
- Średni: 0,53 s

1. Generator sygnału (AS-P1) → 4. Sygnał wysterowania - zmienna SNVT (AS-P2)

- Max: 18 s
- Min: 0 s
- Średni: 3,97 s

Dane pomiarowe transmisji bez pierwszego etapu:
2. ModBus TCP Network (AS-P1) → 4. Sygnał wysterowania - zmienna SNVT (AS-P2)

- Max: 3 s
- Min: 0 s
- Średni: 1,025 s

10.2.2 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem przeprowadzonych badań była analiza czasów transmisji sygnałów sterujących w różnych konfiguracjach sieciowych, protokołach komunikacyjnych oraz topologiach systemu automatyki. Dane pomiarowe zostały zebrane dla pięciu siłowników (Z1–Z5), w oparciu o 1000 punktów pomiarowych, co umożliwiło ocenę stabilności i dynamiki transmisji.

a) Z1 – ModBus TCP + ModBus RTU (transmisja zdalna, 4 etapy)
    - Średni czas transmisji całkowitej: ok. 15,9 s (AS-P2 → AS-P1 (ModBus RTU)),
    - Średni czas transmisji bez pierwszego etapu: ok. 7,1 s (AS-P2 (ModBus TCP) → AS-P1 (ModBus RTU)),
    - Najdłuższe opóźnienia odnotowano przy transmisji z generatora do interfejsu TCP (średnio: 8,34 s),
    - Pozostałe etapy: TCP Network (1,56 s), konwersja do RTU (6,03 s).

    Wnioski: Najbardziej czasochłonny był pierwszy etap przetwarzania sygnału; sieć ModBus TCP w tym scenariuszu nie wykazuje dużych

opóźnień, ale konwersja między protokołami generuje wyraźne czasy propagacji.

b) Z2 – ModBus RTU (transmisja lokalna, 2 etapy)
   - Średni czas transmisji: 8,04 s,
   - Transmisja odbywa się w sposób bezpośredni, bez pośrednictwa sieci TCP.

   Wnioski: Transmisja RTU lokalna jest stabilna i czasowo przewidywalna – choć czasy nie są krótsze od niektórych złożonych scenariuszy, wynika to z pomiarów w stanie rzeczywistym (z opóźnieniami sprzętowymi).

c) Z3 – ModBus TCP + LonWorks + analog (6 etapów)
   - Średni czas transmisji całkowitej: 3,64 s,
   - Średni czas transmisji bez pierwszego etapu: ok. 1,1 s,
   - Najdłużej trwał pierwszy etap (AS-P1 (generator) → AS-P1 (ModBus TCP)): 2,99 s,
   - Kolejne etapy (AS-P1 (ModBus TCP) → Xenta 451A (SNVT) → sygnał analogowy: każdy od 0,11 do 0,5 s.

   Wnioski: Pomimo złożoności struktury, system wykazał bardzo niskie czasy opóźnień. Konwersja z ModBus TCP na sieś LonWorks (SNVT) oraz przesył analogowy charakteryzują się wysoką responsywnością.

d) Z4 – LonWorks + analog (3 etapy)
   - Średni czas transmisji całkowitej: 2,15 s,
   - Średni czas transmisji bez pierwszego etapu: ok. 0,9 s,
   - AS-P1 (generator) → TAC Xenta 302 - LonWorks (SNVT): 1,275 s,
   - TAC Xenta 302 - LonWorks (SNVT) → sygnał analogowy: 0,87 s.

   Wnioski: System w pełni oparty o LonWorks i transmisję analogową jest wydajny i szybki, z najniższymi wartościami maksymalnymi wśród badanych przypadków.

e) Z5 – ModBus TCP + LonWorks (4 etapy)
   - Średni czas transmisji całkowitej: 3,97 s,
   - Średni czas transmisji bez pierwszego etapu: ok. 1,03 s,
   - AS-P1 (generator) → AS-P1 (ModBus TCP): 2,945 s,
   - AS-P1 (ModBus TCP) → AS-P2 (ModBus TCP): 0,495 s,
   - AS-P2 (ModBus TCP) → sieć LonWorks (SNVT): 0,53 s.

Wnioski: Konfiguracja hybrydowa TCP + LonWorks działa stabilnie i przewidywalnie; główny czas opóźnienia występuje przy początkowej transmisji TCP.

W tabeli 10.1. znajduje się podsumowanie zbiorcze przeprowadzonych badań.

Siłownik	**Konfiguracja**	**Liczba etapów**	**Średni czas transmisji s**	**Średni czas transmisji bez pierwszego etapu s**	**Najdłuższy etap**
Z1	ModBus TCP + RTU	4	15,9	7,1	AS-P2 Generator → AS-P2 ModBus TCP Interface (8,3 s)
Z2	ModBus RTU (lokalnie)	2	8,04		AS-P2 Generator → AS-P2 ModBus RTU (8,0 s)
Z3	ModBus TCP + Lon + analog	6	3,64	1,1	AS-P1 Generator → AS-P1 ModBus TCP Network (2,99 s)
Z4	LonWorks + analog	3	2,15	0,9	AS-P1 Generator → TAC Xenta 302 LonWorks SNVT (1,28 s)
Z5	ModBus TCP + LonWorks	4	3,97	1,03	AS-P1 Generator → AS-P1 ModBus TCP Network (2,95 s)

Tabela 10.1. Podsumowanie zbiorcze przeprowadzonych badań

Najwyższe czasy transmisji występują w przypadku konwersji między generatorem a ModBus TCP (Z1), co wynika z konieczności przekształcania sygnału i komunikacji między sterownikami.
Lokalne połączenie RTU (Z2) choć proste, nie zawsze gwarantuje najniższe opóźnienia – istotny jest wpływ warunków sprzętowych.
Systemy hybrydowe TCP + LonWorks (Z3, Z5) okazały się wyjątkowo efektywne czasowo, mimo złożonej architektury.
Najszybsze i najbardziej stabilne działanie uzyskano w pełni lokalnych scenariuszach LonWorks + sygnał analogowy (Z4).

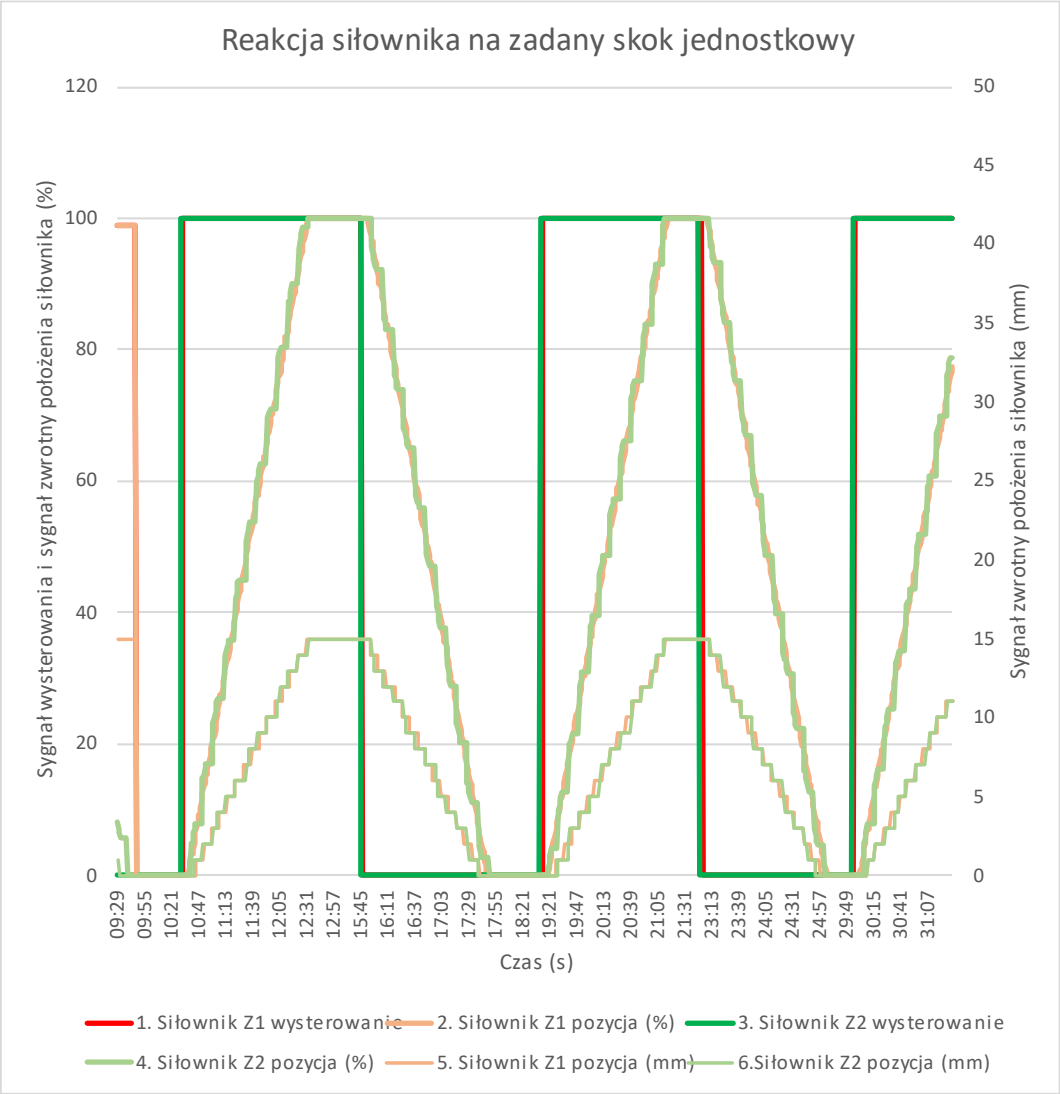
10.3. METODYKA BADAŃ REAKCJA SIŁOWNIKA NA ZADANY SKOK JEDNOSTKOWY

Celem badania było określenie, jak poszczególne siłowniki reagują na sygnał w postaci skoku jednostkowego. Do każdego siłownika przesyłano impuls sterujący o nagłej zmianie wartości (z poziomu 0 do maksymalnego poziomu zadania, bądź na odwrót). Krok próbkowania (częstotliwość próbkowania): 1 s. Badaniu poddano siłowniki pracujące zarówno w sieci ModBus (Z1, Z2), jak i LonWorks (Z3, Z4, Z5). Rejestrowano reakcję zwrotną siłownika – jego odpowiedź czasową w postaci zmiany pozycji i opóźnienia czasu reakcji siłownika na zadaną wartość. Łącznie przeanalizowano 10 procesów reakcji siłownika, na podstawie których wyznaczono wartości minimalne, maksymalne oraz średnie czasów reakcji.

