

**Politechnika Warszawska**

W Y D Z I A Ł E L E K T R O N I K I  
I T E C H N I K I N F O R M A C Y J N Y C H



Instytut Telekomunikacji

# Praca dyplomowa magisterska

na kierunku Telekomunikacja  
w specjalności Teleinformatyka i Zarządzanie w Telekomunikacji

Propozycja architektury platformy do modelowania i uruchamiania  
zamkniętych pętli sterowania w Kubernetes

**Andrzej Gawor**

Numer albumu 300528

promotor  
dr inż. Dariusz Bursztynowski

WARSZAWA 2025



## **Propozycja architektury platformy do modelowania i uruchamiania zamkniętych pętli sterowania w Kubernetes**

**Streszczenie.** Projekt opisany w niniejszej pracy skupia się na zaproponowaniu oraz przedstawieniu implementacji architektury platformy, która pozwala na modelowanie oraz uruchamianie zamkniętych pętli sterowania w Kubernetes. Genezą projektów jest praca komitetów standaryzacyjnych takich jak ETSI ZSM czy ETSI ENI, które skupiają się na specyfikacji autonomicznych oraz kognitywnych systemów zarządzania sieciami telekomunikacyjnymi. Architektury specyfikowanych systemów opierają się na zamkniętych pętlach sterowania

Naturalnym kolejnym krokiem jest zaproponowanie platformy, na której operator mógłby takie pętle projektować oraz uruchamiać. W tym celu zdefiniowano zestaw wymagań oraz założeń dla takiego systemu. Jako środowisko uruchomieniowe wybrano Kubernetes. Następnie przeprowadzono obszerną analizę jak za pomocą mechanizmów rozszerzania Kubernetes takich jak "Custom Resources" oraz "Operator Pattern" można stworzyć framework umożliwiający modelowanie zamkniętych pętli sterowania. Na tej podstawie wypracowano bardzo elastyczną architekturę, którą następnie zaimplementowano z użyciem środowiska Kubebuilder. Na koniec wykonano test platformy za pomocą emulatora sieci 5G w postaci Open5GS w połączeniu z UERANSIM.

Praca opisuje przegląd powiązanej literatury, powstałą platformę, jej architekturę oraz instrukcję jej użytkowania. Omówiona została również przykładowa implementacja platformy, technologie za nią stojące oraz decyzje podjęte podczas jej powstawania. Finalnie przedstawiono również test działania platformy w praktyce. Pracę podsumowuje lista wniosków oraz potencjalnych dróg rozwoju platformy.

**Słowa kluczowe:** Zamknięte pętle sterowania, Kubernetes, Zarządzanie sieciami telekomunikacyjnymi, Automatyzacja, Go, Open5GS, Mikroserwisy

## **Creation of a platform for designing and running closed control loops in Kubernetes**

**Abstract.** The project described in this work focuses on proposing and presenting the implementation of a platform architecture that enables the modeling and execution of closed control loops in Kubernetes. The genesis of the project stems from the work of standardization committees such as ETSI ZSM and ETSI ENI, which focus on specifying autonomous and cognitive management systems for telecommunication networks. The architectures of these specified systems are based on closed control loops.

A natural next step is to propose a platform where an operator could design and execute such loops. To this end, a set of requirements and assumptions for such a system has been defined. Kubernetes was chosen as the runtime environment. Subsequently, an extensive analysis was conducted on how Kubernetes extension mechanisms, such as "Custom Resources" and the "Operator Pattern," can be leveraged to create a framework that enables the modeling of closed control loops. Based on this analysis, a highly flexible architecture was developed and then implemented using the Kubebuilder framework. Finally, the platform was tested using a 5G network emulator, specifically Open5GS combined with UERANSIM.

This work describes a review of related literature, the developed platform, its architecture, and a user guide. It also discusses an exemplary implementation of the platform, the technologies behind it, and the decisions made during its development. Finally, a practical test of the platform's functionality is presented. The work concludes with a summary of findings and potential future development paths for the platform.

**Keywords:** Closed Control Loops, Kubernetes, Managing Telco-Networks, Automation, Go, Open5GS, Microservices

# **Spis treści**

<b>1. Wstęp</b> . . . . .	9
1.1. Przedmowa . . . . .	9
1.2. Cel i zakres pracy . . . . .	9
1.3. Struktura pracy . . . . .	10
<b>2. Stan wiedzy</b> . . . . .	11
2.1. Wstęp . . . . .	11
2.2. Historia . . . . .	11
2.3. Przegląd literatury . . . . .	13
2.3.1. Wstęp . . . . .	13
2.3.2. ONAP/CLAMP . . . . .	17
2.3.3. Architektura referencyjna ETSI ZSM . . . . .	18
2.3.4. Architektura referencyjna CLADRA (TM Forum) . . . . .	20
2.3.5. Architektura referencyjna ETSI ENI . . . . .	22
2.3.6. Podsumowanie . . . . .	22
2.4. Przegląd architektur zamkniętych pętli sterowania ENI . . . . .	23
2.4.1. Wstęp . . . . .	23
2.4.2. Typy pętli sterowania . . . . .	23
2.4.3. OODA . . . . .	24
2.4.4. MAPE-K . . . . .	25
2.4.5. Focale . . . . .	25
2.4.6. GANA . . . . .	26
2.4.7. COMPA . . . . .	26
2.4.8. Focale v3 . . . . .	27
<b>3. Architektura</b> . . . . .	29
3.1. Wstęp . . . . .	29
3.2. Wymagania i założenia . . . . .	29
3.2.1. Wstęp . . . . .	29
3.2.2. Wymagania ogólne . . . . .	29
3.2.3. Wymagania na środowisko wykonawcze . . . . .	30
3.2.4. Wymagania na modelowanie pętli . . . . .	30
3.2.5. Wymagania na zarządzanie pętlami . . . . .	32
3.2.6. Dyskusja . . . . .	33
3.3. Pojęcia i zasady . . . . .	37
3.3.1. Wstęp . . . . .	37
3.3.2. Problem zarządzania . . . . .	37
3.3.3. System Sterowania . . . . .	38
3.3.4. Pętla Sterowania . . . . .	38
3.3.5. Zamknięta Pętla Sterowania . . . . .	38
3.3.6. Agenci Translacji . . . . .	39
3.3.7. Workflow pętli . . . . .	40

3.3.8. Dane i Akcje . . . . .	41
3.3.9. Open Policy Agent . . . . .	42
3.4. Instrukcja Użycia . . . . .	42
3.4.1. Instalacja Luples . . . . .	43
3.4.2. Implementacja Agentów Translacji . . . . .	43
3.4.3. Planowanie Logiki Pętli . . . . .	43
3.4.4. Przygotowanie Elementów Zewnętrznych . . . . .	43
3.4.5. Wyrażenie workflow pętli . . . . .	43
3.4.6. Aplikacja plików manifestacyjnych . . . . .	44
<b>4. Implementacja . . . . .</b>	<b>45</b>
4.1. Wstęp . . . . .	45
4.2. Mechanizmy Kubernetes stojące za Luples . . . . .	45
4.2.1. Kontroler . . . . .	45
4.2.2. Zasoby własne . . . . .	46
4.2.3. Operatory . . . . .	46
4.2.4. Kubebuilder . . . . .	47
4.3. Decyzje podjęte podczas implementacji . . . . .	47
4.3.1. Wstęp . . . . .	47
4.3.2. Komunikacja pomiędzy Elementami Luples . . . . .	47
4.3.3. Dane . . . . .	48
4.3.4. Polimorfizm w Go . . . . .	50
4.3.5. Dwa rodzaje workflow . . . . .	53
4.3.6. Funkcje użytkownika . . . . .	54
<b>5. Test platformy na emulatorze sieci 5G . . . . .</b>	<b>57</b>
5.1. Wstęp . . . . .	57
5.2. Emulator sieci 5G . . . . .	57
5.2.1. Open5GS . . . . .	57
5.2.2. UERANSIM . . . . .	57
5.2.3. Wdrożenie na Kubernetes . . . . .	58
5.3. Wdrożenie Luples . . . . .	59
5.3.1. Problem Zarządzania . . . . .	59
5.3.2. Implementacja Agentów Translacji . . . . .	60
5.3.3. Planowanie Logiki Pętli . . . . .	62
5.3.4. Przygotowanie Elementów Zewnętrznych . . . . .	63
5.3.5. Wyrażenie workflow pętli w notacji LupN . . . . .	63
5.3.6. Prezentacja działania jednej iteracji pętli . . . . .	64
<b>6. Podsumowanie . . . . .</b>	<b>68</b>
6.1. Wstęp . . . . .	68
6.2. Wyzwania . . . . .	68
6.3. Analiza w odniesieniu do założeń . . . . .	68
6.4. Ograniczenia . . . . .	69
6.5. Porównanie z istniejącymi rozwiązaniami . . . . .	69

6.6. Możliwości rozwoju . . . . .	69
<b>Bibliografia . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>Wykaz symboli i skrótów . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>Spis rysunków . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>Spis tabel . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>Spis załączników . . . . .</b>	<b>76</b>



# 1. Wstęp

## 1.1. Przedmowa

Wraz z rozwojem telekomunikacji stopień jej skomplikowania oraz mnogość podłączonych urządzeń stale rośnie. Sieci 5G zwiastują obsługę miliardów urządzeń, co sprawia, że tradycyjne podejście do zarządzania sieciami staje się niewystarczające. W pewnym momencie manualne operowanie sieciami (ang. *human-driven networks*) stanie się wręcz niemożliwe. Dlatego obserwujemy obecnie zwrot w stronę wirtualizacji oraz automatyzacji sieci. Równocześnie dynamiczny rozwój sztucznej inteligencji otwiera nowe możliwości. Te dwa czynniki stanowią wspólnie solidny fundament do tego, aby branża sieci telekomunikacyjnych postawiła sobie za cel budowę "inteligentnych" sieci - takich, które są w pełni autonomiczne, samowystarczalne oraz nie wymagają nadzoru ludzkiego.

W tym celu ETSI (European Telecommunications Standards Institute) powołało dwa komitety: ENI (Experiential Networked Intelligence) oraz ZSM (Zero touch network & Service Management). Oba komitety mają na celu wypracowanie specyfikacji Kognitywnych Systemów Zarządzania Siecią (Cognitive Network Management system). Kognitywny system oznacza taki, który jest w stanie uczyć się i podejmować decyzje, bazując na zebranej wiedzy, w sposób przypominający ludzki umysł. Obie architektury opierają swoje działanie na sztucznej inteligencji oraz zamkniętych pętlach sterowania.

Pętlą sterowania ETSI nazywa mechanizm, który monitoruje wydajność systemu lub procesu poddawanego kontroli w celu osiągnięcia pożdanego zachowania. Innymi słowy, pętla sterowania reguluje działanie zarządzanego obiektu. Pętle sterowania można podzielić na zamknięte lub otwarte, w zależności od tego, czy działanie sterujące zależy od sprzężenia zwrotnego z kontrolowanego obiektu. Jeśli tak, pętle nazywamy zamkniętą, jeśli nie - otwartą.

W przypadku architektur ETSI, zamknięta pętla sterowania służy jako model organizacji przepływu pracy (ang. *workflow*) elementów odpowiedzialnych za sztuczną inteligencję. Obie architektury referencyjne opisują modelowanie, uruchamianie oraz zarządzanie zamkniętymi pętlami sterowania w celu osiągania celów zarządzania. Jednak wciąż brakuje ogólnodostępnej platformy, która pozwalałaby operatorom w praktyce projektować, wdrażać i zarządzać takimi pętlami sterowania zgodnie z założeniami ETSI ZSM i ENI, co stanowi istotną lukę technologiczną. Naturalnym następnym krokiem jest zaproponowanie architektury platformy, która umożliwia takie działania oraz wpisuje się w aktualne trendy systemów teleinformatycznych, takich jak podejście cloud-native, wykorzystanie mikrousług oraz integracja z ekosystemem Kubernetes.

## 1.2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest kontynuacja badań ETSI, polegająca na zaproponowaniu *architektury platformy*, na której możliwe będzie modelowanie, uruchamianie oraz zarządzanie zamkniętymi pętlami sterowania. Niniejsza praca nie koncentruje się na aspektach związanych ze sztuczną inteligencją. Platforma ma jedynie służyć do modelowania, uruchamiania

## **1. Wstęp**

---

i zarządzania przepływem pracy pętli (ang. *workflow*), ale sama nie stanowi środowiska wykonawczego dla jej komponentów.

W zakres pracy wchodzi: przegląd powiązanej literatury, sformułowanie wymagań dla platformy, opracowanie jej architektury, implementacja PoC (ang. *Proof of Concept*), przeprowadzenie testów oraz analiza potencjału platformy w kontekście dalszego rozwoju. Po publikacji praca może stanowić podstawę do implementacji Kognitywnych Systemów Zarządzania Siecią, zgodnych ze specyfikacjami ETSI.

### **1.3. Struktura pracy**

Praca została podzielona na sześć rozdziałów. Rozdział drugi szczegółowo omawia badania podjęte przez ENI, rozwijając treści przedstawione we wstępie.. Stanowi on wprowadzenie teoretyczne oraz pojęciowe, aby ułatwić przekaz w dalszej części pracy. Rozdział trzeci zawiera opis proponowanej architektury. Rozdział czwarty opisuje implementację PoC platformy oraz napotkane wyzwania podczas formułowania architektury, które celowo zostały zebrane w jedno miejsce i umieszczone oddziennie w celu łatwiejszej lektury. Rozdział piąty przedstawia praktyczne zastosowanie platformy, pełniąc jednocześnie funkcję testu jej działania. Na koniec, w rozdziale szóstym przeprowadzono analizę zaproponowanej architektury, jej możliwości i ograniczeń oraz wskazano kierunki potencjalnego rozwoju.

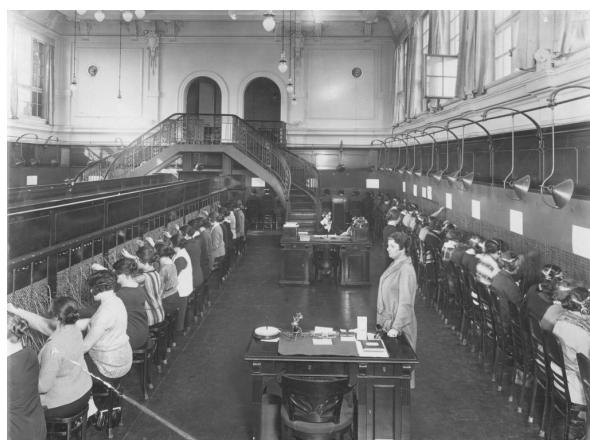
## 2. Stan wiedzy

### 2.1. Wstęp

Rozdział ten stanowi krótki historyczny wstęp do problematyki poruszanej w pracy oraz przedstawia kluczowe wyniki badań z powiązanej literatury w celu identyfikacji luki badawczej.

### 2.2. Historia

Na początku XX wieku gdy sieci telekomunikacyjne dopiero się rozwijały, wszystkie połączenia zestawiano ręcznie. W momencie, gdy abonent podnosił słuchawkę telefonu, jego aparat wysyłał sygnał do lokalnej centrali telefonicznej. Na tablicy świetlnej zapalała się lampka informującą telefonistkę o próbie połączenia. Telefonistka odbierała, pytając, z kim abonent chce się połączyć. Następnie wprowadzała odpowiednią wtyczkę do odpowiedniego gniazda na tablicy rozdzielczej, zestawiając fizyczne połączenie między dwoma liniami. Jeśli rozmowa miała się odbyć na większą odległość (np. między miastami) połączenie przekazywane było przez kolejne centrale. Każda centrala po drodze wymagała ręcznej obsługi przez pracujące w nich telefonistki.



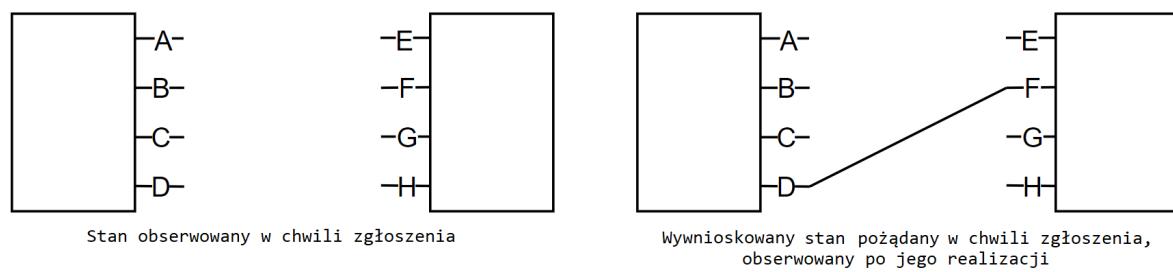
**Rysunek 2.1.** Pracowniczki warszawskiej centrali telefonicznej z końca lat 20. XX wieku. Źródło: <https://wielkahistoria.pl/wp-content/uploads/2020/07/Telefonistki-z-warszawskiej-centrali-1024x760.jpg>.

Dziś taki scenariusz wydaje się wręcz absurdalny, a oferty pracy dla telefonistek dawno zniknęły z tablic ogłoszeń. Praca wykonywana niegdyś przez telefonistki (czyli komutacja łączy) nadal jest potrzebna do prawidłowego funkcjonowania sieci telekomunikacyjnych, lecz obecnie realizują ją programy komputerowe w sposób w pełni zautomatyzowany. Ręczna komutacja była pierwszym krokiem w kierunku rozwoju globalnych sieci telekomunikacyjnych i choć z dzisiejszej perspektywy wydaje się być bardzo pracochłonna i ograniczająca, bez niej nie powstałyby fundamenty, na których oparto późniejsze systemy automatyczne. Jest to przykład tego, jak technologia stopniowo uwalniała człowieka od bezpośredniej obsługi różnych systemów dając mu przestrzeń na rozwój w innych obszarach.

## 2. Stan wiedzy

Na zasadzie indukcji możemy przyjąć, iż dziś znajdujemy się w podobnym położeniu - sieci telekomunikacyjne wciąż wymagają bezpośredniego zarządzania przez człowieka. Współcześnie granica styku system-człowiek jest mocno przesunięta, a interakcja zachodzi na dużo wyższym poziomie abstrakcji. Zamiast fizycznie łączyć linie, operatorzy zarządzają skomplikowanymi systemami sterowania ruchem telekomunikacyjnym. Możliwe, że nie istnieje ostateczny punkt styku i systemy telekomunikacyjne zawsze będą wymagały nadzoru ludzkiego. Niezależnie od tej kwestii przesunięcie wspomnianej granicy w czasach telefonistek, a dziś wymaga automatyzacji innego rodzaju.

O telefonistkach możemy powiedzieć, że zarządzają one pracą systemu telekomunikacyjnego<sup>1</sup> regulując jego działanie. W momencie zgłoszenia zastawały system w pewnym stanie i w ramach realizacji zgłoszenia musiały doprowadzić system do nowego (pożądanego) stanu. Cała ich praca tak naprawdę polegała na "wnioskowaniu" (ang. *reason*) jak ma wyglądać stan pożądany, a następnie na wykonaniu akcji sterującej, która doprowadzała system do tego stanu.



**Rysunek 2.2.** Dwa stany systemu: przed, oraz po realizacji zgłoszenia o treści: "D"chce zadzwonić do "F". Źródło: Opracowanie własne.

Proces *wnioskowania* można opisać następująco. Po pierwsze, telefonistka otrzymuje **dane**. **Dane** to fakty lub statystyki zebrane w celu analizy. Na przykład: dzwoni aparat telefoniczny, telefonistka podnosi słuchawkę i słyszy, że abonent chce połączyć się z abonentem mieszkającym w kamienicy pod numerem 35 na ulicy Polnej. Następnie, dostępne dane zostają przekształcone w *informację*. **Informacja** to dane pozbawione formy przekazu. Rozmowa z abonentem mogłaby przebiec zupełnie inaczej lub telefonistka mogłabytrzymać listowną prośbę o realizację połączenia. Różne dane mogą dostarczyć tę samą informację (w tym przypadku informacją jest to, że abonent z określonego łącza chce zadzwonić się do abonenta z innego, konkretnego łącza). Gdy telefonistka uzyska informację o zgłoszeniu, łączy ją z posiadanymi już informacjami, np. dotyczącymi rozmieszczenia łącz na tablicy komutacyjnej. Następnie wykorzystuje swoją *wiedzę*, czyli zestaw wzorców umożliwiających interpretację oraz przewidywanie tego, co się wydarzyło, co dzieje się obecnie i co może się wydarzyć w przyszłości. **Wiedza** opiera się na informacji oraz umiejętnościach zdobytych dzięki *doświadczeniu* lub *edukacji*. Telefonistka obserwuje aktualny stan systemu i *wnioskując*, na podstawie wiedzy, określa stan pożądany. Następnie definiuje akcje sterujące, które należy przeprowadzić na systemie, aby osiągnął on ten stan.

<sup>1</sup> t.j. siecią PSTN

W przypadku komutacji proces wnioskowania jest stosunkowo prosty i możliwy do zapisania w języku programowania. Wraz z rozwojem technologicznym zastąpiono ręczne centrale ich zautomatyzowanymi odpowiednikami. Jednak przedstawiony schemat wciąż odzwierciedla zasadnicze mechanizmy działania systemu. Do centrali trafiają dane w postaci sygnału na jednym z łączy. Sygnał zawiera numer MSISDN abonenta końcowego. Centrala przekształca te dane w informację, a następnie program w jej pamięci dokonuje wnioskowania. Wiedza potrzebna do wnioskowania zakodowana jest w programie. Dzięki programowalnym przełącznicom komutacyjnym również wykonanie akcji sterującej (czyli połączenie dwóch łączy) jest możliwe bez udziału człowieka.

W dzisiejszych czasach proces wnioskowania wykonywany przez ludzi nadzorujących systemy telekomunikacyjne nie jest już tak prosty. Dzięki wirtualizacji i programowalności funkcji sieciowych każdy rodzaj *wnioskowania*, który można sprowadzić do programu komputerowego, został już zautomatyzowany. Współcześnie działania wykonywane przez człowieka rzeczywiście wymagają jego inteligencji<sup>2</sup>. Dlatego kolejnym etapem rozwoju telekomunikacji jest stworzenie inteligentnych sieci.

## 2.3. Przegląd literatury

### 2.3.1. Wstęp

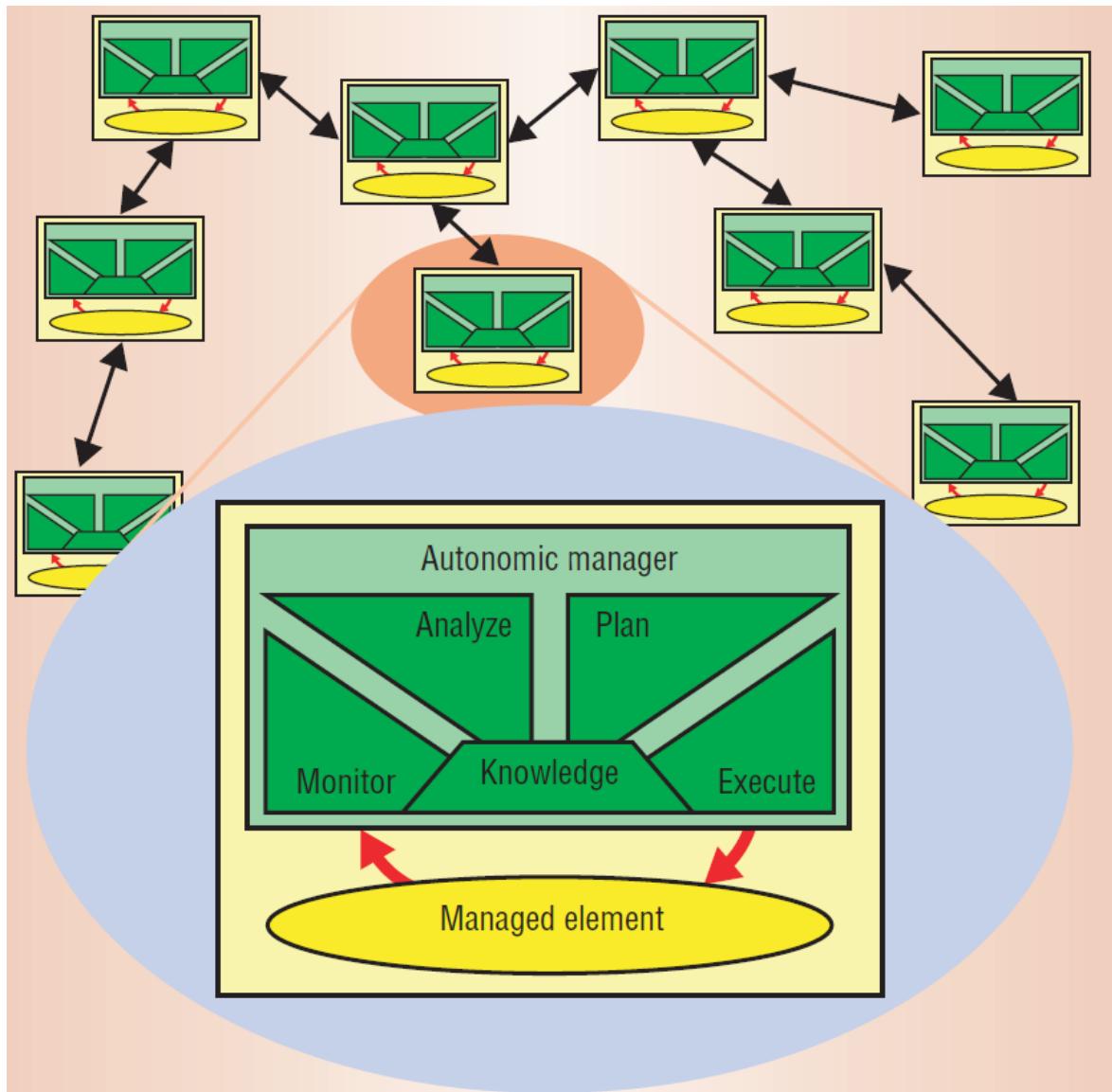
Rozważania na temat inteligentnych systemów w kontekście niniejszej pracy należy rozpocząć od artykułu opublikowanego przez IBM w 2003 roku [1]. Wskazuje on, iż ówczesne systemy informatyczne stawały się coraz bardziej złożone, co prowadziło do kryzysu zarządzania. Ręczna administracja przestawała być skalowalna, ponieważ systemy wymagały coraz większej liczby specjalistów do ich instalacji, konfiguracji oraz optymalizacji. IBM wskazywał, że jedynym rozwiązaniem tego problemu jest autonomiczne przetwarzanie (ang. *Autonomic Computing*). Koncepcja ta nawiązuje do autonomicznego układu nerwowego człowieka, który zarządza pracą serca i regulacją temperatury ciała, odciążając świadomą część mózgu.

W kontekście systemów informatycznych oznaczałoby to zwolnienie człowieka z konieczności ręcznej konfiguracji, optymalizacji, naprawy oraz ochrony systemów, ponieważ miałyby one zdolność do samodzielnego adaptacji zgodnie z modelem (ang. *Self-Configuration, Self-Optimization, Self-Healing, Self-Protection*). Jest to kluczowe pojęcie, które stanowi fundament wielu późniejszych badań nad autonomicznymi systemami. Architektura takich systemów została przedstawiona na rysunku 2.3.

Podstawową jednostką systemu autonomicznego jest element autonomiczny (ang. *Autonomic Element*). Składa się on z zarządzanego komponentu (np. serwera, bazy danych, aplikacji czy urządzenia sieciowego) oraz autonomicznego menedżera (ang. *Autonomic Manager*), który steruje jego działaniem. Menedżer autonomiczny działa w cyklu MAPE-K (Monitor, Analyze, Plan, Execute, Knowledge). Faza "Monitor" zbiera dane o zarządzanym obiekcie, które następnie są analizowane i oceniane pod względem potencjalnych problemów w fazie "Analyze". "Plan" odpowiada za opracowanie działań naprawczych lub

---

<sup>2</sup> lub możliwości interakcji ze światem fizycznym, których komputery są pozbawione



Rysunek 2.3. Architektura autonomicznych systemów IBM. Źródło [1].

optymalizacyjnych, które są przekazywane do "Execute" w celu wdrożenia w systemie zarządzanym. "Knowledge" nie jest odrębną fazą, lecz repozytorium wiedzy, do której każdy z elementów cyklu ma dostęp. Tu gromadzona jest *wiedza*. Elementy autonomiczne mogą ze sobą współpracować i wymieniać się wiedzą. Inteligencja społeczna (ang. *social intelligence*) całego rozproszonego systemu zwiększa się wraz z liczbą interakcji pomiędzy elementami, podobnie jak w kolonii mrówek. Nowe elementy systemu mogą pozyskiwać wiedzę od pozostałych jednostek. Koncepcja ta wykazuje pewne podobieństwo do teorii przedstawionych przez Minsky'ego [2].

Następnie [3] opisuje ewolucję architektury sieci telekomunikacyjnych w kierunku większej automatyzacji wymieniając czynniki umożliwiające (ang. *enablers*) taki kierunek jako technologie: SDN (ang. *Software Defined Networks*) oraz NFV (ang. *Network Function Virtualization*).

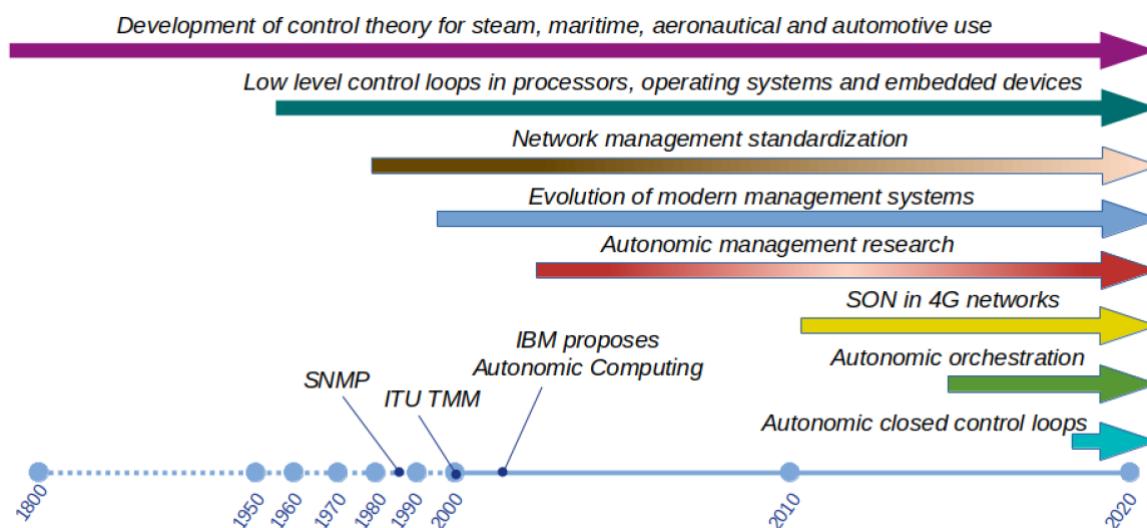
Należy w tym miejscu rozróżnić pojęcia Automatyzacji i Autonomiczności. Pierwsze odnosi się do predefiniowanego i zaprogramowanego procesu, podczas gdy drugie do aspektów związanych z samozarządzaniem. Zazwyczaj proces automatyczny nie jest w stanie zaadaptować się do zmian środowiska bez interwencji człowieka, w przeciwieństwie do procesu autonomicznego [4]. Czynnikiem technologicznym (ang. *enabler*) pozwalającym na przejście z automatyzacji na autonomiczność jest sztuczna inteligencja. [5] dokonuje przeglądu kierunków rozwoju badań na temat bezobsługowych systemów zarządzania siecią i usługami (ang. *Zero-touch network and Service Management*), gdzie sztuczna inteligencja odgrywa kluczową rolę. Artykuł wymienia projekty organizacji standaryzujących w tym obszarze:

- **ETSI GS ZSM** - specyfikuje referencyjną architekturę zarządzania siecią i usługami end-to-end. Framework ZSM jest postrzegany jako system zarządzania nowej generacji, który ma na celu pełną autonomiczność wszystkich procesów - od planowania, projektowania, dostarczania i wdrażanie, po udostępnianie, monitorowanie i optymalizację. Docelowo, w idealnym przypadku, powinien on działać w 100% samodzielnie bez ingerencji człowieka.
- **TM Forum** - specyfikuje referencyjną architekturę CLADRA (Closed Loop Anomaly Detection and Resolution Automation) opartej na sztucznej inteligencji, która umożliwia dostawcom usług komunikacyjnych (CSP - ang. *Communication Service Providers*) na szybkie wykrywanie i rozwiązywanie problemów sieciowych.
- **ETSI GR ENI** - specyfikuje referencyjną architekturę kognitywnych systemów zarządzania siecią używając zamkniętych pętli sterowania oraz świadomych kontekstu polityk. O ile ETSI GS ZSM skupia się na technikach automatyzacji zarządzania oraz udostępniania usług end-to-end, to ENI koncentruje się na technikach AI, zarządzaniu poprzez polityki oraz zamkniętych pętlach sterowania.

Powysze architektury zostaną dokładniej opisane w następnych podrozdziałach. Istotne na tym etapie jest to, że każda z tych architektur opiera swoje działanie o zamknięte pętle sterowania, co przewidziano w [6]. Artykuł wskazuje, iż badania nad zamkniętymi pętlami

## 2. Stan wiedzy

sterowania to dyscyplina o długiej historii, sięgająca aż epoki pary<sup>3</sup> (Rysunek 2.4). Z powodzeniem znajdują zastosowanie w systemach morskich, lotniczych, motoryzacyjnych, przemysłowych, ale też mikroprocesorach, systemach wbudowanych czy sterownikach urządzeń. Mimo że tego typu systemy są często złożone, cechują się determinizmem i dobrze określonymi granicami, co sprawia, że nadają się do zastosowania teorii sterowania<sup>4</sup>. Systemy telekomunikacyjne natomiast są słabo określonymi, stochastycznymi systemami, co sprawia, że zastosowanie teorii sterowania do ich zarządzania jest wyjątkowo trudne. To powoduje znaczne opóźnienie w adaptacji tych rozwiązań w branży telekomunikacyjnej. Od czasu pojawienia się koncepcji Autonomicznego Zarządzania [1] w latach 2000 oraz technologii wspierających, takich jak SDN i NFV, w latach 2010 zaczęły pojawiać się implementacje zamkniętych pętli sterowania w telekomunikacji. Niestety są one bardzo pragmatyczne i sztywne, skupione jedynie na dowożeniu danej funkcjonalności. Dodatkową problematyczność zagadnienia sprawia konieczność integracji systemów od wielu różnorodnych dostawców.



**Rysunek 2.4.** Zestawienie linii czasu rozwoju systemów zarządzania siecią oraz pętli sterowania. Źródło: [6].

[6] wskazuje wyzwania jakim należy się przeciwstawić, aby umożliwić autonomiczność poprzez pętle sterowania w sieciach. Są to następujące kroki:

- Potrzebny jest model opisujący pętle sterowania w standardowy sposób. Pozwoli to uchronić się przed pragmatycznością i niesystematycznością.
- Potrzebny jest framework do wdrażania pętli sterowania umożliwiający ich zarządzanie oraz działanie (ang. *runtime*) w jednym miejscu.
- Potrzebne są (najlepiej) graficzne narzędzia do projektowania i symulacji pętli sterowania, tak aby ich wdrażanie nie wymagało specjalistycznych umiejętności technicznych.

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Age\\_of\\_Steam](https://en.wikipedia.org/wiki/Age_of_Steam)

<sup>4</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Control\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory)

### 2.3.2. ONAP/CLAMP

Kolejnym zagadnieniem omawianym w [6] jest system zarządzania ONAP<sup>5</sup> (Open Network Automation Platform) [7]. ONAP to otwartoźródłowa platforma do orkiestracji, zarządzania i automatyzacji usług sieciowych, rozwijana przez fundację Linux Foundation. ONAP składa się z wielu modułów, które umożliwiają pełne zarządzanie cyklem życia usług sieciowych, od ich projektowania, poprzez wdrażanie, aż po operacje eksplotacyjne. Jego kluczowe elementy to:

- **Master Service Orchestrator (MSO)** – centralny moduł odpowiedzialny za orkiestrację usług sieciowych,
- **SDN Controllers (APPC, SDNC, VFC)** – kontrolery odpowiedzialne za zarządzanie warstwami sieciowymi,
- **A&AI (Active and Available Inventory)** – moduł odpowiedzialny za inwentaryzację zasobów sieciowych,
- **DCAE (Data Collection, Analytics and Events)** – moduł odpowiedzialny za zbieranie danych, analizę oraz obsługę pętli sterowania,
- **CDS (Controller Design Studio)** – oduł umożliwiający modelowanie inteligentnych konfiguracji sieciowych,
- **CLAMP (Control Loop Automation Management Platform)** – moduł zarządzający zamkniętymi pętlami sterowania.