10.3.1. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA ODPOWIEDZI SIŁOWNIKÓW

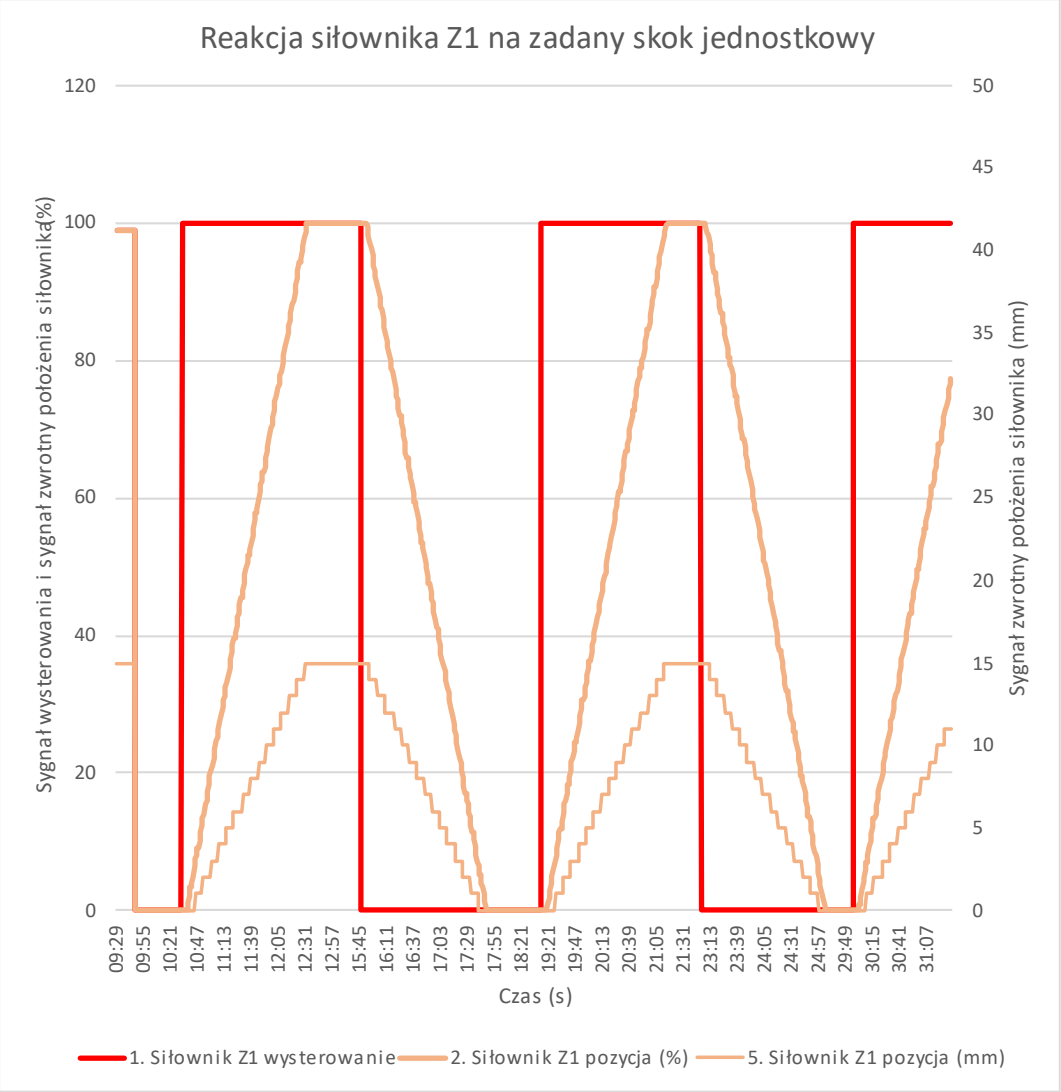
Uzyskane wykresy przedstawiają krzywe odpowiedzi położenia siłowników na impuls sterujący. Analiza przebiegów pozwala ocenić charakter reakcji czas odpowiedzi oraz ewentualne przeregulowanie. Widoczne są różnice w szybkości reakcji i dynamice zależne od typu siłownika oraz użytego protokołu komunikacyjnego.

Rysunek 10.27. przedstawia zestawienie porównawcze odpowiedzi siłowników Z1 i Z2 pracujących w sieci ModBus. Wykresy pokazują dynamikę reakcji na sygnał skokowy oraz różnice w czasie osiągnięcia zadanej pozycji. Dodano również informację o położeniu siłowników w mm.



Rys. 10.27. Porównanie reakcji siłowników ModBus (Z1–Z2) – zbiorcze zestawienie (dodatkowy sygnał zwrotny położenia siłowników w mm)

Na rysunku 10.28. widoczna jest szczegółowa odpowiedź siłownika Z1 (ModBus) na skok jednostkowy. Widać stabilny przebieg i niewielkie różnice czasowe między pomiarami.



Rys. 10.28. Reakcja siłownika Z1 (ModBus) na skok jednostkowy (dodatkowy sygnał zwrotny położenia siłownika w mm)

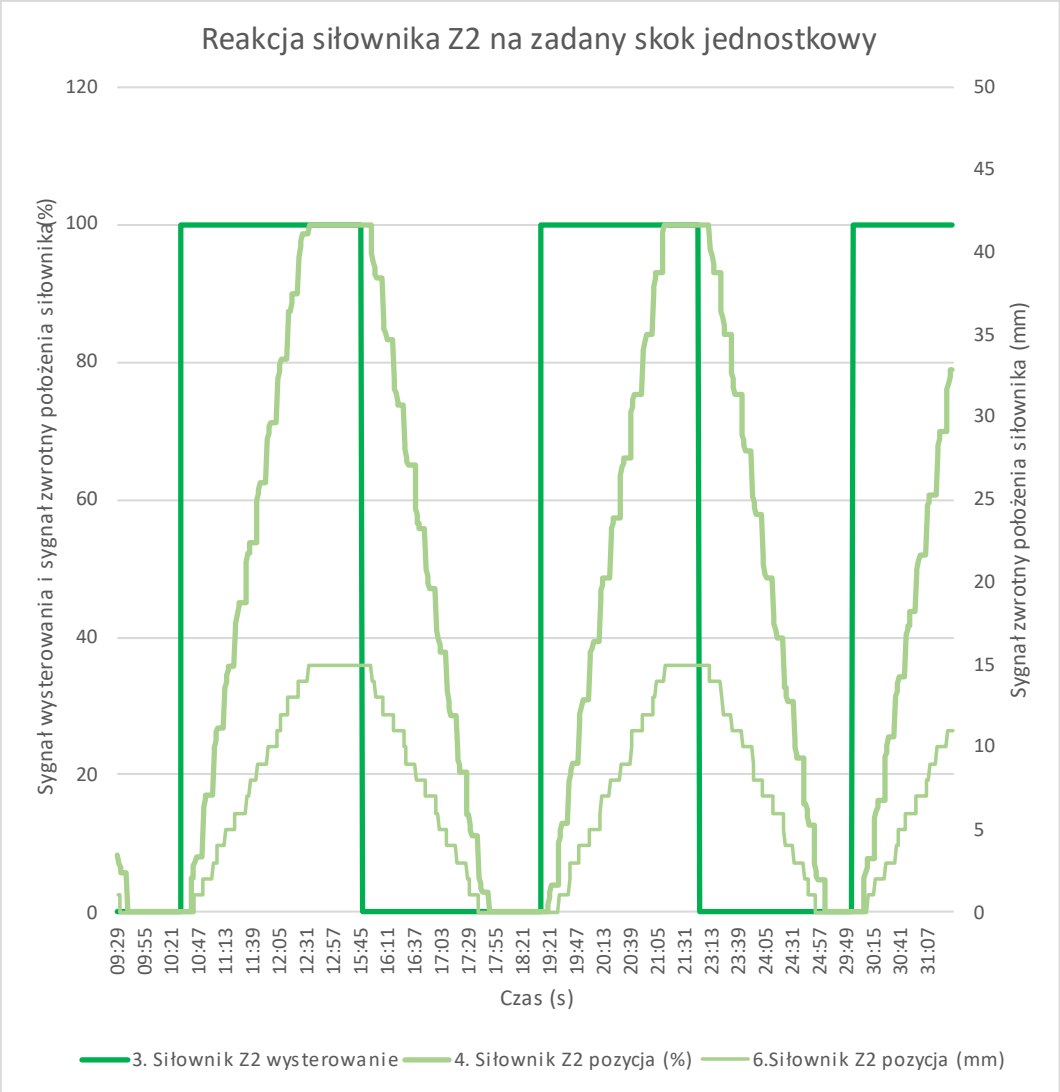
Czas pracy siłownika:

- Max: 121 s
- Min: 118 s
- Średni: 119,25 s

Czas reakcji siłownika na zadaną wartość:

- Max: 6 s
- Min: 4 s
- Średni: 4,75 s

Rysunek 10.29. obrazuje **r**eakcję siłownika Z2 (ModBus) – przebieg posiada wyraźne przeregulowania i większą zmienność czasów reakcji w porównaniu do siłownika Z1.



Rys. 10.29. Reakcja siłownika Z2 (ModBus) na skok jednostkowy (dodatkowy sygnał zwrotny położenia siłownika w mm)

Czas pracy siłownika:

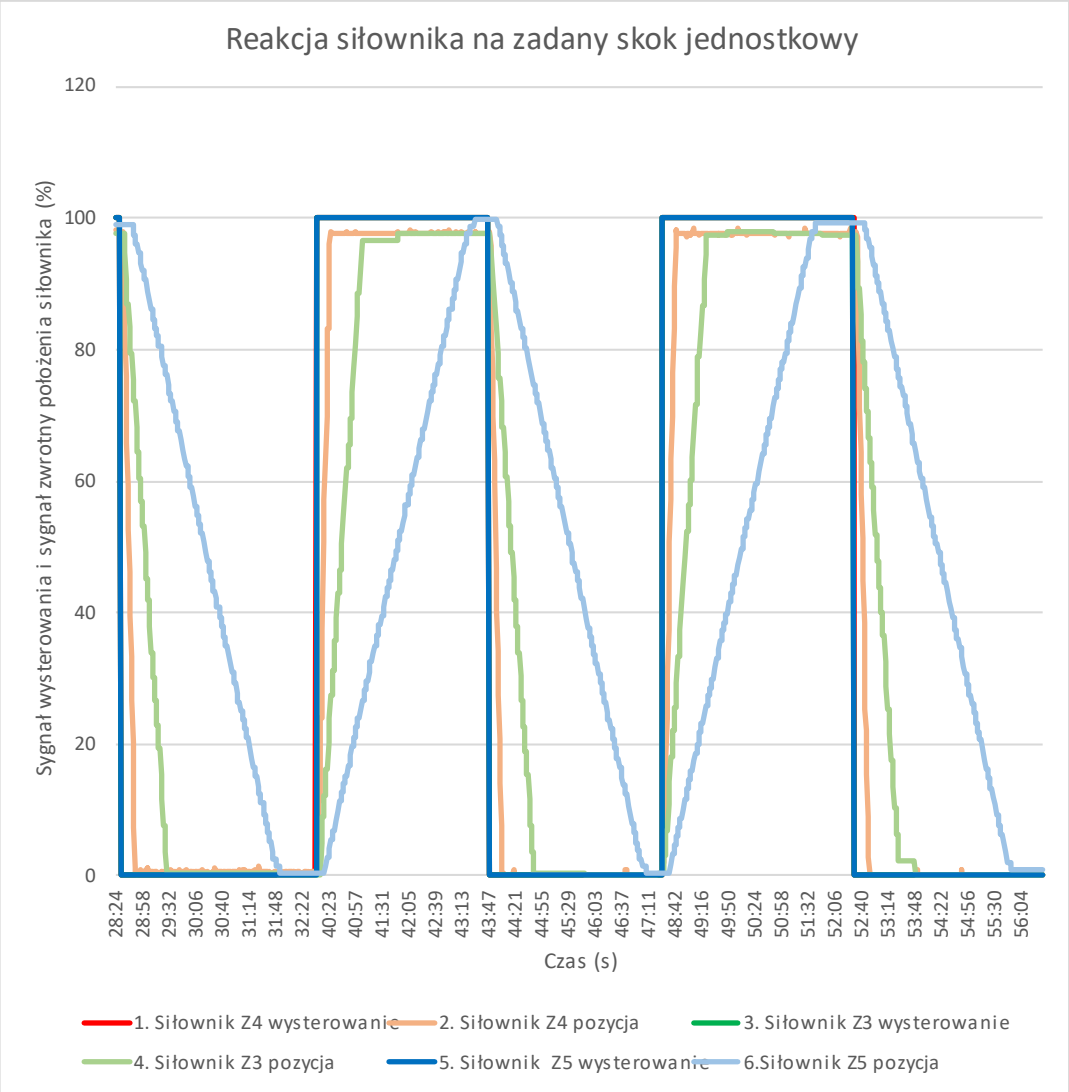
- Max: 123 s
- Min: 113 s
- Średni: 117,75 s

Czas reakcji siłownika na zadaną wartość:

- Max: 9 s
- Min: 5 s

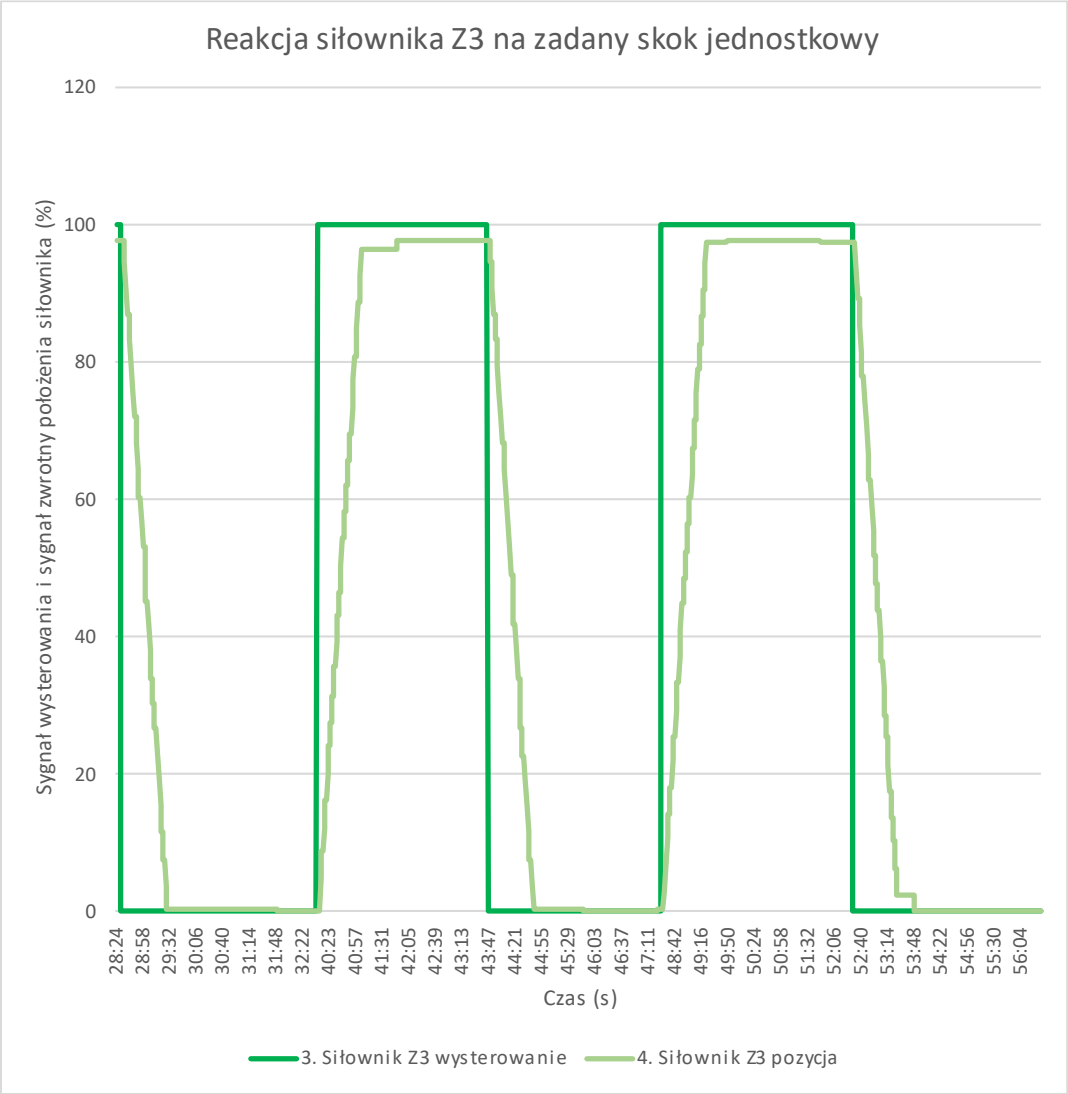
- Średni: 7,25 s

Na rysunku 10.30. widoczne jest porównanie odpowiedzi siłowników Z3, Z4 i Z5 działających w sieci LonWorks. Zbiorcze przedstawienie pozwala ocenić wpływ zastosowanej technologii na szybkość i precyzję odpowiedzi.



Rys. 10.30. Porównanie reakcji siłowników LonWorks (Z3–Z5) – zbiorcze zestawienie

Natomiast na rysunku 10.31. widać reakcję siłownika Z3 (LonWorks) – najszybsza odpowiedź spośród badanych siłowników z krótkim czasem reakcji i niewielkim czasem pracy.