Komponentem odpowiedzialnym za pętle sterowania w ONAP, a jednocześnie kandydatem do rozwiązania wyzwań przedstawionych powyżej, jest CLAMP<sup>6</sup>. Jednak posiada on pewne ograniczenia:

- Wymaga stosowania architektury pętli zgodnej z modelem MAPE-K, co ogranicza możliwość implementacji niestandardowych pętli sterowania.
- Wymaga ścisłej integracji z innymi modułami ONAP, takimi jak DCAE, CDS czy silniki polityk, co ogranicza możliwość implementacji pętli niezależnych od ekosystemu ONAP.
- Jest zoptymalizowany pod kątem prostych pętli sterowania. Brak natywnego wsparcia dla bardziej złożonych architektur jak pętle hierarchiczne, rozproszone lub współzależne.
- Brak natywnego wsparcia dla sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego (AI/ML) w komponentach.
- Ścisłe powiązanie z wybranymi silnikami polityk, takimi jak XACML<sup>7</sup>, Drools<sup>8</sup> czy APEX<sup>9</sup>
- Silna specjalizacja w orkiestracji sieci SDN i NFV utrudnia rozwój pętli niezwiązańych z tym zagadnieniem.

<sup>5</sup> <https://www.onap.org>

<sup>6</sup> <https://docs.onap.org/projects/onap-policy-parent/en/istanbul/clamp/clamp-clamp-architecture.html>

<sup>7</sup> <https://docs.onap.org/projects/onap-policy-parent/en/istanbul/xacml/xacml.html>

<sup>8</sup> <https://docs.onap.org/projects/onap-policy-parent/en/istanbul/drools/drools.html>

<sup>9</sup> <https://docs.onap.org/projects/onap-policy-parent/en/istanbul/apex/apex.html>

### 2.3.3. Architektura referencyjna ETSI ZSM

Nadrzędnym celem projektowym ZSM jest umożliwienie zarządzania siecią i usługami w sposób niewymagający ingerencji człowieka (zero touch) w środowisku wielu dostawców (ang. *multi-vendor environment*) [8]. Architektura przyjmuje pewien zestaw pryncypów (zasad):

1. Modularność
2. Rozszerzalność
3. Skalowalność
4. Sterowane modelem, otwarte interfejsy
5. **Automatyzacja zarządzania w pętli zamkniętej**
6. Obsługa funkcji zarządzania bezstanowego
7. Odporność
8. Rozdzielenie obszarów zarządzania
9. Kompozycyjność usług
10. Interfejsy oparte na intencjach
11. Abstrakcja funkcjonalna
12. Prostota
13. Zaprojektowane do automatyzacji

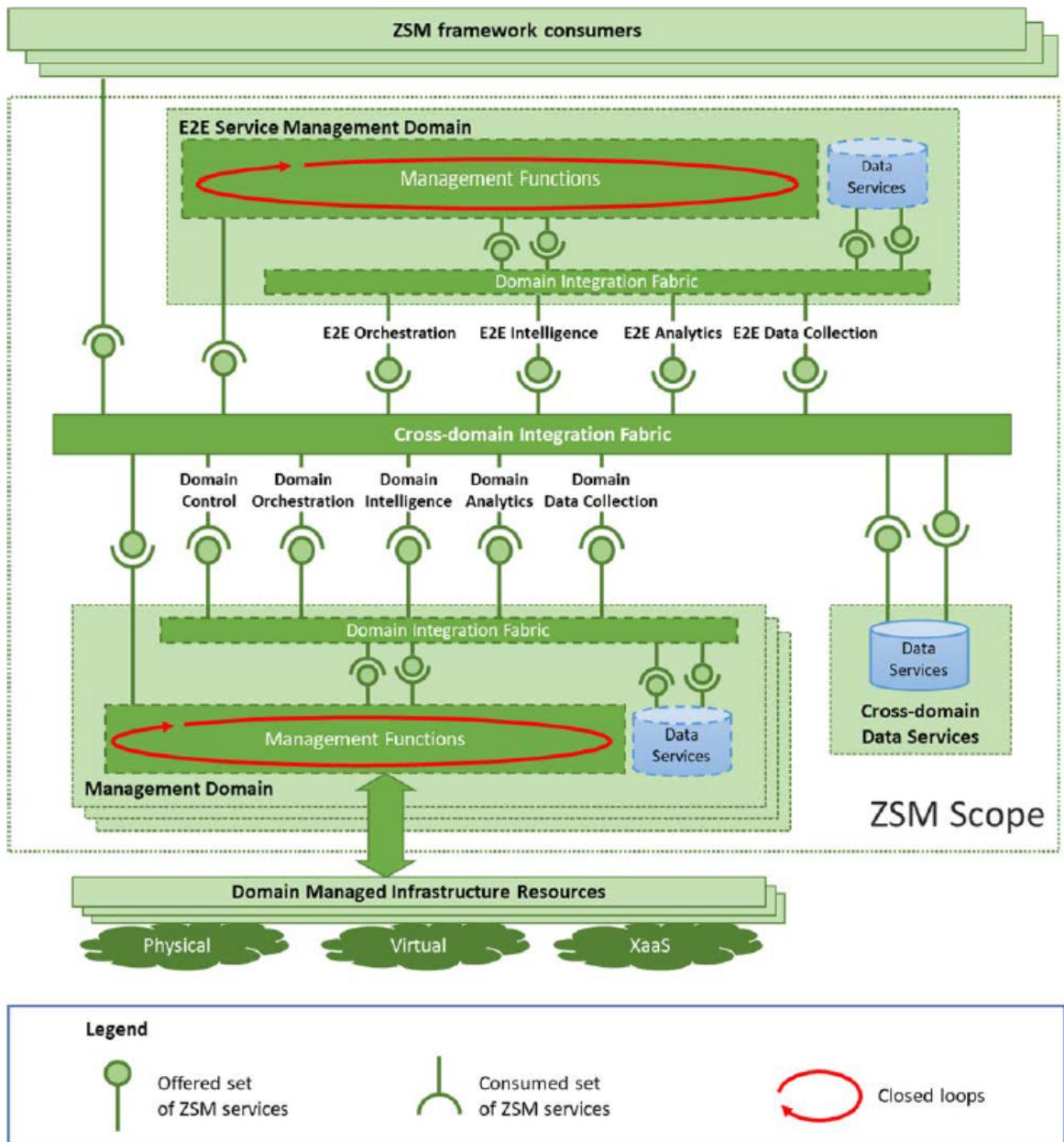
Framework ZSM wpisuje się w trend branżowy polegający na odejściu od monolitycznych, silnie powiązanych systemów na rzecz bardziej elastycznych zestawów usług zarządzania (ang. *management services*). Referencyjna architektura ZSM definiuje zestaw elementów składowych (ang. *building blocks*), które wspólnie umożliwiają konstruowanie bardziej złożonych usług i funkcji zarządzania. Konstrukcja ta odbywa się zgodnie ze wzorcami kompozycji i współdziałania (ang. *composition and interoperation patterns*).

Framework ZSM składa się logicznie z rozproszonych serwisów zarządzania (ang. *management services*) i serwisów danych (ang. *data services*), które zorganizowane są w domeny zarządzania (ang. *management domains*) oraz zintegrowane poprzez powłokę integracyjną (ang. *integration fabric*). Powłoka integracyjna umożliwia również komunikację serwisów zarządzania z systemami zewnętrznymi.

Architektura referencyjna zapewnia środki do budowania i komponowania luźno powiązanych funkcji zarządzania (ang. *management functions*), które oferują serwisy zarządzania i wspólnie zapewniają kompleksowe zarządzanie danej domeny w sposób "zero-touch". Aby udostępnić swoje usługi, funkcje zarządzania umożliwiają ich wywoływanie oraz komunikację za pomocą punktów końcowych (ang. *endpoints*).

Na rysunku 2.5 przedstawiono architekturę referencyjną. Poniżej znajduje się krótkie omówienie jej elementów:

- Serwis zarządzania (ang. Management Service) - niewidoczna na rysunku, najmniejsza jednostka usługowa architektury, odpowiedzialna za niepodzielny aspekt składowy zarządzania.
- Serwis danych (ang. Data Service) - jednostka odpowiedzialna za gromadzenie danych, informacji oraz wiedzy.

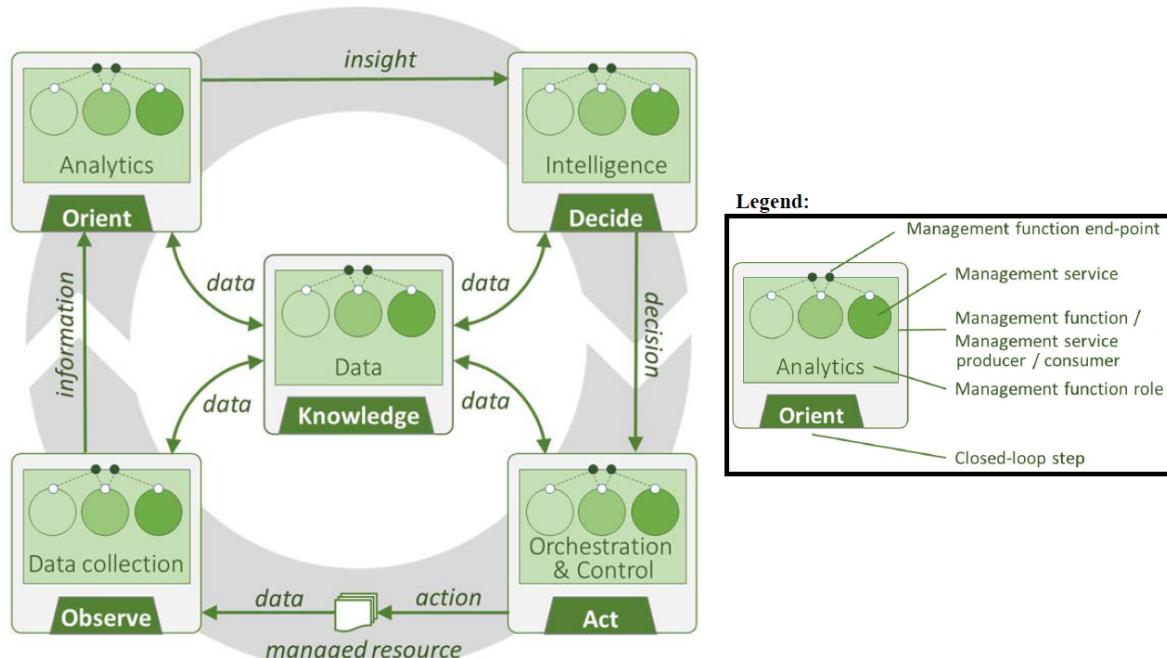


Rysunek 2.5. Architektura referencyjna ZSM. Źródło: [8].

## 2. Stan wiedzy

- Funkcja zarządzania (ang. Management Function) - połączenie wielu serwisów zarządzania, odpowiedzialna za dany aspekt składowy zamkniętej pętli zarządzania.
- Domena Zarządzania (ang. Management Domain) - odpowiedzialna za konkretną funkcjonalność zarządzania (np. analityka, orkiestracja, bezpieczeństwo).
- Domena Zarządzania end-to-end (ang. E2E Management Domain) - odpowiedzialna za zarządzanie usługami wymagającymi wielu funkcjonalności.
- Powłoka Integracyjna (ang. Integration Fabric) - odpowiedzialna za komunikację pomiędzy wszystkimi komponentami.

Pętle zarządzania komponowane są z funkcji zarządzania w sposób pokazany na rysunku 2.6. Za model odniesienia przyjęto strukturę pętli OODA [9], rozszerzoną o komponent wiedzy znany z MAPE-K [1].

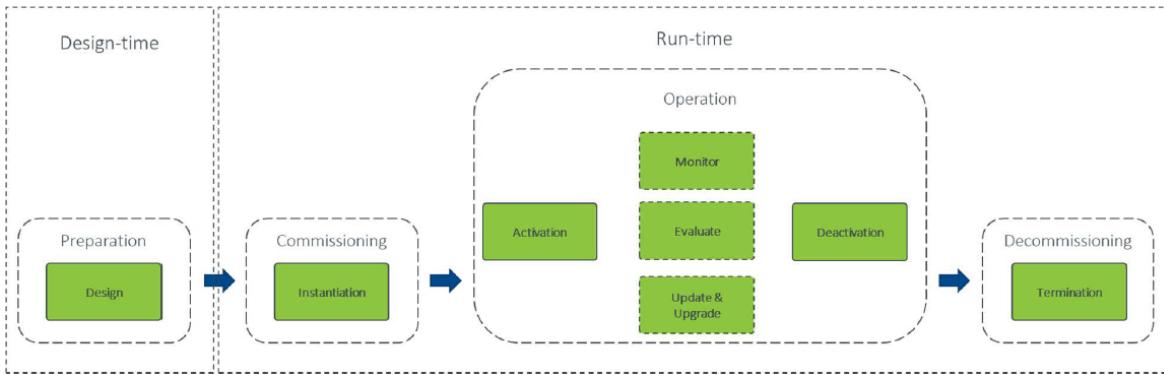


**Rysunek 2.6.** Mapowanie pomiędzy elementami składowymi architektury ZSM a zamkniętą pętlą sterowania. Źródło: Opracowanie własne na postawie [10].

Architektura ZSM określa także cykl życia zamkniętych pętli sterowania oraz mechanizmy ich koordynacji. „Cykl życia pętli podzielony jest na dwie fazy: Design-Time oraz Run-Time. Ich poszczególne etapy przedstawiono na rysunku 2.7. W zakresie koordynacji między pętlami wyróżnia się dwa przypadki: pętle hierarchiczne oraz pętle peer-to-peer. Pętle mogą komunikować się zarówno w obrębie jednej domeny zarządzania, jak i między domenami.

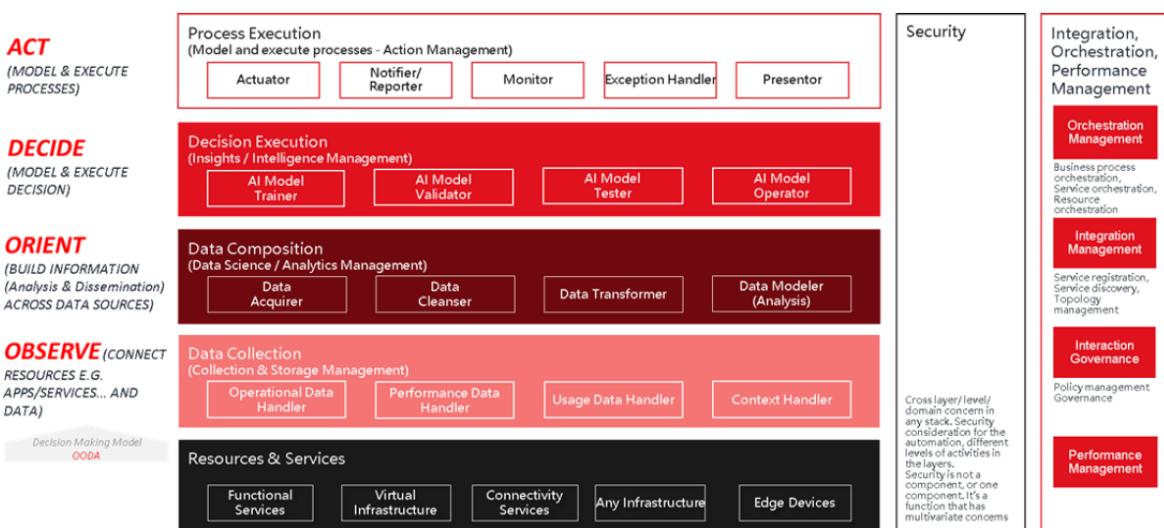
### 2.3.4. Architektura referencyjna CLADRA (TM Forum)

TM Forum definiuje architekturę referencyjną, która, wykorzystując zamknięte pętle sterowania, umożliwia szybkie wykrywanie oraz rozwiązywanie problemów w sieciach. Podobnie jak architektura ETSI ZSM, bazuje na Open Digital Architecture (ODA) [11]. CLADRA jednakże to ogólna koncepcja architektoniczna i zestaw dobrych praktyk, a nie formalna specyfikacja techniczna jak ETSI ZSM.



Rysunek 2.7. Fazy cyklu życia oraz aktywności zamkniętej pętli sterowania. Źródło: [10].

W [12] przedstawiono architekturę logiczną (Rysunek 2.8).



Rysunek 2.8. Architektura logiczna CLADRA. Źródło: [12].

Jej podstawą jest pętla OODA. Faza „Observe” odpowiada za zbieranie danych z sieci, które następnie, w wyniku analizy, są przekształcane w informację w fazie „Orient”. W fazie „Decide” podejmowane i modelowane są decyzje, które przekładają się na konkretne workflow do realizacji. Faza "Act" orkiestruje wykonaniem workflow na zarządzanych zasobach. Istotnym aspektem jest to, że (workflow) dla akcji rekoncyliacyjnych jest wyznaczany dynamicznie podczas iteracji pętli, w przeciwieństwie do przepływu pracy zdefiniowanego przed uruchomieniem danej iteracji.

Architektura ta operuje na innym poziomie abstrakcji niż ZSM. Konkretne jej implementacje przedstawione w [13] różnią się bardzo i tak jak wskazano w [6] są bardzo sztywne i skierowane na dany use-case. Podobnie jak w architekturze ETSI ZSM, przewiduje się uruchamianie wielu instancji pętli jednocześnie na jednym logicznie oddzielnym komponencie. Celem tych pętli jest autonomiczne zarządzanie, realizowane za pomocą komunikacji z zewnętrznymi względem tego komponentu zasobami.

[14] prezentuje koncepcję Menedżera Zamkniętych Pętli (ang. *Closed Loop Manager*), czyli logicznego komponentu architektury odpowiedzialnego za zarządzanie pętlami ste-

## 2. Stan wiedzy

---

rowania. Podobna kwestia poruszana jest również przez [4]. Taki menadżer w kontekście pętli sterowania jest odpowiedzialny za:

- Zarządzanie ich cyklem życia
- Konfiguracje ich celów zarządzania
- Monitorowanie ich stanu

Pełna tabela funkcjonalności proponowanych dla Menadżera Zamkniętych Pętli przez TM Forum znajduje się w Załączniku 11.