Rys. 10.31. Reakcja siłownika Z3 (LonWorks) na skok jednostkowy

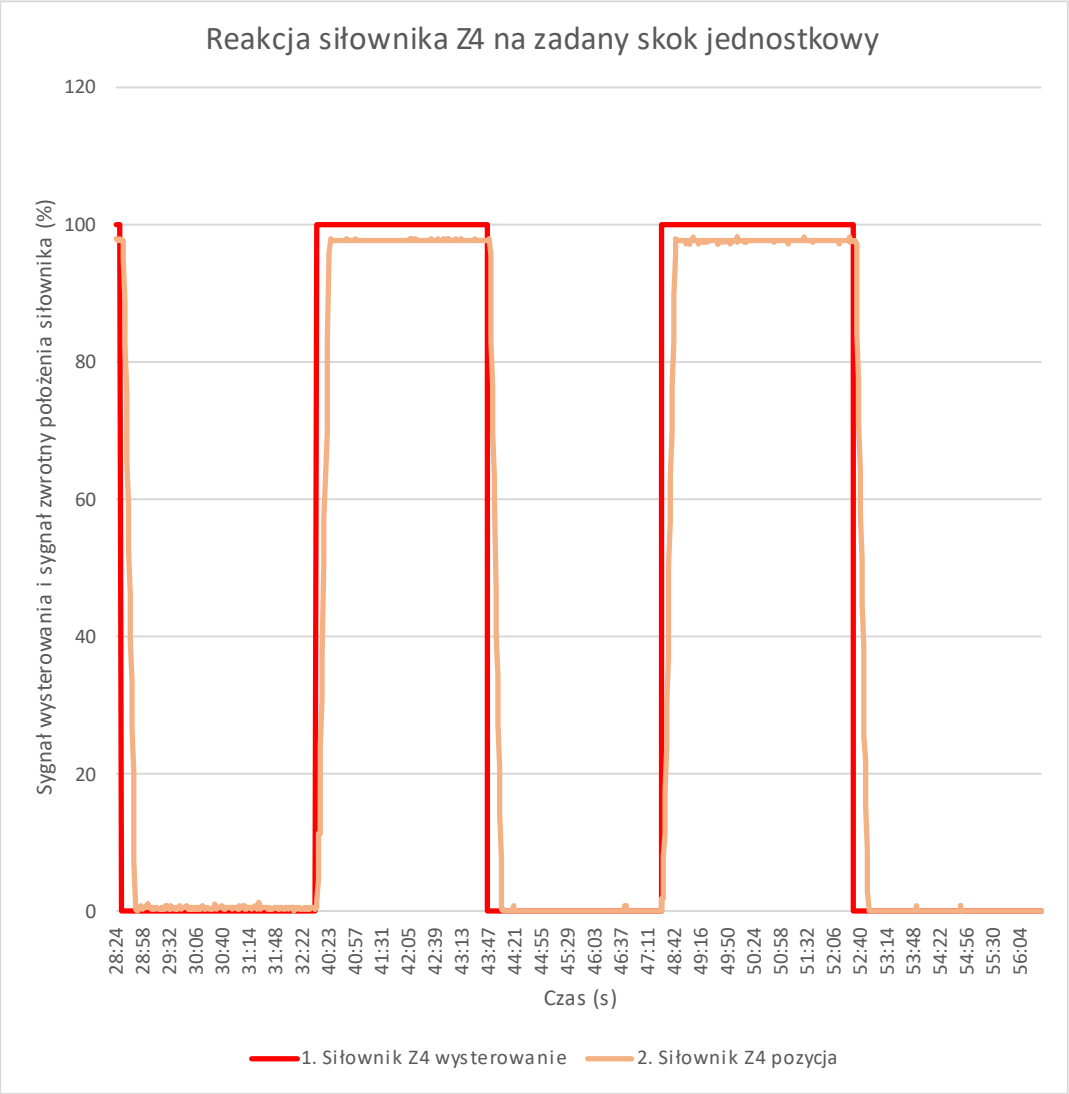
Czas pracy siłownika:

- Max: 20 s
- Min: 17 s
- Średni: 18,4 s

Czas reakcji siłownika na zadaną wartość:

- Max: 3 s
- Min: 1 s
- Średni: 2 s

Rysunek 10.32. obrazuje odpowiedź siłownika Z4 (LonWorks) charakteryzujący się wyraźną stabilizacją pracy siłownika.



Rys. 10.32. Reakcja siłownika Z4 (LonWorks) na skok jednostkowy

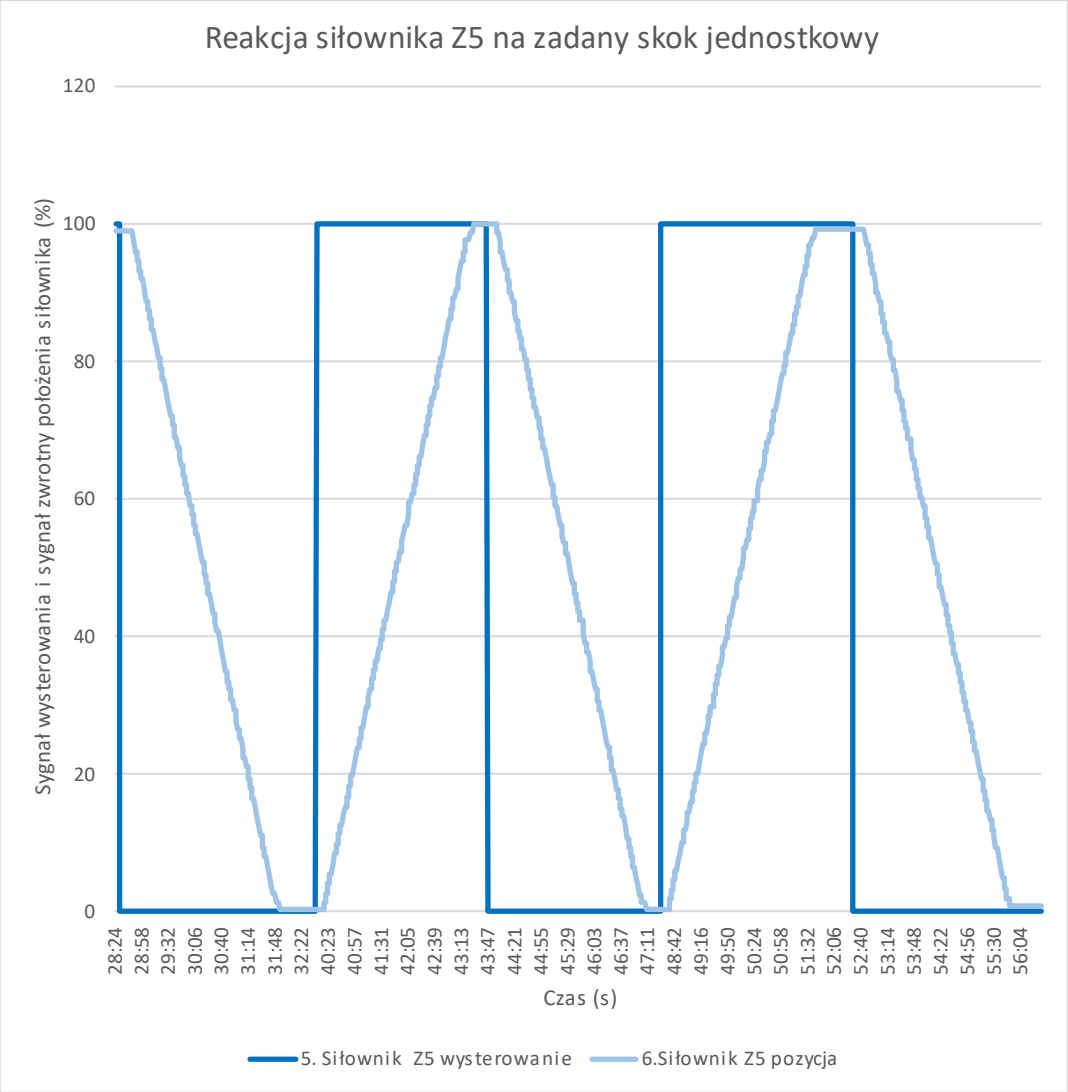
Czas pracy siłownika:

- Max: 76 s
- Min: 53 s
- Średni: 59,2 s

Czas reakcji siłownika na zadaną wartość:

- Max: 5 s
- Min: 3 s
- Średni: 4 s

Rysunek 10.33. przedstawia reakcję siłownika Z5 (LonWorks) – najdłuższy czas działania oraz najwyższy czas reakcji, co może wskazywać na większą bezwładność układu lub ograniczenia transmisyjne.



Rys. 10.33. Reakcja siłownika Z5 (LonWorks) na skok jednostkowy

Czas pracy siłownika:

- Max: 201 s
- Min: 185 s
- Średni: 189,8 s

Czas reakcji siłownika na zadaną wartość:

- Max: 12 s
- Min: 7 s

- Średni: 10 s

10.3.2 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań reakcji siłowników na skok jednostkowy można sformułować następujące wnioski:
Protokół komunikacyjny wpływa istotnie na dynamikę odpowiedzi siłowników. Siłowniki pracujące w sieci LonWorks (Z3–Z5) charakteryzują się generalnie krótszym czasem reakcji niż te w sieci ModBus (Z1–Z2), przy zachowaniu porównywalnej precyzji pozycjonowania.
Najlepszy czas reakcji odnotowano w siłowniku Z3 (LonWorks), gdzie średni czas odpowiedzi wynosił zaledwie 2 s. Dla porównania, siłownik Z2 (ModBus) osiągał średnio 7,25 s.
Czas pracy siłownika nie jest bezpośrednio skorelowany z czasem reakcji, co wskazuje na wpływ dodatkowych czynników, takich jak charakterystyka mechaniczna siłownika czy konfiguracja sieci.
Zmienność czasów reakcji wśród siłowników LonWorks również jest zauważalna – Z5 wykazał największe opóźnienia, co może wskazywać na różnice sprzętowe.

10.4. METODYKA BADAŃ DYNAMIKI ODPOWIEDZI SIŁOWNIKA NA SYGNAŁ STERUJĄCY

Celem badania była szczegółowa analiza odpowiedzi dynamicznej dwóch siłowników – Z1 (komunikujący się za pośrednictwem protokołu ModBus TCP/RTU) oraz Z3 (działający w sieci LonWorks) – na zmienny w czasie sygnał sterujący. Analizowano zdolność siłowników do odwzorowania sygnału zadawanego.
W analizie skupiono się na wyznaczeniu:

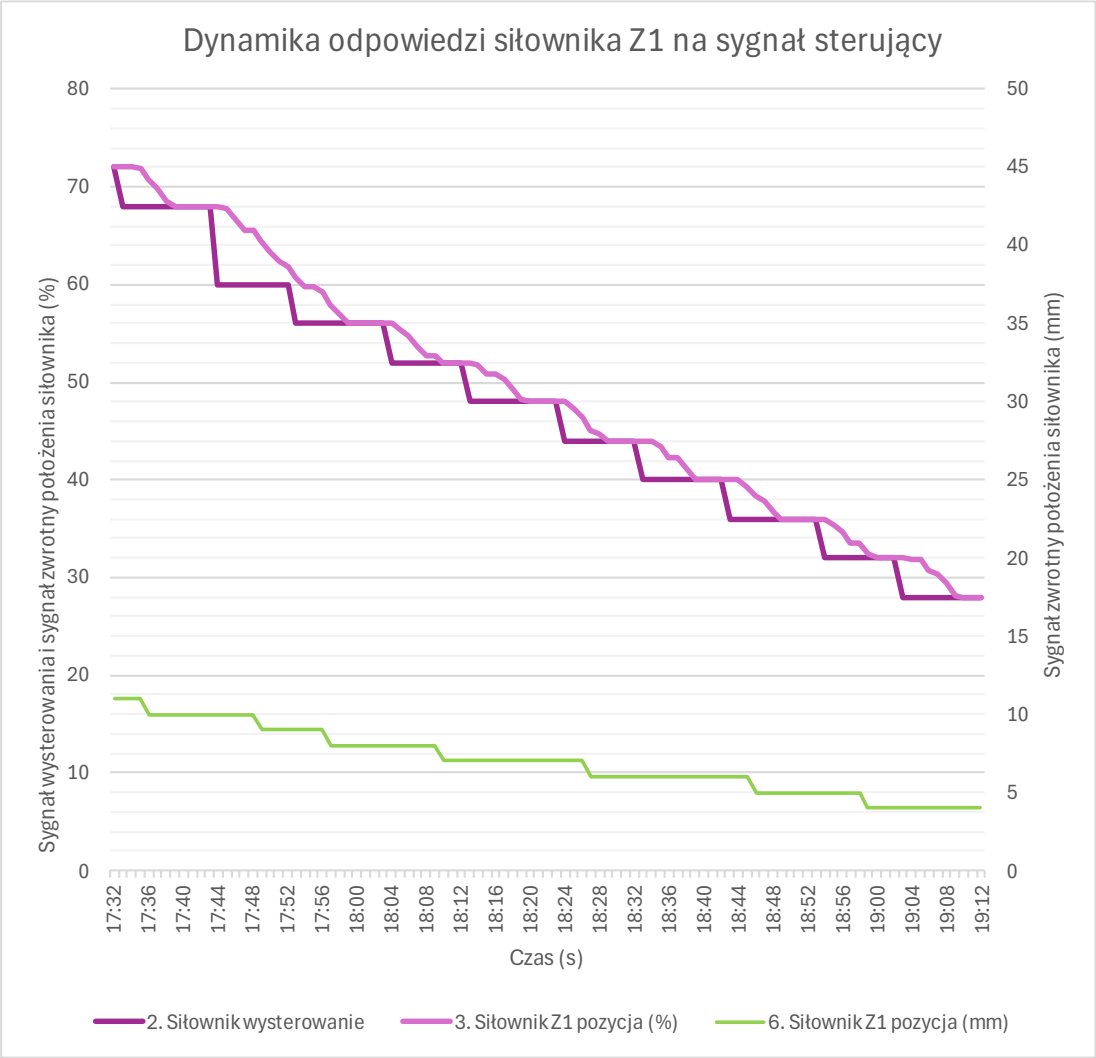
- czasu reakcji – definiowanego jako czas osiągnięcia przez siłownik wartości zadanej,
- ewentualnych przeregulowań (nadmiarowej odpowiedzi ponad wartość zadaną),
- stabilności odpowiedzi w czasie oraz jej zgodności z wartością referencyjną.

Do badań zastosowano sygnał sterujący o zmiennej wartości (narastającej i malejącej), przy rozdzielczości próbkowania wynoszącej 1000 punktów i kroku czasowym równym 1 sekundzie. W każdej serii mierzono rzeczywiste położenie siłownika względem wartości zadanej, co umożliwiło ocenę zachowania układu w warunkach dynamicznych.

10.4.1. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA REAKCJI SIŁOWNIKÓW NA WARTOŚĆ ZADANĄ

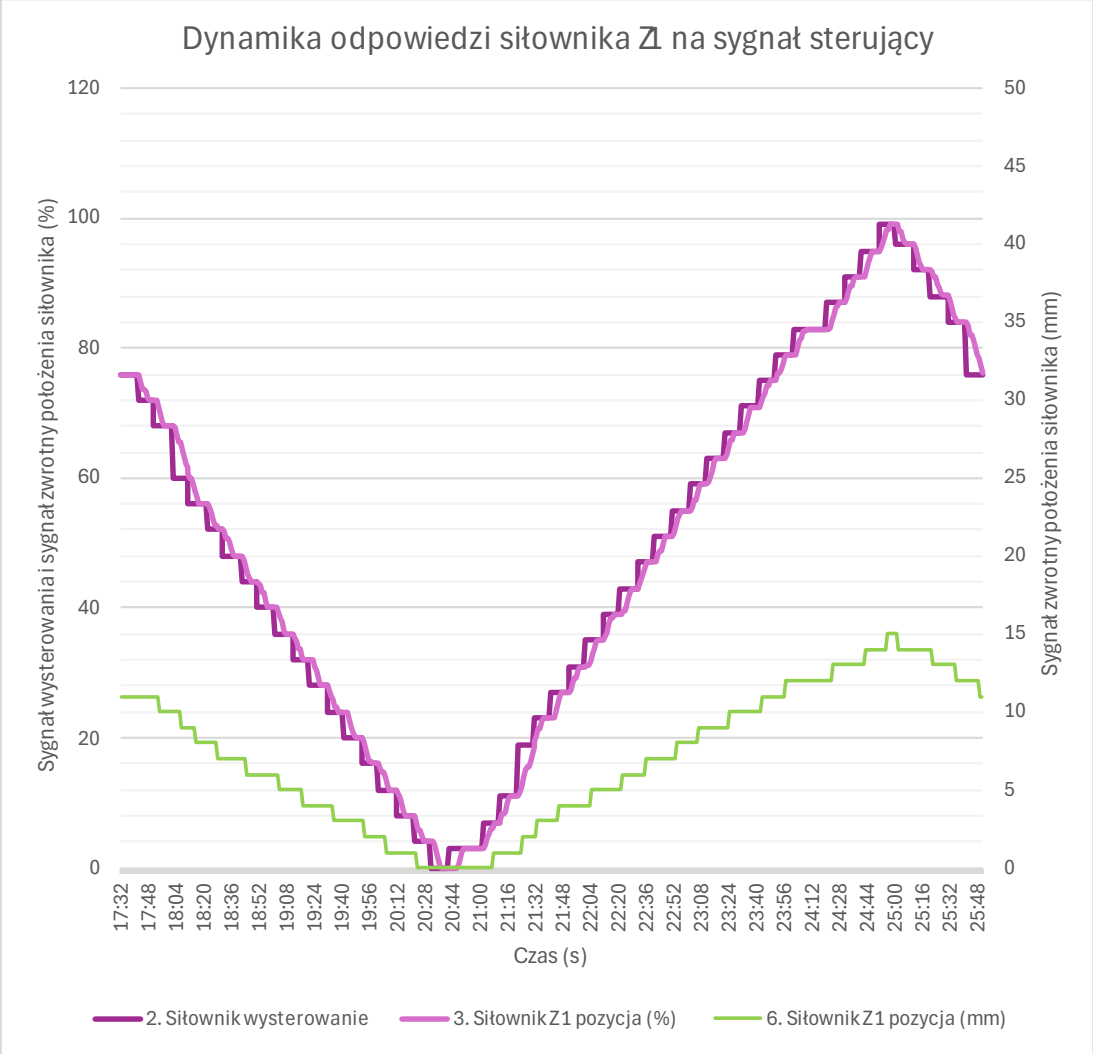
Poniższy rozdział przedstawia wyniki eksperymentalnych badań reakcji siłowników Z1 i Z3 na zmienną w czasie wartość zadaną. Analizie poddano odpowiedź układu wykonawczego względem sygnału sterującego w kontekście dynamiki, dokładności odwzorowania, czasu reakcji oraz stabilności.

Wykres (rys. 10.34.) przedstawia odpowiedź siłownika Z1 na zmieniającą się wartość zadaną, ograniczoną do 100 punktów pomiarowych z całego pomiaru. Takie zawężenie umożliwia dokładniejszą obserwację reakcji, w tym opóźnienia odpowiedzi i sposobu dochodzenia do wartości zadanej (położenie rzeczywiste w mm i w %).



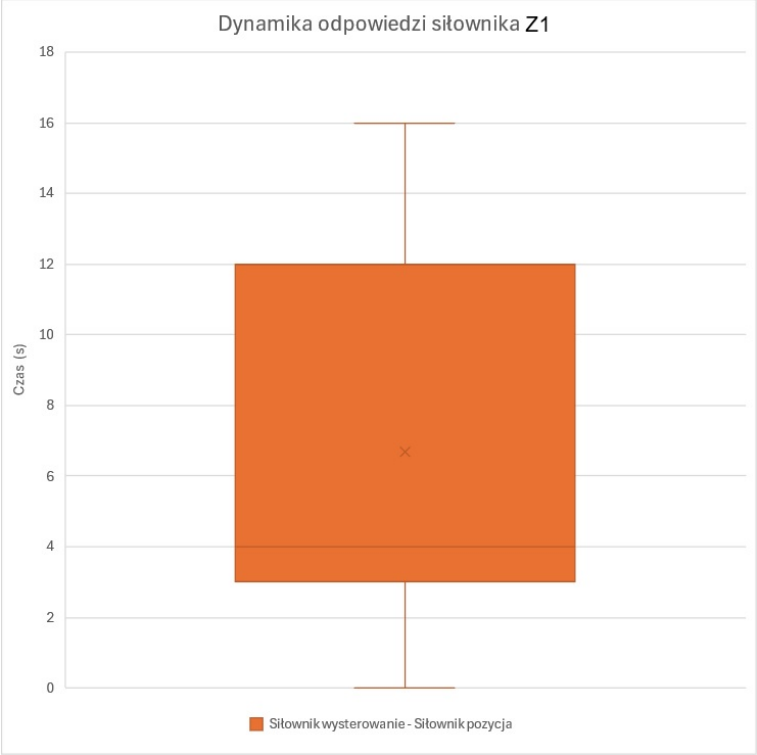
Rys. 10.34. Reakcja siłownika Z1 – 100 punktów (dodatkowy sygnał zwrotny położenia siłownika w mm)

Na rysunku 10.35. widać szerszy fragment rejestracji (1000 punktów pomiarowych) pozwala przeanalizować całą odpowiedź dynamiczną siłownika w dłuższym okresie. Widoczna jest ogólna charakterystyka działania oraz potencjalne fluktuacje w położeniu rzeczywistym względem sygnału zadanego.