### 2.3.5. Architektura referencyjna ETSI ENI

ENI rozwija specyfikacje dotyczące Kognitywnego Systemu Zarządzania, który będzie samodzielnie regulował działanie sieci poprzez wykorzystanie technik sztucznej inteligencji, takich jak uczenie maszynowe (ang. *machine learning*) oraz wnioskowanie (ang. *reasoning*).

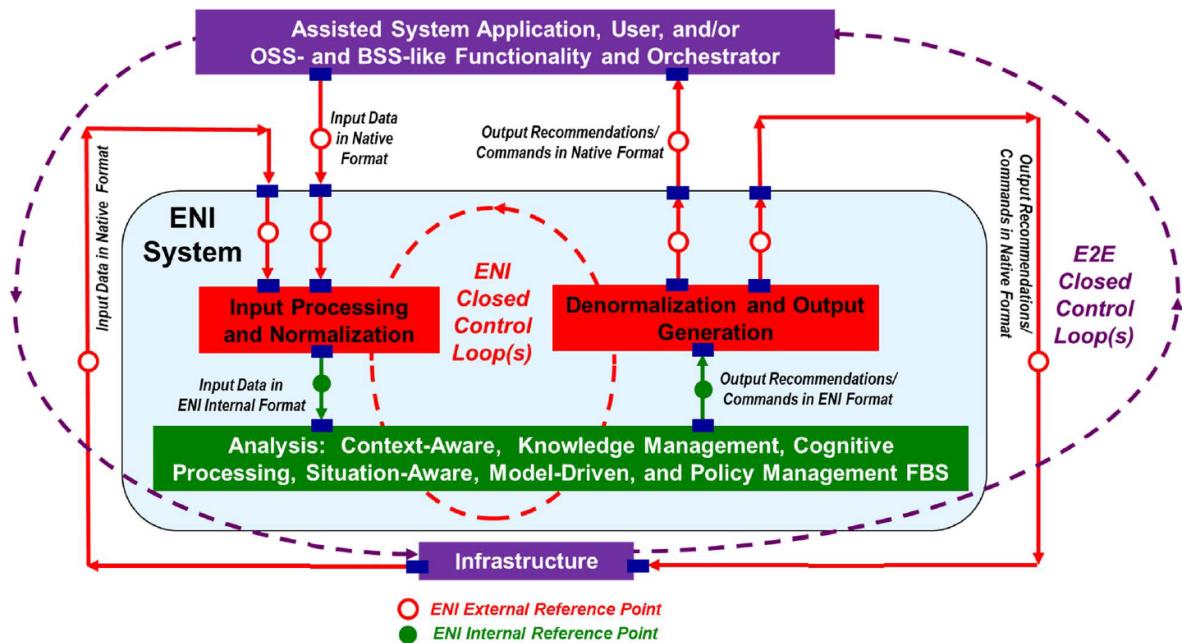
Z poprzedniego rozdziału wiemy, że aby *wnioskować* potrzebna jest *wiedza*. Skąd taki system pozyskiwałby wiedzę? Otóż, dzieje się to poprzez proces *Uczenia Maszynowego*. Pierwsza faza, czyli tzw. "trening", odbywa się przed wdrożeniem systemu. System może także uczyć się na podstawie doświadczenia (ang. *experience*), gdy już jest w pełni operacyjny. Dlatego mówimy o empirycznej inteligencji sieciowej (ang. *experiential networked intelligence*).

Architekturę [15] ENI obrazuje Rysunek 2.9. Fioletowe komponenty są zewnętrzne dla systemu ENI: górny stanowi jednostki zlecające mu zarządzanie, zaś dolny zarządzany obiekt (w tym przypadku zarządzana infrastruktura). Pomiędzy nimi występują pętle zarządzania end-to-end, co jest koncepcją zbliżoną do ETSI ZSM. Oba komponenty zewnętrzne, ponieważ sieci telekomunikacyjne funkcjonują w środowisku wielu dostawców (ang. *multi-vendor environment*), muszą przejść proces normalizacji formatu danych i interfejsów do jednolitego formatu rozumianego przez ENI System (tzw. ENI Format). Odpowiedzialne za to są dwa czerwone komponenty. Kluczowym elementem architektury jest zielony komponent. To w tym komponencie realizowane są operacje zarządzania oparte na sztucznej inteligencji. Cały cykl zamyka pętla sterowania.

Podczas gdy ZSM definiuje framework do orkiestracji i egzekwowania działań w sieci, ENI może pełnić funkcję warstwy kognitywnej dla ZSM. ZSM realizuje zamknięte pętle sterowania, reagując na konkretne zdarzenia w czasie rzeczywistym. ENI analizuje długoterminowe trendy i dynamicznie dostosowuje polityki zarządzania, na przykład w celu zapobiegania anomaliom sieciowym. *Kognitywność* ENI również opiera się na zamkniętych pętlach sterowania. Co istotne z punktu widzenia niniejszej pracy, [16] dokonuje przeglądu różnych architektur zamkniętych pętli sterowania, które mogą zostać wykorzystane w systemie ENI. Stanowi cenne źródło wiedzy na temat charakterystyk zamkniętych pętli sterowania. Jego analiza znajduje się w następnym podrozdziale.

### 2.3.6. Podsumowanie

Niniejsza praca identyfikuje lukę, którą zamierza wypełnić poprzez opracowanie platformy umożliwiającej modelowanie, uruchamianie oraz zarządzanie zamkniętymi pętlami



Rysunek 2.9. Wysokopoziomowa architektura funkcjonalna ENI. Źródło: [15].

sterowania. Luka ta umotywowana jest wyzwaniami zdefiniowanymi przez [6], brakami w ONAP/CLAMP oraz zidentyfikowania takiej potrzeby w architekturach referencyjnych ETSI oraz CLADRA.

## 2.4. Przegląd architektur zamkniętych pętli sterowania ENI

### 2.4.1. Wstęp

Pętle sterowania przedstawione w tej sekcji stanowią punkt odniesienia dla późniejszej analizy, której celem jest sformułowanie wymagań dla platformy. Opis bazuje na [16], gdzie dokonano przeglądu architektur zamkniętych pętli sterowania w kontekście ich integracji z modularną architekturą ENI.

### 2.4.2. Typy pętli sterowania

Większość architektur pętli sterowania dla systemów kognitywnych i adaptacyjnych używa mechanizmów:

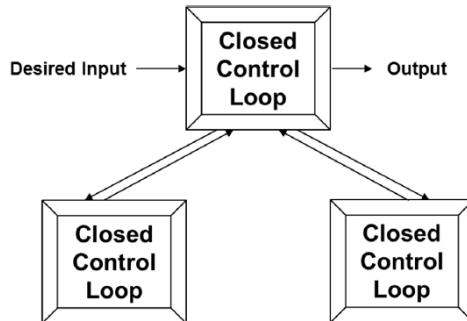
- sprzężenia zwrotnego (ang. *ang. feedback*) - mechanizm, w którym system reaguje na swoje wyjście i dostosowuje swoje działanie na podstawie wyników,
- sprzężenia wyprzedzającego (ang. *ang. feedforward*) - mechanizm, w którym system przewiduje przyszłe zmiany i podejmuje działania, zanim błąd faktycznie się pojawi.

Te sygnały odgrywają kluczową rolę w stabilizowaniu systemu, ale też jego umiejętności empirycznego uczenia się. Pętlę, która wykorzystuje mechanizm feedbacku nazywamy **zamkniętą**.

**Hierarchiczna** koordynacja (organizacja) pętli ma strukturę drzewa. Organizacja ta pozwala, aby różne decyzje podejmowane były przez różne węzły. W ogólności, istnieje zestaw nadzorczych (ang. *supervisory*) pętli, które alokują zadania do pętli podwładnych

(ang. *subordinary*). Każda podrzędna pętla wykonuje swoje zadania i zwraca rezultaty do swojej pętli nadrzędnej.

Zaawansowane zastosowania pozwalają jednej grupie dedykowanych pętli przejąć kontrolę nad hierarchią w zależności od celów i zmian w środowisku.



Rysunek 2.10. Hierarchiczna organizacja zamkniętych pętli sterowania. Źródło: [16].

Pętla **rozproszona** składa się z komponentów działających w różnych lokalizacjach, które komunikują się ze sobą poprzez mechanizmy przesyłania wiadomości.

**Adaptacyjność** pętli to dostosowywanie jej parametrów sterowania w czasie rzeczywistym albo na podstawie modelu, który definiuje pożądany efekt, albo używając analizy statystycznej do budowania modelu na podstawie mierzonych danych.

**Federacją** nazywamy grupę półautonomicznych pętli sterowania, które wykorzystują formalne kontrakty do regulowania wzajemnych interakcji i zachowania. Kontrakty obejmują zasady przyjmowania nowych członków federacji, regulacje dotyczące widoczności i rodzaju informacji jakie mogą być udostępnianie innym członkom federacji. Każda pętla federacji operuje na swoich lokalnych danych. Następnie decyzje podjęte przez każdą z nich są agregowane i publikowane jako wspólna decyzja federacji.

**Kognitywną** pętlą sterowania nazywamy taką, która z pośród dostępnych jej danych jest w stanie wyrozuć nowe dane, informację i finalnie wiedzę, która pomoże jej osiągać cele zarządzania.

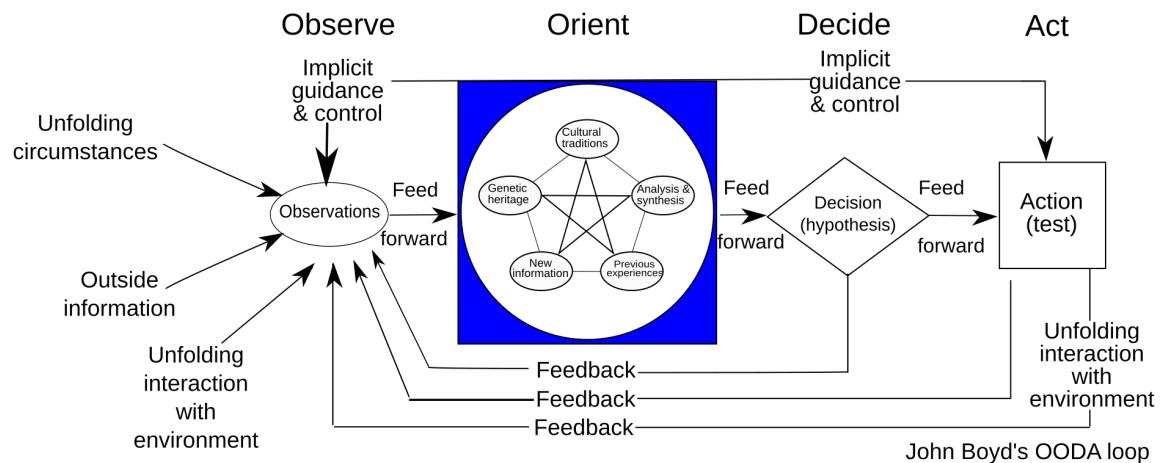
### 2.4.3. OODA

Architektura pętli OODA [9] jest widoczna na Rysunku 2.11.

Widoczne jest iż, każdy element posiada komunikację na trzech płaszczyznach:

- Otrzymywanie danych od poprzedniego elementu lub ze środowiska zewnętrznego.
- Przekazywanie feedbacku do elementu „Observe” (z wyjątkiem „Orient”).
- Przekazywanie danych do następnego elementu lub do środowiska zewnętrznego.

Dodatkowo, element „Orient” może przekazywać swoje dane zarówno do „Observe”, jak i do „Act”. Ze środowiskiem zewnętrznym mogą komunikować się jedynie elementy „Observe” oraz „Act”, przy czym każdy z nich realizuje komunikację w innym kierunku. Mimo że pętla OODA może wydawać się sekwencyjna, w rzeczywistości każdy element działa w sposób ciągły, a jego aktywacja (pobudzenie) następuje na zasadzie otrzymania danych.



Rysunek 2.11. Architektura pętli OODA. Źródło: [16].

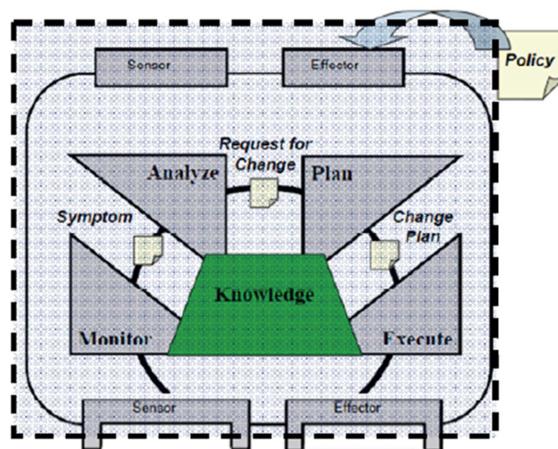
#### 2.4.4. MAPE-K

Architektura pętli MAPE-K [1] jest widoczna na Rysunku 2.12.

Jest to pętla sekwencyjna, w której każdy element komunikuje się jedynie na dwóch płaszczyznach:

- Otrzymuje dane od poprzedniego elementu (lub ze środowiska zewnętrzne, jeśli jest to moduł „Monitor”).
- Przekazuje dane następnemu elementowi (lub do środowiska zewnętrzne, jeśli jest to moduł „Execute”).

Dodatkowo, każdy element jest połączony do „Knowledge”, które pełni funkcję wspólnego repozytorium wiedzy. Generowanie oraz konsumpcja wiedzy stanowią osobny proces komunikacyjny i nie są częścią *workflow* pętli sterowania.



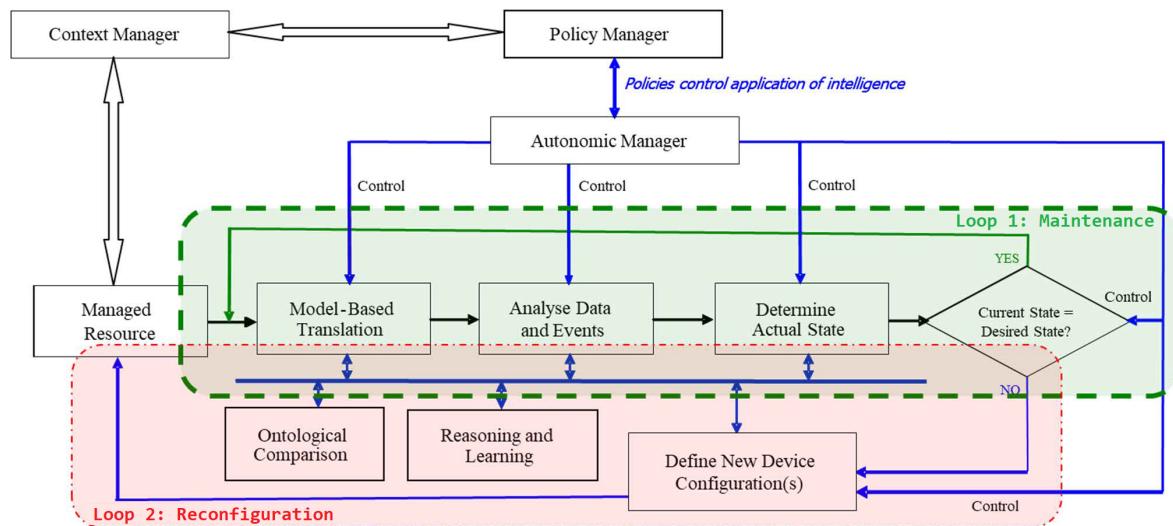
Rysunek 2.12. Architektura pętli MAPE-K. Źródło: [16].

#### 2.4.5. Focale

Architektura pętli Focale [17] jest przedstawiona na Rysunku 2.13. Workflow tej pętli jest sekwencyjne, jednak dzięki wspólnej szynie danych każdy element może komunikować

się bezpośrednio z innymi komponentami. Istotnym atrybutem tej szyny jest natywna obsługa modelu informacji DEN-ng [18] oraz ontologii DENON-ng [17]. Dodatkowo, każdy element pętli jest połączony z „Autonomic Managerem”, koncepcją zaczerpniętą z [1]. Pętla Focale może przybierać różne przebiegi w kolejnych iteracjach, w zależności od stanu systemu zarządzanego. Wyróżnia się:

- Pętlę utrzymaniową – występuje, gdy system nie wymaga akcji naprawczych ani optymalizacyjnych.
- Pętlę rekonfiguracyjną – uruchamianą, gdy stan aktualny systemu różni się od stanu pożądanego, co wymaga podjęcia działań korygujących.



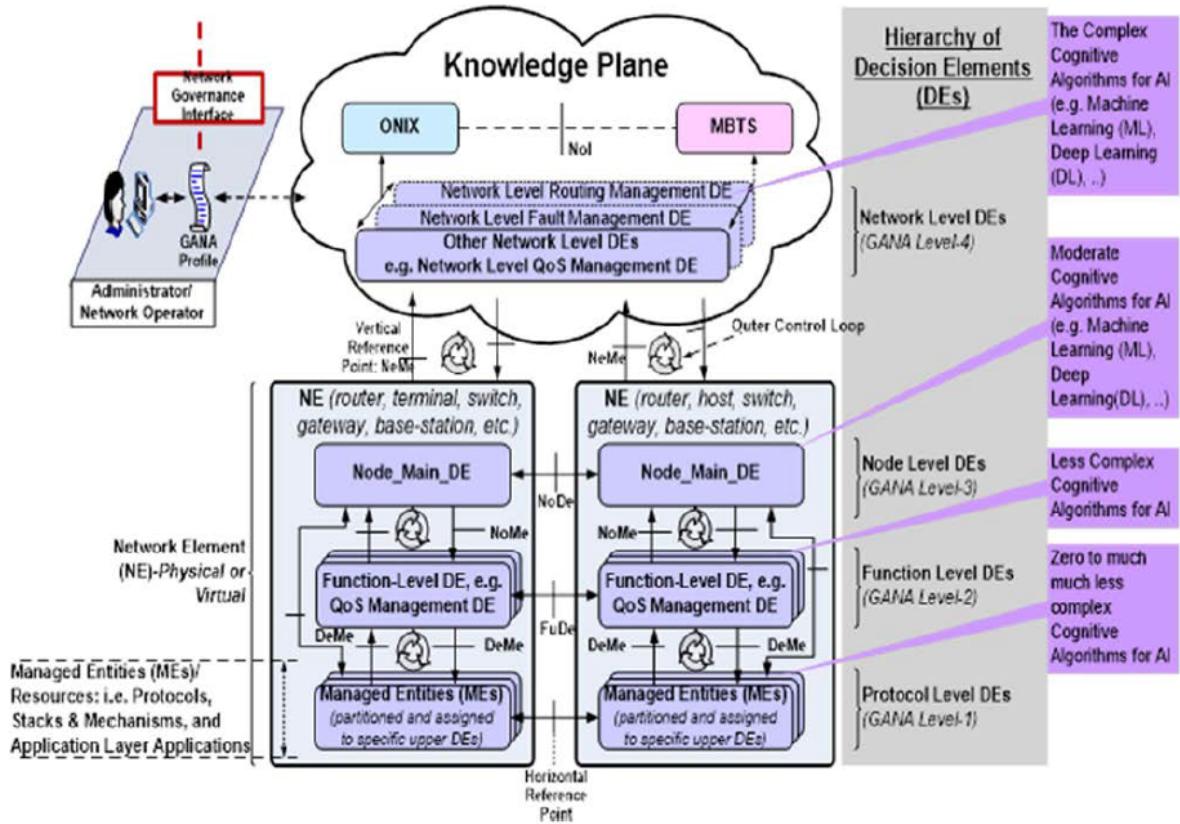
Rysunek 2.13. Architektura pętli Focale. Źródło: Opracowanie własne na podstawie [16].

### 2.4.6. GANA

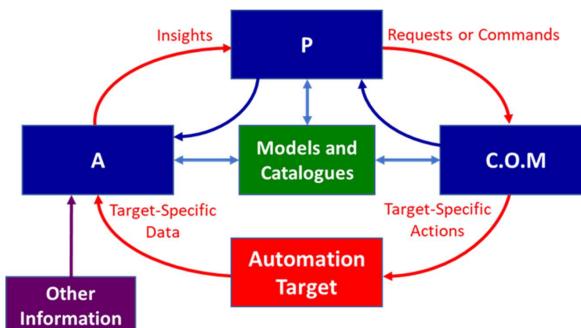
Architektura GANA (Generic Autonomic Network Architecture) [19] jest przedstawiona na Rysunku 2.14. Nie definiuje ona pojedynczej pętli sterowania, lecz stanowi zbiór hierarchicznie powiązanych pętli sterowania. Pętle najniższego poziomu implementują tzw. szybkie pętle sterowania, które wykorzystują minimalny poziom kognitywności lub nie stosują jej wcale. W miarę przechodzenia na wyższe poziomy hierarchii, stopień zastosowania mechanizmów kognitywnych wzrasta, co sprawia, że procesy sterowania stają się bardziej złożone, ale również wolniejsze.

### 2.4.7. COMPA

Architektura COMPA (Control, Orchestration, Management, Policies, Analytics) [3] jest przedstawiona na Rysunku 2.15. Samo workflow pętli nie wnosi istotnych nowości w porównaniu do wcześniejszej opisanych modeli pętli sterowania. Jednak warto zauważyć, że system zarządzany (automation target) w jednej instancji pętli COMPA może być inną instancją tej samej pętli, co wprowadza rekurencyjną strukturę sterowania.



Rysunek 2.14. Architektura pętli GANA. Źródło: [16].



Rysunek 2.15. Architektura pętli COMPA. Źródło: [16].

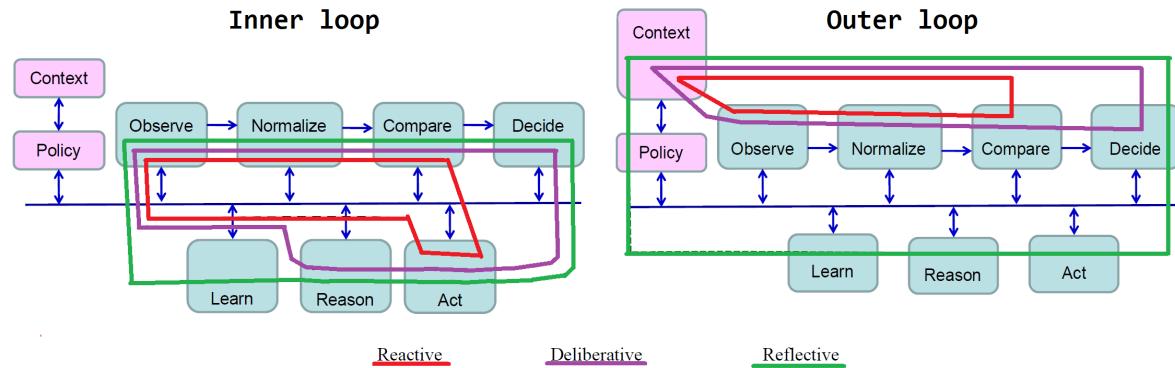
#### 2.4.8. Focale v3

Architektura pętli Focale v3 [20] jest widoczna na Rysunku 2.16. Jest to kolejna wersja architektury Focale, która zamiast używać dwóch alternatywnych pętli proponuje dwie nieustannie działające pętle. Jedna zewnętrzna, używana do rekoncyliacji systemu zarządzanego na większą skalę w ramach reagowanie na zmiany kontekstu środowiska. Druga wewnętrzna, do rekoncyliacji w ramach jednego określonego kontekstu (sytuacji) np. w jednej iteracji. Obie mają 3 alternatywne przebiegi inspirowane [2]. Przebieg reaktywny używany jest w wypadku gdy zmiany kontekstu już kiedyś się wydarzyły i były przeanalizowane. Przebieg obradujący (ang. *deliberative*) jest wykorzystywany gdy zmiana kontekstu jest znana, ale jej detale nie są jeszcze zrozumiane na tyle, aby móc podjąć natychmiastową akcję. Przebieg refleksyjny ma miejsce, gdy zachodzą zupełnie nowe zmiany kontekstu.

## 2. Stan wiedzy

---

i system musi się dopiero nauczyć jak sobie z nimi radzić. W kontekście komunikacji elementów wersja ta nie wnosi nic poza to co pętla FOCALE.



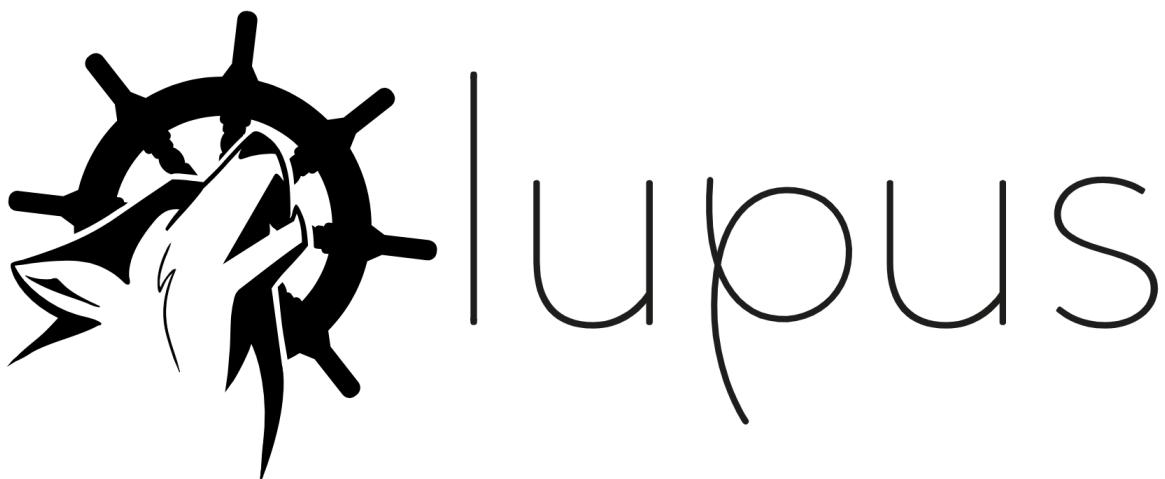
**Rysunek 2.16.** Architektura pętli Focale v3. Źródło: Opracowanie własne na podstawie [16].

### **3. Architektura**

#### **3.1. Wstęp**

Niniejszy rozdział przedstawia zaproponowaną w pracy architekturę platformy, na której możliwe jest modelowanie oraz uruchamianie workflow zamkniętych pętli sterowania. Platformie nadano nazwę w celu ułatwienia jej opisu. Nazwa brzmi "Lupus". Powstała od przekształcenia angielskiego słowa "loops" oznaczającego pętle, oraz od zakotwiczenia o wyraz mający znaczenie nadające się na "maskotkę" projektu. "Lupus" po łacinie oznacza wilka, stąd w logo projektu wilk.

Architektura w rozumieniu ENI jest to "zbiór reguł i metod opisujących funkcjonalność, organizację oraz implementację systemu". Niniejszy rozdział pomija aspekt implementacji, która jest omówiona w następnym rozdziale.



**Rysunek 3.1.** Logo platformy Lupus. Autor: Natalia Ruszkowska, na potrzeby niniejszej pracy.

#### **3.2. Wymagania i założenia**

##### **3.2.1. Wstęp**

Niniejszy rozdział opisuje proces formułowania wymagań i założeń dotyczących platformy Lupus, przedstawiając przy tym aspekt badawczy pracy, który został zebrany w jednym miejscu dla lepszego zobrazowania zagadnienia. Kolejne podrozdziały przedstawiają docelową architekturę, abstrahując od poniższej dyskusji. Taki podział ma na celu ułatwienie odbioru treści przez czytelnika. Opis w tym podrozdziale opiera się na analizach architektur systemów zarządzania i pętli sterowania, przeprowadzonych w poprzednim rozdziale.

##### **3.2.2. Wymagania ogólne**

Obie architektury referencyjne ETSI ZSM oraz CLADRA definiują je jako framework umożliwiające tworzenie zamkniętych pętli sterowania złożonych z różnych komponentów.

Zakładają one możliwość równoczesnego działania wielu instancji zamkniętych pętli sterowania. Niniejsza praca proponuje architekturę platformy umożliwiającą tworzenie i uruchamianie takich pętli. ZPełniąc te dwie role, platforma powinna również pełnić funkcję Menedżera Zamkniętych Pętli, znanego z architektury CLADRA, który zarządza pętlami. Na tej podstawie można wyróżnić trzy główne grupy wymagań funkcjonalnych:

- wymagania dotyczące środowiska wykonawczego (ang. *runtime environment*),
- wymagania określające, jakie architektury pętli powinny być możliwe do modelowania,
- wymagania określające funkcje zarządzania pętlami, które należy zapewnić

Ponieważ pętle sterowania wykorzystywane są w wielu branżach, już na tym etapie można określić wymaganie, aby platforma była dedykowana branży teleinformatycznej.

#### 3.2.3. Wymagania na środowisko wykonawcze

Platforma musi być zgodna z architekturą referencyjną ETSI ZSM oraz CLADRA, a co za tym idzie – kompatybilna z ich architekturą bazową, Open Digital Architecture (ODA) [11], oraz wspierać dwanaście pryncipiów architektury ZSM. Ponadto, aby wpisać się w aktualne trendy inżynierii oprogramowania, platforma powinna być gotowa do wdrożenia w środowisku chmur obliczeniowych (ang. *cloud-native*). Zamiast budować własne środowisko, platforma powinna bazować na już istniejących rozwiązaniach, co pozwoli uniknąć dodatkowych kosztów i zwiększyć efektywność wdrożenia. Istotnym atutem byłoby wykorzystanie środowiska dobrze znanego w branży teleinformatycznej, co zwiększyłoby szanse na szeroką adopcję w społeczności. Na tej podstawie formułujemy następujące wymagania:

1. Środowisko wykonawcze powinno być dobrze znane w branży teleinformatycznej
2. Środowisko powinno wspierać 12 pryncipiów architektury ZSM
3. Środowisko powinno być *cloud-native*

#### 3.2.4. Wymagania na modelowanie pętli

Punktem wyjścia jest możliwość zamodelowania dowolnej zamkniętej pętli sterowania, przeanalizowanej w podrozdziale 2.4. Kluczowym wymaganiem jest zapewnienie mechanizmów feedback i feedforward, co oznacza konieczność obsługi komunikacji pomiędzy elementami pętli. Ponadto, platforma musi wspierać wszystkie opisane typy pętli, takie jak hierarchiczne, rozproszone oraz federacyjne.

Warto zaznaczyć, że cechy adaptacyjności i kognitywności pętli nie są bezpośrednią funkcjonalnością platformy, lecz są implementowane w komponentach pętli wykonujących jej logikę obliczeniową, takich jak moduły sztucznej inteligencji. Na przykład w architekturze ETSI ZSM te aspekty są odzwierciedlone w serwisach zarządzania. Dlatego platforma nie przetwarza logiki pętli bezpośrednio, lecz deleguje obliczenia do zewnętrznych komponentów, które zgodnie z referencyjnymi architekturami ETSI ZSM oraz CLADRA mogą być uruchamiane w innych środowiskach.

Porównanie pętli OODA z MAPE-K pokazuje, że modelowane pętle mogą być sekwencyjne lub współbieżne. Sekwencyjność oznacza wykonanie operacji poszczególnych ele-

mentów w określonej kolejności, natomiast brak sekwencyjności wskazuje na współbieżne działanie elementów. W projekcie platformy przyjmujemy, że współbieżność jest bardziej ogólnym przypadkiem, na którego podstawie można implementować sekwencyjność. Sekwencyjność w środowisku współbieżnym może być osiągana poprzez pobudzanie elementów w ustalonej kolejności.

Z kolei pętle niesekwencyjne działają w sposób ciągły, oczekując na jeden z trzech sygnałów: feedback, feedforward lub sygnał ze środowiska zewnętrznego. Dlatego definiujemy wymaganie, że element pętli jest aktywowany przez dane wejściowe, co wpisuje się w pryncypia architektury ETSI ZSM. Jak pokazuje model OODA, element pętli może pobudzać wiele innych elementów, a nie tylko jeden, a w niektórych przypadkach komunikacja może obejmować także środowisko zewnętrzne.

Struktura wewnętrzna elementu „Orient” w modelu OODA może być skomplikowana i wielowarstwowa, obejmując wewnętrzne operacje, a nawet dodatkowe pętle sterowania. Z kolei element „Decide” może zmieniać przebieg iteracji pętli, co oznacza, że każda iteracja może wyglądać inaczej, w zależności od podjętych decyzji.

Tak jak wskazuje [6], modelowanie pętli sterowania powinno być ustandaryzowane i ujednolicione, tak aby zapoznanie się z jedną notacją lub językiem umożliwiałło jej wielokrotne użycie w różnych scenariuszach. Notacja powinna być intuicyjna i niewymagająca wyspecjalizowanej wiedzy technicznej, co zwiększyłoby potencjalne grono użytkowników platformy.

W idealnym przypadku platforma powinna oferować graficzny interfejs użytkownika umożliwiający łatwe modelowanie pętli, który w tle dokonywałby translacji na ustandaryzowaną notację. Element wykonawczy, odpowiedzialny za interpretację notacji opisującej workflow pętli, jak i sama notacja, powinny być neutralne technologicznie, nie narzucając żadnej konkretnej logiki ani schematu działania pętli.

Jedna pętla sterowania zazwyczaj obsługuje określona funkcję zarządzania, konkretny system zarządzany lub domenę zarządzania. Konieczne jest jednak uogólnienie tego pojęcia, aby zapewnić większą elastyczność w definiowaniu zakresu działania poszczególnych pętli.

Ponieważ architektury ZSM oraz CLADRA są przystosowane do pracy w środowisku wielodostawczym (multi-vendor environment), platforma Lupus powinna wspierać konwersję danych wejściowych na jednolity model wewnętrzny, podobnie jak proponuje to pętla FOCALE v3 [20]. Istotne jest jednak to, aby nie narzucać żadnego konkretnego modelu.

Dodatkowo, aby systemy zarządzane przez z Lupus nie musiały być modyfikowane, konieczne jest wprowadzenie komponentu pośredniczącego, który będzie pełnił dwie kluczowe funkcje:

- Integracja systemu zarządzanego z Lupus bez konieczności jego modyfikacji.
- Translacja zbieranych danych na format wewnętrzny platformy.

Z powyższych rozważań zdefiniowano następujące wymagania:

4. Platforma musi wspierać komunikację między elementami pętli poprzez ich „pobudzanie” danymi.

### 3. Architektura

---

5. Platforma musi umożliwiać koordynację pomiędzy pętlami w sposób hierarchiczny, federacyjny oraz rekurencyjny.
  6. Elementy pętli działają współbieżnie.
  7. Część obliczeniowa logiki pętli musi być delegowana do komponentów zewnętrznych.
  8. Element pętli może pobudzać wiele innych elementów lub komunikować się ze środowiskiem zewnętrznym.
  9. Element pętli może zawierać wewnętrzne workflow, umożliwiające m.in. podejmowanie decyzji zmieniających przebieg pętli w danej iteracji.
  10. Elementy pętli są sterowane danymi (data-driven) i nie powinny mieć narzuconej struktury działania.
  11. Modelowanie pętli powinno być ustandaryzowane i ujednolicone poprzez określona notację lub język.
  12. Zastosowana notacja nie powinna wymagać specjalistycznych umiejętności technicznych.
  13. Kod w notacji powinien móc być generowany za pomocą interfejsu graficznego.
  14. Notacja powinna w jednolity sposób definiować zarządzany przez siebie byt.
  15. Pętla komunikująca się ze środowiskiem zewnętrznym powinna wykorzystywać komponent pośredniczący, który umożliwia translację formatów danych oraz integrację.
- Należy doprecyzować pojęcia środowiska zewnętrznego oraz komponentów zewnętrznych.
- Komponenty zewnętrzne to elementy nienależące bezpośrednio do platformy, lecz funkcjonujące w obrębie lub na rzecz systemu zarządzania, takiego jak ENI, ZSM czy CLADRA. Mogą one realizować określone funkcje obliczeniowe, analityczne lub decyzyjne, wspierając działanie platformy w kontekście zarządzania siecią.
  - Środowisko zewnętrzne odnosi się do systemów spoza samego systemu zarządzania, specyfikowanego przez ETSI lub TM Forum, i obejmuje zazwyczaj infrastrukturę sieciową oraz inne elementy teleinformatyczne, którymi zarządza platforma. W odróżnieniu od komponentów zewnętrznych, środowisko zewnętrzne nie jest częścią systemu zarządzania, lecz stanowi jego obiekt operacyjny.