Rys. 10.35. Reakcja siłownika Z1 – 1000 punktów (dodatkowy sygnał zwrotny położenia siłownika w mm)

Na rysunku 10.36. przedstawiono graficzne zestawienie wyników statystycznych reakcji siłownika Z1 – obejmujących wartości minimalne, maksymalne oraz średni czas reakcji – ilustruje ogólną stabilność układu i wpływ komunikacji ModBus na dynamikę odpowiedzi.



Rys. 10.36. Analiza statystyczna dynamik odpowiedzi siłownika Z1

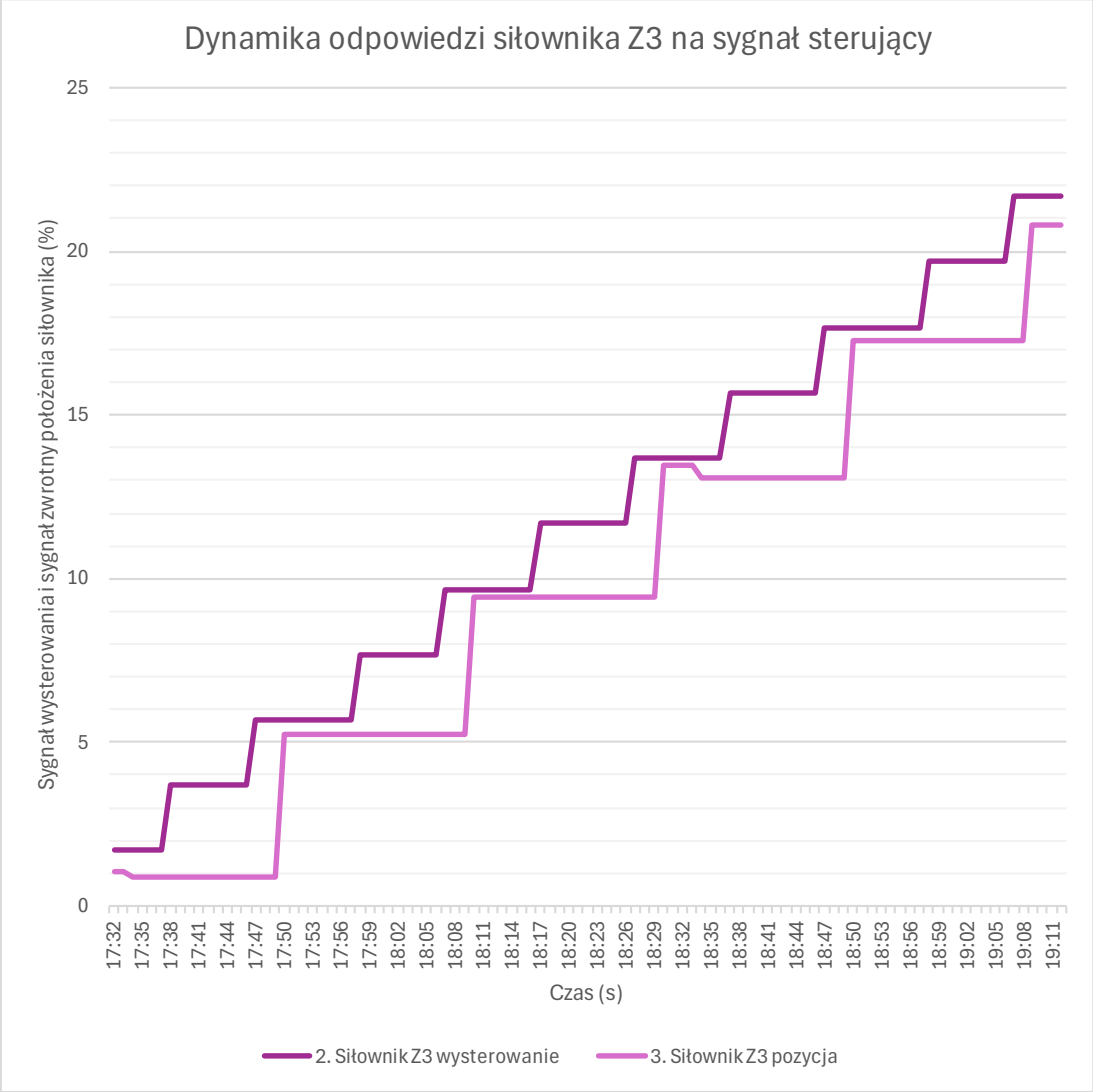
Czas reakcji siłownika na zadaną wartość:

Max: 16 s

Min: 0 s

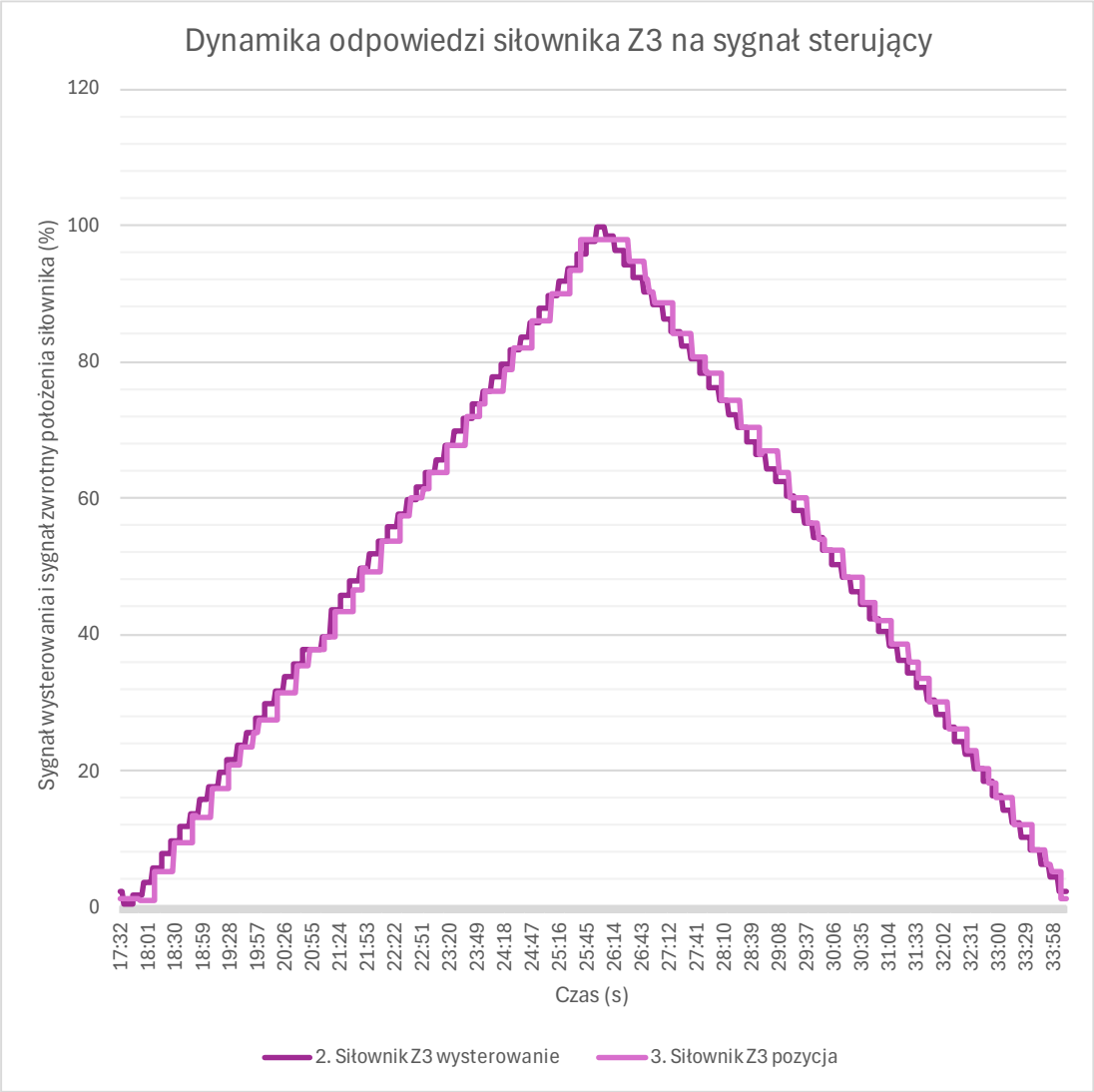
Średni: 6,62 s

Rysunek 10.37. obrazuje fragment przebiegu ograniczony do 100 punktów pomiarowych prezentuje szybką i precyzyjną reakcję siłownika Z3. Charakterystyka położenia (w mm i %) wskazuje na dobrą zgodność z wartością zadaną oraz wysoką responsywność systemu.