#### 3.2.5. Wymagania na zarządzanie pętlami

Wymagania w tej kategorii są jednoznacznie określone i nie wymagają dodatkowych rozważań, ponieważ aspekt zarządzania pętlami został kompleksowo opisany w architekturze CLADRA jako zestaw funkcjonalności Menedżera Zamkniętych Pętli. Pełen zakres tych funkcjonalności został przedstawiony w formie tabeli w Załączniku 11.

W związku z tym, niniejszy podrozdział definiuje jedno zbiorcze wymaganie, obejmujące zapewnienie wszystkich funkcjonalności Menedżera Zamkniętych Pętli zgodnie z architekturą CLADRA:

16. Platforma powinna zapewniać wszystkie funkcje zarządzania pętlami zdefiniowane w Załączniku 11.

### 3.2.6. Dyskusja

Pracę rozpoczęto od wyboru środowiska wykonawczego, które spełniałoby postawione wymagania (1, 2, 3). Oprogramowaniem, które od razu przychodzi na myśl w zgodzie z hasłem cloud-native jest Kubernetes<sup>10</sup>. Jego architektura została zaprojektowana z myślą o modularności i skalowalności, co doskonale wpisuje się w pryncypia architektury ZSM. Ponadto, ze względu na szeroką adopcję w systemach wielu dostawców, Kubernetes jest platformą dobrze znaną w branży teleinformatycznej.

Dodatkowo, Kubernetes swoim wbudowanym zasobom (ang. *built-in resources*) takim jak Pody czy Wdrożenia (ang. *deployments*) zapewnia funkcjonalności definiowane przez Wymaganie 16. To skłoniło do postawienia hipotezy, że jeśli pętle jako byt mogły występować tak samo jak zasoby wbudowane Kubernetes i podlegać dokładnie takiemu samemu cyklowi zarządzania, wybór Kuberentes jako środowiska wykonawczego pozwoliłby również spełnić wymagania 1-3.

Krótką analizą wykazała, że jest to możliwe, ponieważ Kubernetes umożliwia definiowanie tzw. zasobów własnych (Custom Resources)<sup>11</sup>, które można rejestrować w klastrze i używać w taki sam sposób jak zasoby wbudowane. W ramach dalszych badań dokładnie przeanalizowano ten koncepcję.

Każdy zasób wbudowany w Kubernetes ma przypisany kontroler, który reguluje jego działanie<sup>12</sup>. W przypadku zasobów własnych możliwe jest ich rozwijanie za pomocą Wzorca Operatora<sup>13</sup> (ang. *Operator Pattern*). Kontrolery dla zasobów własnych nazywamy operatorami, a ich tworzenie umożliwia framework Kubebuilder<sup>14</sup>.

Zmaterializowanie zamkniętej pęli sterowania jako zasób Kubernetes spełnia wymaganie 16 w następujący sposób:

- Fx.1 Pętla może być zdefiniowana jako zasób Kubernetes poprzez plik manifestowy YAML, zawierającym m.in. nazwę oraz opis celu.
- Fx.2 Workflow pętli może być również zdefiniowany w pliku YAML.
- Fx.3 Proces wdrażania pętli polega na utworzeniu jej pliku YAML.
- Fx.4 Instancja pętli jest tworzona poprzez zaaplikowanie pliku YAML (`kubectl apply -f <filename>`), po czym jej cyklem życia zarządza Kubernetes.
- Fx.5 Monitorowanie możliwe jest poprzez komendę `kubectl describe` lub śledzenie logów operatora.
- Fx.6 Zakończenie działania pętli możliwe jest za pomocą komendy `kubectl delete`.
- Fx.7 Usunięcie pętli polega na usunięciu jej pliku YAML.
- Fx.8 Odkrywanie pętli polega na wyszukaniu określonego typu zasobów w kubernetes (np. `kubectl get loops`).
- Fx.9 Ochrona pętli realizowana poprzez zabezpieczenie klastra Kubernetes.
- Fx.10 Zmiana pętli polega na modyfikacji jej pliku YAML i ponownym zaaplikowaniu.

<sup>10</sup><https://kubernetes.io>

<sup>11</sup><https://kubernetes.io/docs/concepts/extend-kubernetes/api-extension/custom-resources/>

<sup>12</sup><https://kubernetes.io/docs/concepts/architecture/controller/>

<sup>13</sup><https://kubernetes.io/docs/concepts/extend-kubernetes/operator/>

<sup>14</sup><https://book.kubebuilder.io>

- Fx.11 Walidacja polega na sprawdzeniu składni pliku YAML, co może być realizowane poprzez odpowiednie mechanizmy walidacyjne zasobów własnych w Kubebuilderze.
- Fx.12 Przechowywanie pętli polega na przechowywaniu plików YAML w systemie plików (ang. *filesystem*).
- Fx.13 Kontrola pętli polega na działaniach utrzymywanych analogicznych jak w przypadku zasobów wbudowanych Kubernetes.
- Fx.14 Rekonfiguracja polega na modyfikacji pliku YAML lub rekonfiguracji komponentów pętli, która odbywa się poza Kubernetes
- Fx.15 Ekspozycja jest możliwa poprzez API Kubernetes
- Fx.16 Orkiestracja jest możliwa poprzez narzędzia oferowane jako dodatki do Kubernetes
- Fx.17 Wstrzymanie pętli polega na usunięciu instancji jej zasobu (`kubectl delete`). Jest to akceptowalne ze względu na bezstanowość pętli lub możliwość zapisu stanu w komponentach zewnętrznych.
- Fx.18 Przywrócenie pętli osiągane jest poprzez ponowne zaaplikowanie pliku YAML.

W ten sposób pokryto dwie kluczowe grupy wymagań: na środowisko wykonawcze oraz na zarządzanie pętlami.

Dalsza część pracy koncentruje się na eksploracji możliwości spełnienia wymagań dotyczących modelowania pętli. W związku z wyborem Kubernetes oraz Wzorca Operatora, modelowanie pętli oraz urzeczywistnienie tego modelowania, czyli wykonanie logiki (workflow) pętli opiera się na propozycji odpowiedniej notacji w plikach YAML oraz zaprojektowaniu operatora odpowiedzialnego za jej interpretację.

Kontrolery w Kubernetes działają na zasadzie zamkniętej pętli sterowania. Gdy w zarządzanym przez nie obiekcie zachodzi zmiana, kontrolery zostają o tym poinformowane. Ich zadaniem jest porównanie aktualnego stanu obiektu ze stanem pożądany, a jeśli występują rozbieżności, wykonanie operacji mających na celu doprowadzenie systemu do stanu zgodnego z oczekiwany. Proces ten nazywany jest rekoncyliacją (reconciliation) i oznacza on pogodzenie ze sobą chwilowo rozbieżnych stanów.

Stan aktualny wyrażony jest jako pole status danego zasobu i przechowywany w bazie etcd<sup>15</sup>. Natomiast stan pożądany definiowany jest w pliku YAML w polu spec i również zapisywany w etcd. Gdy którykolwiek z tych stanów ulegnie zmianie, warstwa sterowania Kubernetes pobudza kontroler, przekazując mu żądanie rekoncyliacji.

Mechanizm ten sugeruje możliwość realizacji wymagania 4 dotyczącego komunikacji elementów pętli. Komunikacja mogłaby polegać na wzajemnym pobudzaniu się elementów poprzez modyfikację pola status w ich reprezentacjach Kubernetes. W związku z tym podjęto decyzję, że każdy element pętli będzie reprezentowany jako obiekt Kubernetes<sup>16</sup> typu własnego o nazwie Element.

Dane wykorzystywane do pobudzania elementów pętli byłyby wpisywane do pola status, które operator może odczytać podczas rekoncyliacji obiektu. W celu odróżnienia od pojedynczych elementów pętli, zasób własny reprezentujący całą pętle nazwano Master.

<sup>15</sup><https://bulldogjob.pl/readme/etcd-czyli-mozg-klastra-kubernetes>

<sup>16</sup><https://kubernetes.io/docs/concepts/overview/working-with-objects/>

Przekształcenie elementu pętli w obiekt Kubernetes pozwala spełnić wymaganie 6, ponieważ obiekty Kubernetes istnieją stale w klastrze, a ich kontrolery mogą zostać wywołane w dowolnym momencie poprzez żądanie rekoncyliacji.

Zasób Element reprezentuje pojedynczy element pętli. Zasób Master odpowiada za instancjonowanie elementów oraz zarządzanie ich cyklem życia. Operator zasobu Master jest uruchamiany raz podczas instancjonowania obiektu. W tym momencie odczytuje on plik YAML, który zawiera definicję pętli i określa, jakie elementy należy utworzyć.

Ponieważ elementy pętli specyfikują jej model, notacja używana do ich definiowania powinna być zestandardyzowana i ujednolicona, zgodnie z wymaganiem 11. Notację tę nazwano LupN.

Notacja LupN opisuje elementy pętli oraz komunikacje między nimi. Opiera się ona na obiektach, które podczas pobudzenia danego elementu są interpretowane przez operator. Każdy element posiada obiekt akcji, który definiuje jego wewnętrzne workflow (w celu spełnienia wymagania 9) oraz obiekt o nazwie next reprezentujący komponenty, do których należy przekazać swoje dane wyjściowe. W celu spełnienia wymagania 8 obiekt next może reprezentować albo inne elementy danej pętli albo komponenty systemu zarządzania odpowiedzialne za część obliczeniową logiki pętli. W przypadku elementów końcowych może to być też środowisko zewnętrzne. Komponenty odpowiedzialne za część obliczeniową logiki pętli oraz środowisko zewnętrzne jest reprezentowane przez obiekt Destynacji, który specyfikuje komunikację za pośrednictwem protokołu HTTP. Wybór wsparcia tego protokołu jest podyktowany jest szeroką adaptacją w systemach rozproszonych korzystających z architektur mikroserwisowych.

Notacja LupN opisuje elementy pętli sterowania oraz komunikację między nimi. Opiera się na obiektach, które są interpretowane przez operator podczas pobudzenia danego elementu.

Każdy element pętli składa się z dwóch kluczowych obiektów:

- Obiekt akcji – definiuje wewnętrzne workflow elementu, co pozwala spełnić wymaganie 9.
- Obiekt next – reprezentuje komponenty, do których element przekazuje swoje dane wyjściowe.

Aby spełnić wymaganie 8, obiekt next może wskazywać na:

- inne elementy pętli,
- komponenty systemu zarządzania, które odpowiadają za część obliczeniową logiki pętli,
- środowisko zewnętrzne (w przypadku elementów końcowych pętli).

Komponenty odpowiedzialne za przetwarzanie logiki pętli oraz środowisko zewnętrzne są reprezentowane przez obiekt Destynacji, który specyfikuje komunikację za pośrednictwem protokołu HTTP. Wybór wsparcia dla HTTP wynika z jego szerokiej adopcji w systemach rozproszonych opartych na architekturze mikroserwisowej. Zakładamy więc, że powłoka integracyjna architektur ZSM znajdzie swoje implementacje w oparciu o komunikacje HTTP.

### 3. Architektura

---

Wewnętrzne workflow elementu specyfikuje komunikację z komponentami zewnętrznymi oraz podejmowanie decyzji dotyczących rozgałęziania (fork) przebiegu pętli sterowania. Specyfikacja ta wyrażana jest za pomocą łańcucha obiektów **akcji** (actions), które ściśle współpracują z **danymi**. Zgodnie z wymaganiem 10 operator elementu musi być ogólny i posiadać interpreter akcji, które mają pozwolić na elastyczną i opartą o dane orkiestrację wykonywanych operacji zarządzania.

Dane pojawiają się w elemencie jako wartość wpisana przez poprzedni element w polu status. Jako format umożliwiający reprezentację dowolnych danych wybrano JSON, który zapewnia elastyczność i powszechną kompatybilność w systemach rozproszonych.

Elementy współpracują z danymi poprzez obiekty akcji. Akcje występują w różnych typach, które razem tworzą zestaw operacji manipulujących danymi. Kluczową akcją jest send, która umożliwia komunikację z komponentami zewnętrznymi poprzez protokół HTTP, spełniając wymaganie 7. Akcja send specyfikuje:

- endpoint, na który należy wysłać żądanie HTTP,
- które pole JSON należy wysłać w żądaniu HTTP,
- w którym polu należy zapisać odpowiedź.

Inne typy akcji służą do odpowiedniej organizacji danych. Pola danych można łączyć, usuwać, zmieniać ich nazwy oraz duplikować. Dane są wykorzystywane głównie do zapisywania parametrów wysyłanych do komponentów zewnętrznych oraz przechowywania otrzymanych odpowiedzi. Specjalnym typem akcji jest switch, który pozwala wykonać wyrażenie warunkowe na danych i na jego podstawie uzależnić wybór następnej akcji do wykonania, co spełnia wymaganie 10). Podczas projektowania typów akcji postawiono na atomowość i elastyczność.

Pozostaje jeszcze kwestia komunikacji elementów pętli ze środowiskiem zewnętrznym. W celu spełnienia wymagania 15 zdefiniowano komponenty, które nazwano agentami translacji. Zdecydowano, że to użytkownik platformy najlepiej zna specyfikę swojego środowiska zewnętrznego, dlatego odpowiedzialność za implementację agentów translacji pozostaje po jego stronie. Zostały jednakże zdefiniowane interfejsy, które musi spełniać agent translacji w celu komunikacji z LUPUS.

Pozostaje jeszcze kwestia komunikacji elementów pętli ze środowiskiem zewnętrznym. Z racji wymagania 15 zdefiniowano komponenty, które nazwano agentami translacji. Zdecydowano, że tylko użytkownik platformy zna specyfiki swojego środowiska zewnętrznego dlatego to jemu pozostawiono implementacje agentów translacji. Zdefiniowano jednakże dwa interfejsy (wejściowy i wyjściowy), z których to specyfikacją dany agent translacji musi być zgodny. Dzięki temu platforma umożliwia elastyczną integrację z dowolnym środowiskiem zewnętrznym, jednocześnie zapewniając standardowy mechanizm komunikacji między elementami pętli a systemami zarządzanymi.

Wprowadzone w niniejszym podrozdziale pojęcia są szerzej omówione w dalszej części pracy.

Poniżej prezentowane jest spełnienie wymagań dotyczących modelowania pętli:

16. Elementy pętli są pobudzane poprzez zmianę statusu obiektu Kubernetes.
17. Dowolna koordynacja pracy pętli jest możliwa poprzez odpowiednią implementację

- wejściowego agenta translacji. Jeśli jego serwer HTTP umożliwia aktywowanie pętli z zewnątrz, nic nie stoi na przeszkodzie, aby jedna pętla mogła uruchomić inną.
18. Wymaganie spełnione poprzez implementacje elementów jako obiekty Kubernetes.
  19. Operator elementu może używać akcji typu `send` do komunikacji z komponentem zewnętrznym za pomocą protokołu HTTP. Ponadto posiada mechanizm przechowywania danych, umożliwiający zapis wyników operacji.
  20. Obiekt notacji LupN wskazujący następny komponent pętli pozwala na definiowanie wielu odbiorców. Kolejny komponent może być innym elementem pętli lub dowolnym serwerem HTTP, zwłaszcza należącym do środowiska zewnętrznego.
  21. Obiekt notacji LupN opisujący wnętrze elementu zawiera łańcuch akcji, które stanowią jego wewnętrzne workflow. Pozwala ono sterować przebiegiem pętli za pomocą akcji typu `switch`.
  22. Operator elementu posiada interpreter akcji, co pozwala na elastyczność.
  23. Modelowanie pętli odbywa się w notacji LupN, której specyfikacja znajduje się w dalszej części pracy.
  24. Kod notacji LupN jest oparty na obiektach YAML i charakteryzuje się prostą składnią, łatwą do przyswojenia.
  25. Możliwa jest implementacja narzędzia umożliwiającego konwersję modeli graficznych na kod LupN.
  26. Architektura definiuje komponenty zwane Agentami Translacji, które zapewniają zgodność ze środowiskiem zewnętrznym.

Z uwagi na fakt, że warstwa sterowania Kubernetes nie działa w czasie rzeczywistym, zamknięte pętle sterowania implementowane na platformie również nie będą działały w ten sposób. Pętle sterowania wymagające operacji w czasie rzeczywistym nie należą do domeny zarządzania, lecz są częścią mechanizmów automatyzacji implementowanych bezpośrednio w elementach sieciowych. W takich przypadkach decyzje są podejmowane lokalnie, bez udziału systemów nadzorczych.

### 3.3. Pojęcia i zasady

#### 3.3.1. Wstęp

Niniejszy rozdział dokumentuje **Lupus**, przedstawiając kluczowe pojęcia, koncepcje i zasady, które zostały zdefiniowane na potrzeby jego architektury. Stanowią one punkt wyjścia zarówno do dalszej specyfikacji systemu, jak i zrozumienia jego struktury.

Rozdział zawiera liczne odnośniki do definicji zamieszczonych w załącznikach, dlatego nie wszystkie pojęcia są wyjaśniane bezpośrednio w tej sekcji.

#### 3.3.2. Problem zarządzania

W rzeczywistym świecie często napotkamy sytuacje, w których stała regulacja pracy systemu byłaby pożądana. Na przykład:

- chcielibyśmy, aby samochody miały funkcję regulującą pracę silnika w celu utrzymania stałej prędkości,

### 3. Architektura

---

- przydałoby się, gdyby lodówka mogła utrzymywać chłodną, ale nie ujemną temperaturę, niezależnie od tego, jak często otwierane są drzwi lub jaka jest temperatura na zewnątrz,
- byłoby korzystne, gdyby serwer w chmurze mógł zagwarantować, że aplikacja z wystarczającymi zasobami do pokrycia potrzeb użytkowników będzie uruchomiona i działała.

Problemy wymienione powyżej można traktować jako **problemy zarządzania** (ang. *management problems*). Nazwa ta wynika z faktu, że nie istnieją techniczne ograniczenia uniemożliwiające osiągnięcie tych celów – wszystkie wymienione systemy są wyposażone w odpowiednie mechanizmy. Na przykład: możemy dodać więcej paliwa do silnika lub dostarczyć więcej mocy do sprężarki w lodówce. Problem leży w faktycznym wykonaniu tych czynności w odpowiednich momentach. Na przykład: zwiększenie dawki paliwa, gdy pojazd zwalnia lub dostarczenie większej mocy, gdy temperatura w lodówce wzrasta. Dlatego, jest to kwestia czysto zarządzania.

Systemem, którym chcemy zarządzać, nazywamy **System Zarządzany** (ang. *managed system*).

#### 3.3.3. System Sterowania

**System Sterowania** (ang. *Control System*<sup>17</sup>) to system, który reguluje pracę **Systemu Zarządzanego**. Przykładem takiemu systemu może być:

- tempomat, który reguluje pracę silnika w celu utrzymania stałej prędkości,
- lodówka, która reguluje pracę sprężarki w celu utrzymania stałej, chłodnej temperatury,
- Kubernetes, który reguluje liczbę działających Podów, aby utrzymać pożądaną dostępność aplikacji.

Innymi słowy, **System Sterowania** rozwiązuje **Problem Zarządzania**.

#### 3.3.4. Pętla Sterowania

Ogólną architekturą **Systemów Sterowania** używaną do rozwiązywania **Problemów Zarządzania** jest **Pętla Sterowania**.

Pętle sterowania są klasyfikowane w zależności od tego, czy wykorzystują mechanizmy sprzężenia zwrotnego (ang. *feedback mechanism*):

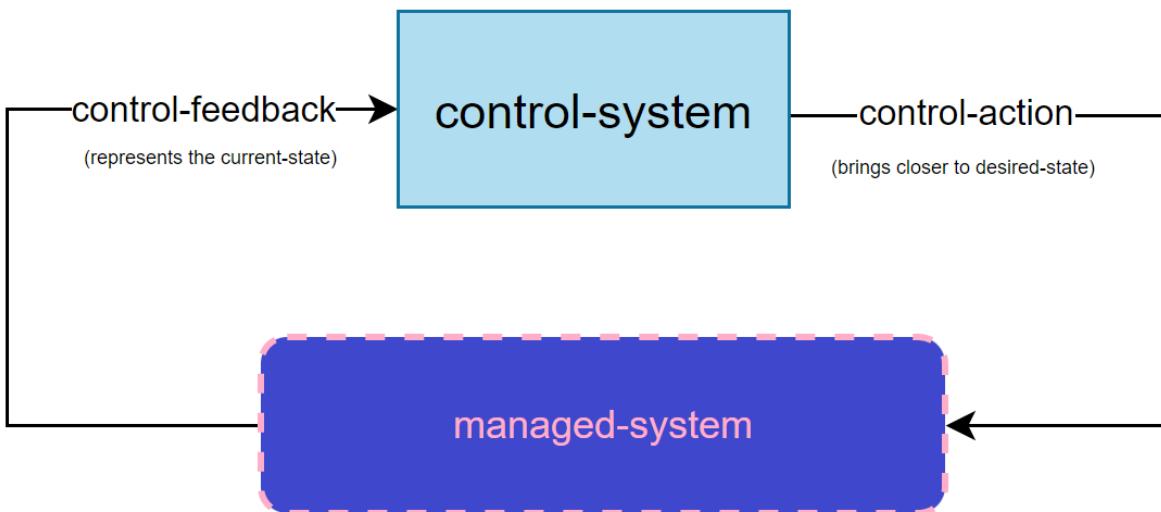
- **Otwarte Pętle Sterowania: Akcja Sterująca** (ang. *Control Action*) (czyli wejście do **Systemu Zarządzanego**) jest niezależne od wyjścia **Systemu Zarządzanego**.
- **Zamknięte Pętle Sterowania:** Wyjście **Systemu Zarządzanego** jest sprężane do wejścia **Systemu Sterowania** i wpływa na **Akcję Sterującą**.

W **Lupus** bierzemy pod uwagę wyłącznie **Zamknięte Pętle Sterowania**.

#### 3.3.5. Zamknięta Pętla Sterowania

Zamkniętą pętlą sterowania nazywamy sposób w jaki pracuje architektura Lupus (rys. 3.2).

<sup>17</sup> innym tłumaczeniem na polski jest "regulator"



Rysunek 3.2. Architektura referencyjna dla Lupus. Źródło: Opracowanie własne.

Architekturę (rys. 3.2) należy czytać, mając na uwadze następujące definicje:

- **System Sterowania** (ang. *Control System*) - system, który rozwiązuje **Problem Zarządzania** występujący w **Systemie Zarządzanym** za pomocą **Zamkniętej Pętli Sterowania**. W każdej iteracji **System Sterowania** analizuje **Sprzężenie Zwrotne** (ang. *Control Feedback*) i **wnioskuje Akcję Sterującą**.
- **Zamknięta Pętla Sterowania** - nieskończona pętla, która reguluje stan **Systemu Zarządzanego**, iteracyjnie zbliżając jego **Stan Aktualny** do **Stanu Pożądanego**.
- **Akcja Sterująca** (ang. *Control Action*) - akcja wykonywana na **Systemie Zarządzanym**, która ma na celu przybliżenie go do **Stanu Pożądanego**.
- **Sprzężenie Zwrotne** (ang. *Control Feedback*) - reprezentacja **Stanu Aktualnego** wysyłana z (odbierana od) **Systemu Zarządzanego**.

W powyższej architekturze, **Lupus** pełni rolę **Systemu Sterowania**.

### 3.3.6. Agenci Translacji

Z racji, że każdy system, bez żadnych modyfikacji (Wymaganie 15) może wejść w rolę **Systemu Zarządzanego**, potrzebujemy warstwy integracji między **Systemem Zarządzanym** a **Lupus**. Tak narodziła się koncepcja **Agentów Translacji** (ang. *Translation Agents*).

W każdym **wdrożeniu Lupus**, **Użytkownik** musi zaimplementować dwa programy będące **Agentami Translacji**.

Z punktu widzenia komunikacji, każdy **Agent Translacji** możemy zstać podzielony dwie części:

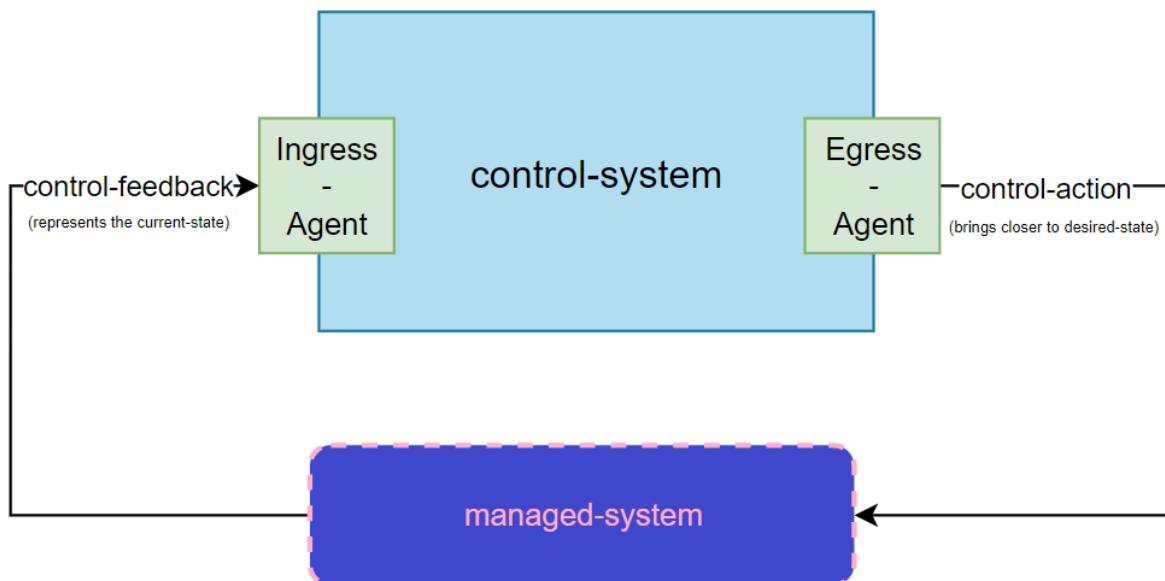
- Część komunikująca się z **Systemem Zarządzanym**. Jest zewnętrzna względem **Lupus** i nie podlega żadnej specyfikacji.
- Część komunikująca się z **Lupus**. Musi być zgodna z jednym z **Interfejsów Lupus**: **Lupin** lub **Lupout**.

zdefiniowano dwoje **Agentów Translacji**. Jednego do komunikacji przychodzącej (ang. *Ingress*) i jednego do wychodzącej (ang. *Egress*).

### 3. Architektura

W każdej iteracji pętli zadaniem **Agenta Ingress** jest odbieranie/zbieranie **Sprzężenia Zwrotnego z Systemu Zarządzanego** i translacja na format zrozumiały przez **Lupus** za pomocą **Interfejsu Lupin**. Z kolei zadaniem **Agenta Egress** jest odbieranie **Finalnych Danych** i translacja ich na **Akcję Sterującą**, która później zostaje wysłana do (lub przeprowadzona na) **Systemu Zarządzanego**.

Architektura po wprowadzeniu **Agentów Translacji** ukazana jest na rysunku 3.3.



Rysunek 3.3. Architektura referencyjna z agentami translacji. Źródło: Opracowanie własne.

Specyfikacja interfejsów **Lupin** oraz **Lupout** zawarta jest w Załączniku 4.

#### 3.3.7. Workflow pętli

Kiedy **Lupus** otrzyma **Stan Aktualny** poprzez interfejs **Lupin**, rozpoczyna się **Workflow Pętli**, które ma na celu dostarczać **Logikę Pętli** (ang. *Loop Logic*) i składa się z **Elementów Pętli** (ang. *Loop Elements*).

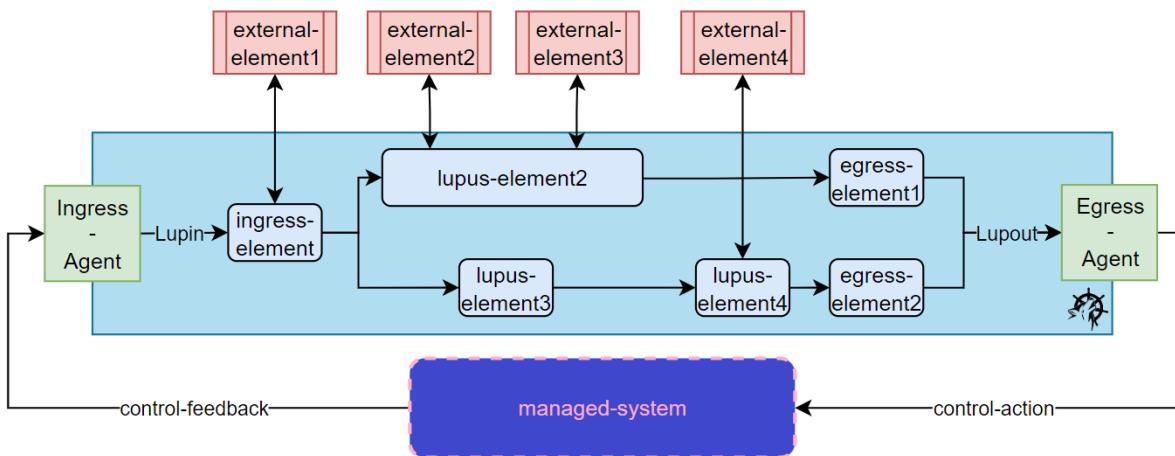
Elementem pętli może być zarówno:

- **Element Lupus**, który działa w warstwie sterowania Kubernetes, a jego misją jest wykonywać **Workflow Pętli**.
- referencja do **Elementu Zewnętrznego**, który działa poza warstwą sterowania Kubernetes, a jego misją jest wykonywać **Część Obliczeniową Logiki Pętli**.

**Workflow Pętli** jest wyrażany w **LupN**, specjalnej notacji do opisywania workflow pętli, której dokładna specyfikacja znajduje się w Załączniku 3.

Przykładowe **Workflow Pętli** pokazano na rysunku 3.4.

- Niebieskie, zaokrąglone prostokąty reprezentują **Elementy Lupus**.
- Czerwone prostokąty oznaczają **Elementy Zewnętrzne**.
- Niebieski obszar wyznaczony linią przerywaną wskazuje elementy działające w warstwie sterowania Kubernetes.
- Wyróżniono **Elementy Lupus** odpowiedzialne za **Ingress** i **Egress**.



Rysunek 3.4. Przykładowe workflow pętli. Źródło: Opracowanie własne.

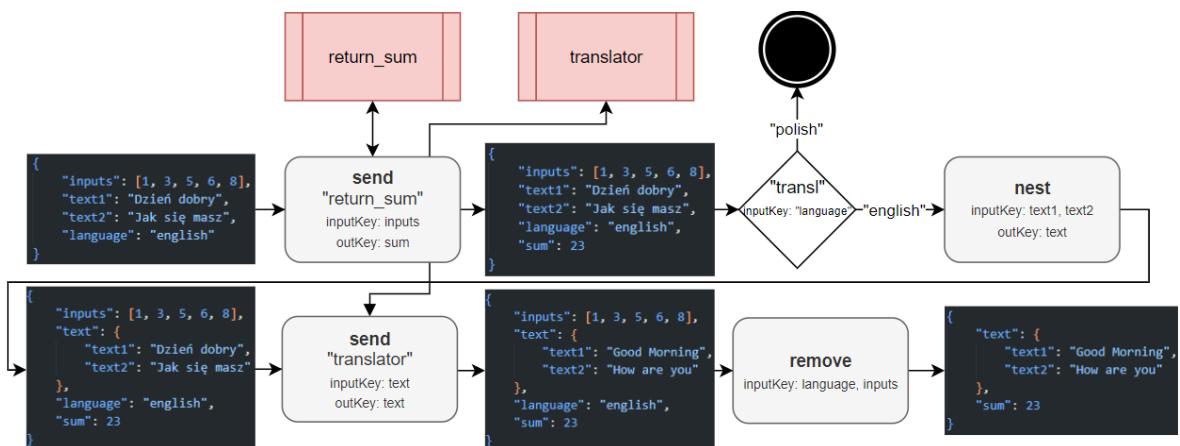
**Elementy Zewnętrzne** to zazwyczaj serwery HTTP (w szczególności serwery **Open Policy Agent**).

Jeden **Element Lupus** może komunikować się z żadnym, jednym lub wieloma **Elementami Zewnętrznymi**, a liczba ta może się różnić w każdej iteracji pętli.

### 3.3.8. Dane i Akcje

**Dane** (ang. *data*) to nośnik informacji w ramach jednej iteracji pętli w formacie JSON. Na wejściu **Elementu Ingress** reprezentują one **Stan Aktualny Systemu Zarządzanego**. Następnie, w trakcie iteracji pętli, **Projektant** decyduje, jakie informacje będą przenosić. Zazwyczaj są to informacje związane z **Logiką Pętli**, takie jak wejścia (ang. *inputs*) do **Elementów Zewnętrznych** oraz ich odpowiedzi. Na końcu iteracji, gdy **Dane** trafiają do **Agenta Egress**, muszą reprezentować **Akcję Sterowania**.

Działanie pojedynczego **Elementu Lupus** jest opisane poprzez **Workflow Akcji**. **Akcje** wykonują różne operacje na **Danych**. Istnieje wiele rodzajów akcji, a kluczowym jest "Send", który pozwala komunikować się **Elementowi Lupus** z **Elementem Zewnętrznym**. Inne typy akcji służą organizacji danych lub sterują przepływem danego przebiegu pętli.



Rysunek 3.5. Przykładowe workflow akcji. Źródło: Opracowanie własne.

### 3. Architektura

---

Pełna specyfikacja **Danych** znajduje się w Załączniku 5, zaś pełna specyfikacja **Akcji** w Załączniku 6.

#### 3.3.9. Open Policy Agent

**Open Policy Agent** (OPA) to otwartoźródłowe narzędzie przeznaczone do definiowania, egzekwowania i zarządzania politykami w systemach oprogramowania. Systemy informatyczne odpytują serwery **OPA** podczas wykonywania operacji, które wymagają decyzji (np. decyzji dostępu, konfiguracji czy zachowania aplikacji). Dzięki takiemu podejściu można oddzielić logikę podejmowania decyzji od kodu aplikacji, co zwiększa modularność, wprowadza centralny punkt zarządzania politykami oraz ułatwia utrzymanie systemów.

Polityki w **OPA** definiowane są w języku Rego. Jest to deklaratywny język stworzony specjalnie na potrzeby **OPA**. Pozwala na tworzenie złożonych reguł i logiki decyzji. Oficjalna strona projektu dostępna jest pod linkiem: <https://www.openpolicyagent.org>.

**Listing 1. Przykładowy kod rego**

```
allow {  
    input.user.role == "admin"  
}  
  
allow {  
    input.user.role == "user"  
    input.action == "read"  
}
```

**Open Policy Agent** jest rekomendowanym **Elementem Zewnętrzny** dla **Lupus** do wyrażania polityk.

#### 3.4. Instrukcja Użycia

Niniejszy podrozdział prezentuje krótką instrukcję użycia platformy **Lupus**. **Użytkownikiem Lupus** może stać się dowolna organizacja bądź pojedyncza osoba. Istotnym jest, aby zespół **Użytkownika** posiadał kompetencje z zakresu tworzenia oprogramowania. W zespole **Użytkownika** wyróżniamy rolę **Projektanta**, który jest odpowiedzialny jedynie za projektowanie i wyrażanie **Workflow Pętli** oraz niekoniecznie – zgodnie z Wymaganiem 12 – musi posiadać umiejętności techniczne.

Kiedy dany **Użytkownik** planuje użyć **Lupus** jako **Systemu Sterowania** do rozwiązywania **Problemu Zarządzania** w swoim **Systemie Zarządzanym**, powinien:

1. Zainstalować **Lupus** w swoim klastrze Kubernetes.
2. Zintegrować **System Zarządzany** z platformą **Lupus** poprzez implementację **Agentów Translacji**.
3. Zaplanować **Workflow Pętli**.
4. Przygotować **Elementy Zewnętrzne**.
5. Wyrazić **Workflow Pętli** w **LupN**.
6. Zaaplikować pliki manifestacyjne zawierające kod **LupN** w klastrze.

Podjęcie przez użytkownika takich akcji nazywamy pojedynczym **Wdrożeniem Lupus**.

#### 3.4.1. Instalacja Lupus

**Lupus** jest zaimplementowany jako *Zasoby Własne* (ang. *Custom Resources*) w Kuberne-tes. Instalacja polega na zainstalowaniu tych zasobów w swoim klastrze.