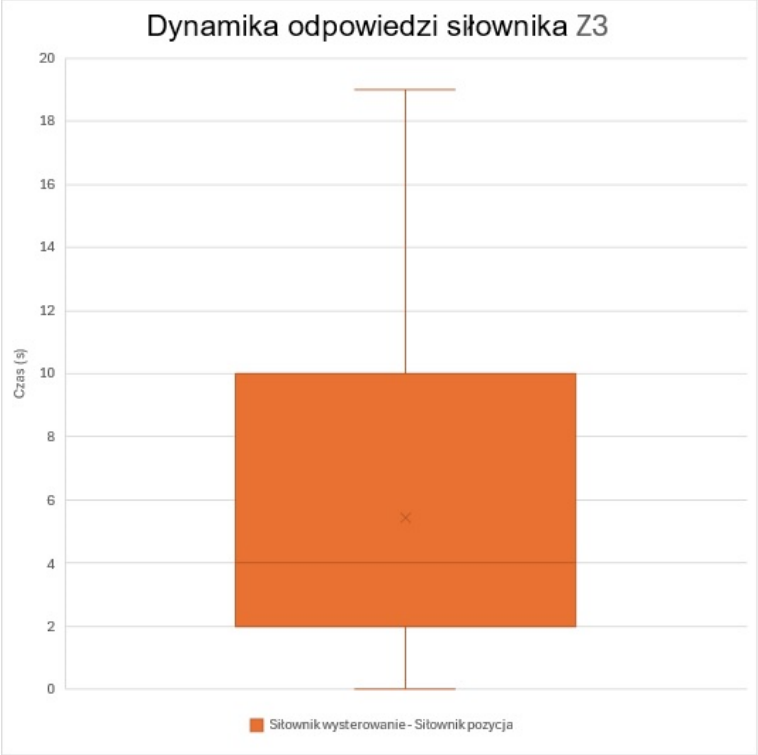
Rys. 10.37. Reakcja siłownika Z3 – 100 punktów

Natomiast wykres na rysunku 10.38. przedstawia pełny przebieg (1000 punktów pomiarowych) widoczna jest duża spójność i powtarzalność odpowiedzi. Siłownik precyzyjnie odwzorowuje zmianę wartości zadanej, bez istotnych przeregulowań i opóźnień.



Rys. 10.38. Reakcja siłownika Z3 – 1000 punktów

Wykres na rysunku 10.39. przedstawia statystyczne zestawienie czasów przesterowania siłownika Z3. Dane wskazują na wysoką powtarzalność i niskie opóźnienia, potwierdzając zalety komunikacji LonWorks w aplikacjach wymagających szybkiej reakcji.



Rys. 10.39. Analiza statystyczna dynamik odpowiedzi siłownika Z3

Czas reakcji siłownika na zadaną wartość:

Max: 19 s

Min: 0 s

Średni: 5,44 s

10.4.2 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Oba siłowniki wykazują dużą zmienność czasu reakcji, jednak siłownik Z3 cechuje się większą powtarzalnością i szybszą reakcją w większości cykli, co wskazuje na wyższą efektywność układu komunikacyjnego.

Siłownik Z3 (LonWorks) zareagował szybciej i bardziej stabilnie niż Z1 (ModBus), osiągając wartość zadaną z mniejszym opóźnieniem oraz bez widocznych przeregulowań.

Siłownik Z1 charakteryzował się większym rozrzutem czasów reakcji, co może być efektem opóźnień w transmisji danych w protokole ModBus TCP/RTU.

W kontekście systemów automatyki wymagających szybkiej reakcji i dużej dokładności, siłownik Z3 (LonWorks) wypada korzystniej i może być preferowanym rozwiązaniem w aplikacjach dynamicznych.

Wnioski te sugerują, że wybór protokołu komunikacyjnego wpływa istotnie na zachowanie całego układu sterowania, szczególnie w warunkach zmiennych wartości zadanych i krótkiego czasu odpowiedzi.

PODSUMOWANIE PRACY

Praca poświęcona została analizie i ocenie skuteczności realizacji komunikacji cyfrowej w trybie on-line pomiędzy układami zasilania OFF-Grid obiektów sieciowych MPEC a systemem SCADA. W szczególności skupiono się na zagadnieniach związanych z transmisją danych, czasem reakcji systemu wykonawczego, niezawodnością komunikacji oraz dynamiką odpowiedzi siłowników na sygnały sterujące.

W części teoretycznej pracy przeanalizowano architekturę systemów automatyki stosowanych w nowoczesnym ciepłownictwie, ze szczególnym uwzględnieniem sterowników PLC, protokołów komunikacyjnych (ModBus TCP/RTU, LonWorks) oraz systemu nadzorczego SCADA. Przedstawiono także specyfikę pracy instalacji zasilanych w sposób wyspowy (OFF-Grid) oraz wymagania stawiane układom sterowania w tego typu środowiskach.

W części badawczej opracowano stanowisko testowe zintegrowane z rzeczywistym systemem SCADA, umożliwiające analizę propagacji sygnałów sterujących w różnych konfiguracjach komunikacyjnych. Przeprowadzono szczegółowe pomiary czasów transmisji oraz dynamiki odpowiedzi pięciu siłowników (Z1–Z5) pracujących w różnych środowiskach sieciowych. W badaniach zastosowano zarówno skok jednostkowy, jak i dynamicznie zmieniający się sygnał sterujący, co pozwoliło na wielowymiarową analizę działania układu.

Wnioski końcowe

Teza I pracy została potwierdzona – analiza transmisji cyfrowej w różnych konfiguracjach komunikacyjnych pozwala efektywnie określić czas reakcji oraz niezawodność działania systemów automatyki zasilanych OFF-Grid i zintegrowanych z SCADA.

Wnioski główne:

1. Rodzaj zastosowanego protokołu komunikacyjnego ma istotny wpływ na dynamikę działania układów wykonawczych.
2. Systemy hybrydowe mogą zapewniać bardzo dobrą responsywność mimo większej liczby etapów transmisji.

3. Opracowane środowisko testowe oraz narzędzia analizy przebiegów czasowych mają praktyczne zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji układów sterowania.
4. Badania statystyczne komunikacji cyfrowej pozwalają na optymalizację architektury sieci i protokołów transmisyjnych.
5. Analiza procesu komunikacji umożliwia identyfikację „wąskich gardeł systemu”, co usprawnia diagnostykę i działanie układów automatyki.

Wnioski szczegółowe:

1.1. Sieci LonWorks wykazały wyraźnie krótsze czasy reakcji i większą stabilność odpowiedzi niż sieci oparte na ModBus TCP/RTU.

1.2. Największe opóźnienia w komunikacji występowały w początkowych etapach transmisji – zwłaszcza przy konwersji sygnału i jego przejściu przez interfejs TCP (np. w topologii Z1 średni czas reakcji przekraczał 15 s).

1.3. Systemy hybrydowe (np. ModBus TCP + LonWorks), mimo większej złożoności, wykazywały wysoką efektywność (np. topologie Z3 i Z5)

1.4. Siłowniki w środowisku LonWorks charakteryzowały się szybszą reakcją, mniejszym przeregulowaniem oraz większą powtarzalnością czasów odpowiedzi.

1.5. Transmisja lokalna (np. ModBus RTU w topologii Z2), mimo prostoty, nie gwarantowała zawsze najkrótszych czasów odpowiedzi, co podkreśla wagę sprzętu i architektury.

Teza II pracy została potwierdzona – system SCADA odgrywa kluczową rolę w nadzorze, diagnostyce oraz analizie działania urządzeń wykonawczych w środowisku OFF-Grid.

Wnioski główne:

1. System SCADA umożliwia skuteczny monitoring i analizę wydajności komunikacji oraz działania urządzeń wykonawczych.
2. Funkcjonalność systemu SCADA pozwala na analizę, rozbudowę i optymalizację automatyki sieci ciepłowniczej.

Wnioski szczegółowe:

2.1. System SCADA pozwala nie tylko na monitorowanie, ale również na bieżącą analizę wydajności komunikacji i diagnostykę.

2.2. Analiza komunikacji w systemie automatyki sieci ciepłowniczej umożliwia dokładne wyznaczanie czasu realizacji przesyłu danych kontrolno-pomiarowych, co jest kluczowe przy rozbudowie systemów SCADA.

SPIS LITERATURY

[1] Badyda K., Knyziak M., i Kowalczyk A., Nowoczesne systemy ciepłownicze w Polsce – wyzwania i perspektywy. Przegląd Elektrotechniczny, 2019, 95(2), str. 107-112.

[2] Bailey D., Wright E., Practical SCADA for Industry, Newnes, Oxford 2003.

[3] Betti A., Lo Trovato M., Leonardi F., Leotta G., Ruffini F., Lanzetta C., Predictive Maintenance in Photovoltaic Plants with a Big Data Approach. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), 2017, str. 1895-1900.

[4] Bhat S., Leveraging 5G Network Capabilities for Smart Grid Communication. Journal of Electrical Systems, 2024, 20(2), str. 2272-2283.

[5] Björk M., Westö J., SCADA system for OFF-Grid Energy solutions on remote islands, Novia University of Applied Sciences, Vaasa 2014.

[6] Bolton W., Programmable Logic Controllers, 5 ed. Newnes, Oxford 2015.

[7] Boyer S., SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition, 4 ed. ISA, Portland 2009.

[8] Bujak J., Efektywność energetyczna systemów ciepłowniczych. Czasopismo Energetyka, 2019, 72(5), str. 345-356.

[9] Cárdenas A., Amin S., Sastry S., Research Challenges for the Security of Control Systems. In Proceedings of the 3rd Conference on Hot Topics in Security, 2008.

[10] Cenian A., Dzierzgowski M., Pietrzykowski B., Żurek T., Niskotemperaturowe Sieci Ciepłownicze 4 Generacji (SC 4G)- mapa drogowa. Nowa Energia, 2021, 4(80).

[**11]** Chmielniak A., Technologie energetyczne, PWN, Warszawa 2014.

[12] Daneels E., Salter W., What is SCADA?. In International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS), 1999.

[13] Ekanayake J., Jenkins N., Liyanage K., Wu J., Yokoyama A., Smart Grid: Technology and Applications, Wiley, Hoboken 2012.

[14] Eniko L., Petreus D., Patarau T., Etz R., SCADA development for an islanded microgrid. Conference: 2015 IEEE 21st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2015.

[15] Galloway B., Hancke G., Introduction to Industrial Control Networks. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(2), str. 860–880.

[16] Jack H., Automating Manufacturing Systems with PLCs, 7 ed. Lulu Press, 2009

[17] Jordan W., Peterson Ch., Murphy A., OFF-Grid Solar Power Made Easy : Design and Installation of Photovoltaic system For Rvs, Vans, Cabins, Boats and Tiny Homes - Solar Power, Lightning Source Inc, 2021.

[18] Kemp W., The Renewable Energy Handbook: A Guide to Rural Energy Independence, Off-Grid and Sustainable Living, Aztext, Tamworth 2009.

[19] Krutz R., Industrial Automation and Control System Security Principles, 2 ed. ISA, Portland 2006.

[20] Krutz R., Securing SCADA Systems, Wiley, Hoboken 2006.

[21] Kwaśniewski J., Sterowniki PLC w praktyce inżynierskiej, BTC, Legionowo 2008.

[22] Lamb F., Industrial Automation: Hands-On, McGraw-Hill, 2013.

[23] Macaulay T., Singer B., Cybersecurity of Industrial Control Systems : SCADA, DCS, PLC, HMI, and SIS, CRC Press, Leiden 2011.

[24] Ożadowicz A. Komunikacja w systemach inteligentnego budynku – zasady, niezawodność, bezpieczeństwo. Elektroinstalator, nr 9/2005, Warszawa.

[25] Petruzella F., Programmable Logic Controllers, ed. 6 McGraw-Hill, 2022

[26] Plamowski S., Wojtulewicz A., Systemy DCS i SCADA, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2022.

[27] Raj G., Dalal P., Verma A., Shukla A., Performance Comparison of Several LPWAN Technologies for Energy Constrained IOT Network. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 2023,11(1), str. 150-158.

[28] Rak A., Narzędzia informatyczne do zarządzania i optymalizacji pracy systemu ciepłowniczego, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice 2016.

[29] Sałat, R., Korpysz, K., Obstawski, P., Wstęp do programowania sterowników PLC, WKŁ, Sulejówek 2010.

[30] Thomas M., McDonald J., Power System SCADA and Smart Grids, CRC Press, Leiden 2015.

[31] Wiśniewski R., Kania A., Zima W., Taler J., OFF-Grid power supply – the future of district heating. Archives of Thermodynamics, 2023, 44(3), str. 201–216.

[32] Automatyka Online. Komunikacyjne urządzenia i standardy w elektroenergetyce. 2018. Dostęp online: https://automatykaonline.pl

[33] Chronmy Klimat. Ile emitujemy gazów cieplarnianych, korzystając z ciepła sieciowego? 2021. Dostęp online: https://chronmyklimat.pl

[34] Energetyka24. Infrastruktura ciepłownicza w polskich miastach wymaga modernizacji. 2020. Dostęp online: https://energetyka24.com

[35] Energetyka Cieplna. Systemy SCADA w przedsiębiorstwach ciepłowniczych. 2015. Dostęp online: https://energetykacieplna.pl

[36] EUR-Lex. Plan działania na rzecz przejścia na konkurencyjną gospodarkę niskoemisyjną do 2050 r. Bruksela, 2011. Dostęp online: https://eur-lex.europa.eu

[37] Forum Energii. Dobre praktyki ciepłownicze z Danii i Niemiec. Wnioski dla Polski. 2019. Dostęp online: https://forum-energii.eu

[38] Gramwzielone.pl. Niskotemperaturowe sieci ciepłownicze – baza modernizacji sektora ciepła. 2024. Dostęp online: https://gramwzielone.pl

[39] Abioye H. SCADA and Smart Energy Grid Control Automation. Helendarmi – Medium.com, 2024. Dostęp online: https://helendarmi-hd.medium.com

[40] Instalacje Fotowoltaiczne. Czym różni się instalacja on-grid i OFF-Grid. 2021. Dostęp online: https://instalacjefotowoltaiczne.com

[41] Marszycki M. 7 trendów technologicznych, które napędzą zrównoważony rozwój. ITwiz, 2024. Dostęp online: https://itwiz.pl

[42] Magazyn Ciepła Systemowego. Ciepłownictwo inteligentne i zdalne. 2021. Dostęp online: https://magazyncieplasystemowego.pl

[43] OIDE – Sejm RP. Polityka energetyczno-klimatyczna Unii Europejskiej – wyzwania i cele do 2050 roku. 2018. Dostęp online: https://oide.sejm.gov.pl

[44] Wiązowski M. Bezpieczeństwo systemów SCADA. Quantum Software, 2021. Dostęp online: https://quantum-software.com

[45] Rynek Instalacyjny. Elektryfikacja ciepłownictwa – wytwarzanie ciepła i integracja z systemem energetycznym. 2021. Dostęp online: https://rynekinstalacyjny.pl

[46] Joniec W. Ciepłownictwo systemowe w drodze do generacji 5G. Rynek Instalacyjny, 2022. Dostęp online: https://rynekinstalacyjny.pl

[47] Wrzalik A. Smart district heating networks in the era of Energy transformation. Sciendo, 2022. Dostęp online: https://sciendo.com

[48] Ciupa Sz. Znaczenie niezależności energetycznej dla bezpieczeństwa i zrównoważonego rozwoju miasta. SmartCity-Expert, 2024. Dostęp online: https://smartcity-expert.eu

[49] URE. Danish Sustainable Living 2012. 2012. Dostęp online: https://ure.gov.pl

[50] Pająk Ł. Efektywność energetyczna. Włącz Oszczędzanie, 2024. Dostęp online: https://wlaczoszczedzanie.pl

[51] Ludynia A. Zastosowanie smart grids w ciepłownictwie. YADDA – Biblioteka Nauki, 2014. Dostęp online: https://yadda.icm.edu.pl

[52] Rajesh L., Satyanarayana P. Detection and blocking of replay, false command, and false access injection commands in SCADA systems with ModBus protocol. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021, Article ID 8887666. DOI: 10.1155/2021/8887666

[53] Dahlmanns M., Lohmöller J., Pennekamp J., Bodenhausen J., Wehrle K., Henze M. Missed opportunities: Measuring the untapped TLS support in the Industrial Internet of Things. RWTH Aachen University, Fraunhofer FKIE, 2021. Dostęp online: https://arxiv.org/abs/2102.00850

[54] Niu X., Cook M. M., Pezaros D. Evaluating the Applicability of Stream Ciphers for Encrypting ModBus-TCP on Resource-Constrained Devices. Proceedings of the 17th European Workshop on Systems Security (EuroSec '24), ACM, 2024, s. 51–57. DOI: 10.1145/3642974.3652287

[55] Yang F., Zhang J., Zhao L. The Design and Realization of Intelligent Building System Based on LonWorks Technology. 2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, sierpień 2009, s. 146–149. Dostęp online: https://ieeexplore.ieee.org/document/7870559

[56] IEC 62443: Security for Industrial Automation and Control Systems. International Electrotechnical Commission, Genewa.

[57] NIST SP 800-82: Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.

[58] ISO/IEC 27001: Information Security Management. International Organization for Standardization, Genewa.

[59] ANSI/ISA-95: Enterprise-Control System Integration. ISA – International Society of Automation, Research Triangle Park.

[60] IEC 62443: Industrial Communication Networks – IT Security for Networks and Systems, International Electrotechnical Commission, Genewa, 2018.

[61] IEC 61131-3: Programmable Controllers – Programming Languages, International Electrotechnical Commission, Genewa, 2013.

[62] ModBus Organization, ModBus Application Protocol Specification. Dostęp online: www.modus.org

[63] ModBus Organization. ModBus Messaging on TCP/IP Implementation Guide v1.0b. Modbus.org, 2006. Dostęp online: https://modbus.org

[64] ModBus Organization, ModBus RTU vs. ModBus TCP/IP. Dostęp online: www.modbus.org

[65] Echelon Corporation, LonWorks Protocol Specification. Dostęp online: www.echelon.com

[66] LonTalk Protocol Standard (ANSI/CEA-709.1), Consumer Electronics Association, ANSI Standard. Dostęp online: www.echelon.com

[67] LoRa Alliance, Introduction to LoRa and LoRaWAN. Dostęp online: www.lora-alliance.org

[68] LoRa Alliance, LoRaWAN Specification. Dostęp online: www.lora-alliance.org

[69] LoRa Alliance, LoRaWAN Regional Parameters. Dostęp online: www.lora-alliance.org

[70] OASIS, MQTT Version 5.0 Specification, OASIS Standard. Dostęp online: www.oasis-open.org

[71] HiveMQ, MQTT Essentials. Dostęp online: www.hivemq.com

[72] PROFIBUS Organization, PROFIBUS System Description. Dostęp online: www.profibus.com

[73] Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Polityka energetyczna Polski do 2040 roku (PEP2040), Warszawa, 2021. Dostęp online: www.gov.pl

[74] IEC 61158: Digital Data Communications for Measurement and Control – Fieldbus for Use in Industrial Control Systems, International Electrotechnical Commission, Genewa.

[75] Bujalski I. Technologia LonWorks – fundament dla systemów automatyki budynków. Napędy i Sterowanie, nr 1(21)/2001, Racibórz.

[76] Echelon Corporation. Implementing Open, Interoperable Building Control Systems. Echelon White Paper. Dostęp online: https://www.echelon.com

[77] Echelon Corporation. Introduction to the LonWorks System. Materiały informacyjne – Support and Documentation, 2003, Dostęp online: https://www.echelon.com

[78] Echelon Corporation. Introduction to the LonWorks Platform. Echelon, 2009. Dostęp online: https://www.echelon.com

[79] Echelon Corporation. Neuron C – Programmer's Guide and Reference Guide. Echelon Manuals, 2003, Dostęp online: https://www.echelon.com

[80] Echelon Corporation. NodeBuilder, LonMaker – User's Guides. Echelon Manuals, 2003, Dostęp online: https://www.echelon.com

[81] Echelon Corporation. The SNVT Master List and Programmer's Guide. Echelon Support, 2003, Dostęp online: https://www.echelon.com

[82] Wikipedia. ModBus. Wikipedia.org. Dostęp online: https://en.wikipedia.org/wiki/Modbus

[83] Wiśniewski R., Kulig A., Materiały własne (Wydział AKPiA), „Metody transmisji danych stosowane w MPEC S.A. w Krakowie”, Krynica 2016.