Pełna dokumentacja tego procesu znajduje się w Załączniku 2.

#### 3.4.2. Implementacja Agentów Translacji

To **Użytkownik** podczas **Wdrożenia** jest odpowiedzialny za implementację **Agentów Translacji**. Tylko **Użytkownik** zna specyfikę swojego **Systemu Zarządzanego**. Stąd w ze-spole **Użytkownika** potrzebne są umiejętności programistyczne.

Podczas implementacji należy kierować się specyfikacją **Interfejsów Lupus** zawartą w Załączniku 4.

#### 3.4.3. Planowanie Logiki Pętli

**Workflow Pętli** powinno wyrazić **Logikę Pętli**, czyli w każdej iteracji doprowadzać **System Zarządzany** do **Stanu Pożądanego**. **Użytkownik** w tym kroku jedynie modeluje wysokopoziomowo **Workflow Pętli**, rysując np. jego diagram. Dopiero takie spojrzenie podpowie **Użytkownikowi**, jakich **Elementów Zewnętrznych** potrzebuje.

#### 3.4.4. Przygotowanie Elementów Zewnętrznych

**Elementem Zewnętrznym** może być dowolne oprogramowanie, które **Projektant** ma chęć włączyć w **Workflow Pętli**. Mogą to być już gotowe systemy (np. sztucznej inteligencji), ale również dobrze **Użytkownik** może stworzyć oprogramowanie samodzielnie. Ważne jest to, aby wystawały one jakiś sposób komunikacji. Na razie jedynym wspieranym przez **Lupus** sposobem jest komunikacja HTTP. **Użytkownik** musi umożliwić więc komunikację tego typu.

Rekomendowanym przez **Lupus** typem **Elementu Zewnętrznego** jest serwer **Open Policy Agent**. Przygotowanie w tym wypadku polega na uruchomieniu takiego serwera oraz wgraniu mu odpowiednich polityk. **Użytkownik** jednakże może wydewelopować dowolny serwer HTTP.

Ostatnim możliwym **Elementem Zewnętrznym** są **Funkcje Użytkownika**. Są to funkcje w kodzie *kontrolera* zasobu **Lupus Element**, które są definiowane przez **Użytkownika**. Stanowią one alternatywę dla serwerów HTTP, gdy specjalne wdrażanie takowych może się okazać zbyt kosztowne. Przykładowo, jeśli logika wykonywana przez dany **Element Zewnętrzny** miałaby mieć tylko kilka linijek kodu, dużo łatwiej użyć **Funkcji Użytkownika**, których dokładniejszy opis znajduje się w podrozdziale 4.3.6.

#### 3.4.5. Wyrażenie workflow pętli

Gdy już całe **Workflow Pętli** oraz **Elementy Zewnętrzne** są gotowe, czas wyrazić je w notacji **LupN**. Za jej pomocą wyraża się **Workflow Pętli** jako zbiór **Elementów Lupus**, połączenia między nimi oraz specyfikacja każdego z nich. Dokumentacja notacji Lupn znajduje się w Załączniku 3.

#### 3.4.6. Aplikacja plików manifestacyjnych

Aby stworzyć pętlę opisaną przez **Kod LupN**, należy wykonać komendę z listingu 2, która tworzy instancję *obiektu API* typu **Master**. Kontroler tego zasobu stworzy odpowiednio obiekty API typu **Element** według specyfikacji w pliku **LupN**. Podczas iteracji pętli, kontroler każdego **Elementu** interpretuje ich specyfikację, wykonując odpowiednie **Akcje na Danych**. **Workflow Akcji** również specyfikowane jest w notacji **LupN** (Załącznik 3).

**Listing 2.** Stworzenie zasobu *Master*

```
kubectl apply -f <nazwa_pliku>
```

## 4. Implementacja

### 4.1. Wstęp

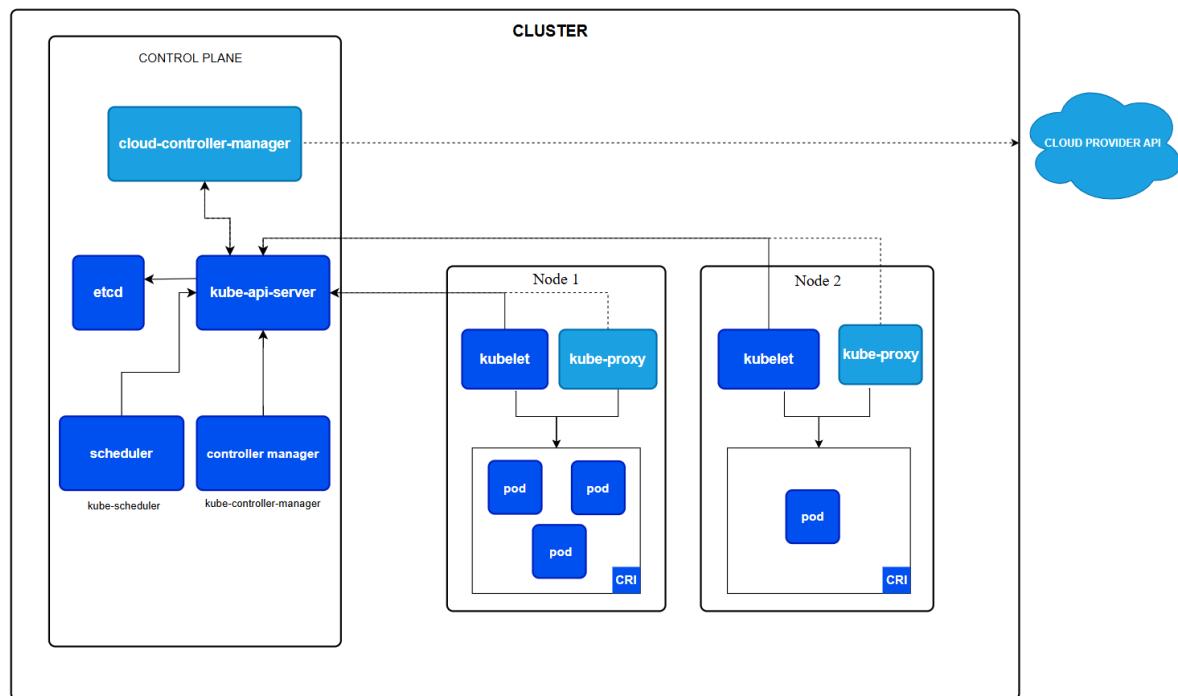
Rozdział ten opisuje przykładową implementację Luples. Pierwsza część rozdziału opisuje kluczowe mechanizmy Kubernetes, wykorzystane przy implementacji Luples. Druga część przedstawia decyzje podjęte podczas tego procesu.

### 4.2. Mechanizmy Kubernetes stojące za Luples

Niniejsza praca zakłada znajomość czytelnika platformy Kubernetes na podstawowym poziomie.

#### 4.2.1. Kontroler

Działanie Kubernetes opiera się na zamkniętej pętli sterowania<sup>18</sup>. **Aktualny Stan** systemu zapisany jest w bazie etcd. **Stan Pożądany** wyrażony jest poprzez pliki manifestacyjne. Każdy *Obiekt API* posiada swoją sekcję spec, która określa jego pożądany stan. Każdy obiekt ma swój kontroler, który rekoncyliuje aktualny stan do stanu pożądanego. Kontroler jest to proces działający w warstwie sterowania Kubernetes. Każdy typ (ang. *Kind*) wbudowanych zasobów (ang. *built-in resources*) posiada kontroler opracowany przez zespół Kubernetes. Kontrolery każdego typu zasobu działają w podzie kube-controller-manager.



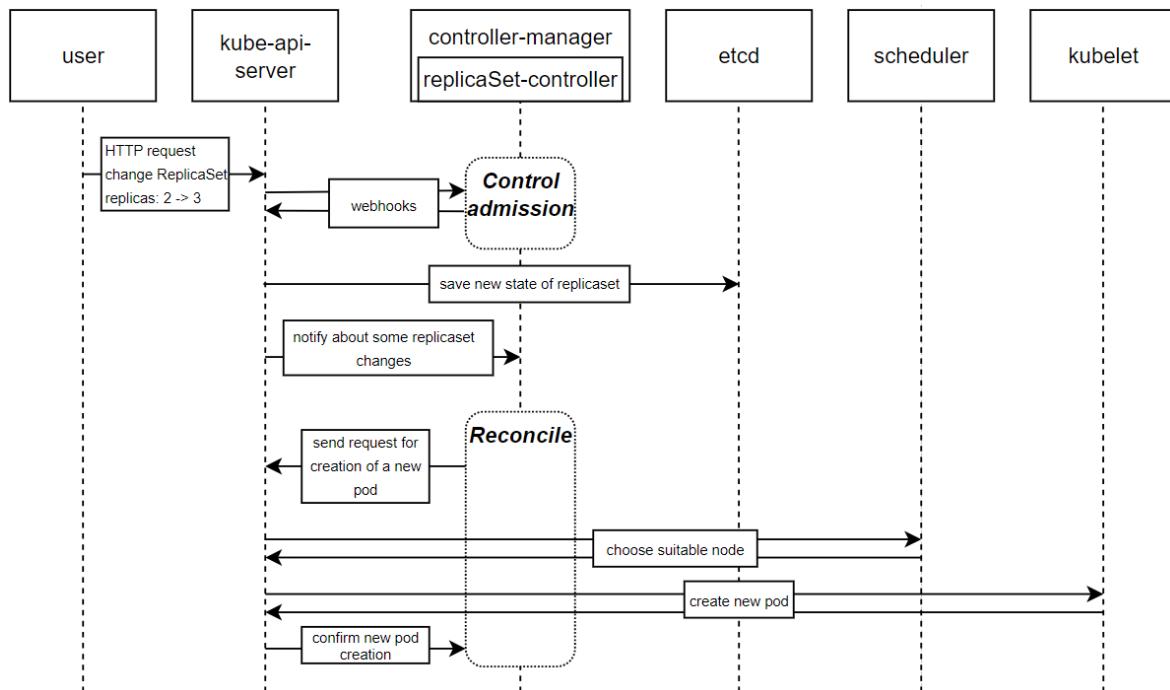
**Rysunek 4.1.** Architektura Kubernetes. Źródło: <https://kubernetes.io/docs/concepts/architecture/>

Przepływ pracy kontrolera pokazano na rysunku 4.2. Gdy kube-api-server otrzymuje żądanie zmiany danego obiektu API, zanim zleci jego utrwalenie w bazie etcd, wykonuje

<sup>18</sup><https://kubernetes.io/docs/concepts/architecture/controller/>

## 4. Implementacja

tzw. webhooki do kontrolera danego obiektu. Webhooki nie są jednakże istotne z punktu widzenia niniejszej pracy dyplomowej. Po dokonaniu zmian w obiekcie kontroler zostaje o nich poinformowany. Jego głównym zadaniem jest rekonyliacja, czyli porównanie aktualnego stanu obiektu ze stanem pożądany. Kontroler zawiera logikę rekonyliacyjną, która dąży do doprowadzenia stanu aktualnego do stanu pożądanego. Realizacja logiki rekonyliacji często wiąże się z wykonywaniem różnych akcji w innych częściach klastra, takich jak skalowanie zasobów, tworzenie nowych instancji lub modyfikacja konfiguracji.



Rysunek 4.2. Flow pracy kontrolera. Źródło: Opracowanie własne.

### 4.2.2. Zasoby własne

*Zasoby własne* (ang. *Custom Resources*) rozszerzają zasoby wbudowane (ang. *built-in resources*) o niestandardowe typy, zdefiniowane przez użytkownika. Najczęściej tworzone są w celu zarządzania konfiguracją skomplikowanych lub stanowych aplikacji, tam gdzie wbudowane typy zasobów, takie jak Pody, Wdrożenia (Deployments) czy Serwisy (Services), nie są wystarczające. Aby utworzyć nowy typ zasobu, należy:

1. Zdefiniować plik manifestacyjny YAML typu Custom Resource Definition (CRD).
2. Zaaplikować CRD w klastrze Kubernetes.

Po pomyślnym dodaniu definicji możliwe jest tworzenie obiektów nowego typu, które będą zarządzane przez Kubernetes w taki sam sposób jak zasoby wbudowane.

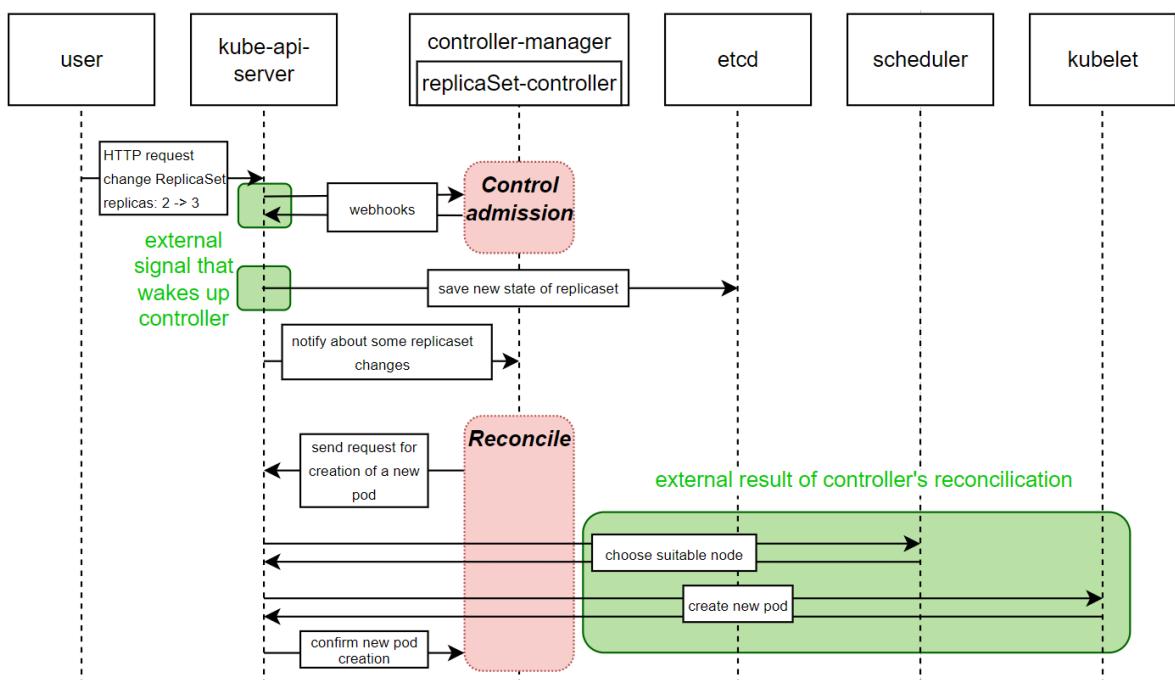
### 4.2.3. Operatory

Operator to kolejny mechanizm rozszerzania Kubernetes. Kiedy tworzymy Zasoby Właśnie (ang. *Custom Resources*), możemy również implementować dla nich kontrolery. Takie podejście nazywane jest "wzorem operatora" ("operator-pattern"). Nazwa ta wynika z faktu,

że operator pełni funkcję automatycznego zarządcy, zastępując człowieka, który w przeciwnym razie musiałby ręcznie zarządzać wdrożeniem i konfiguracją aplikacji wymagającej Zasobów Własnych. Luples wykorzystuje Zasoby Własne w celu reprezentacji zewnętrznego bytu, nie skomplikowanej aplikacji.

#### 4.2.4. Kubebuilder

Kubebuilder jest frameworkm programistycznym do tworzenia *Zasobów Własnych* oraz ich *Operatorów*. Pozwala zaprogramować sekcje przepływu pracy kontrolera zaznaczone na rysunku 4.3 jasno czerwonym kolorem.



**Rysunek 4.3.** Zaznaczenie możliwych do zaprogramowania elementów flow pracy kontrolera.  
Źródło: Opracowanie własne.

### 4.3. Decyzje podjęte podczas implementacji

#### 4.3.1. Wstęp

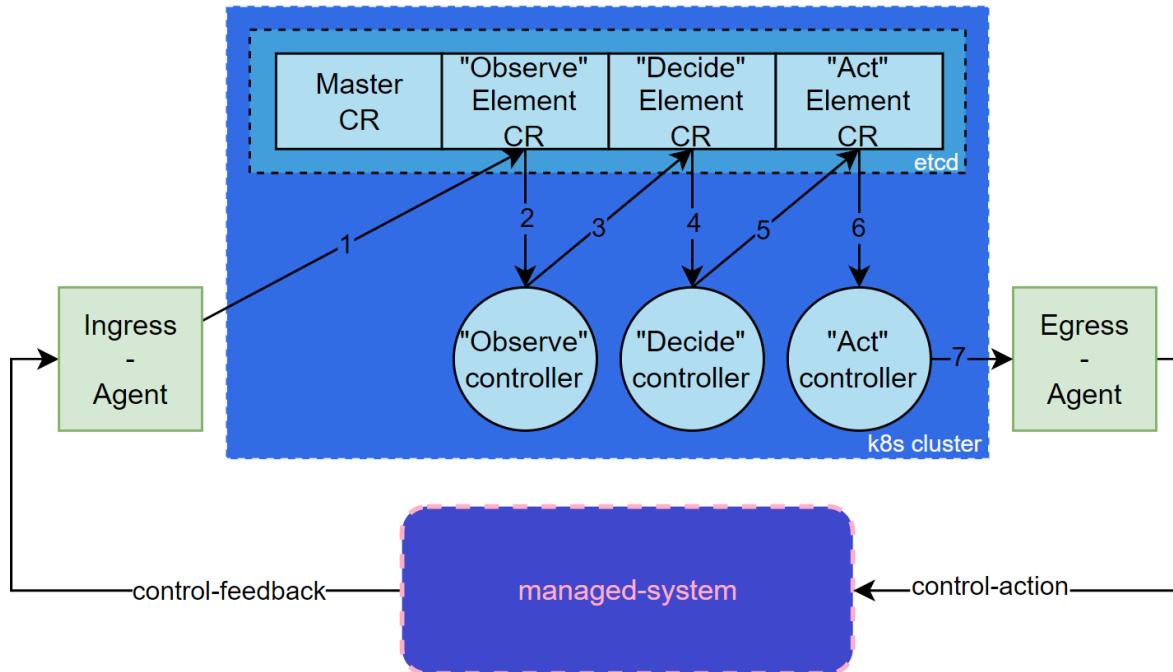
Podczas realizacji projektu zbadano różne podejścia i rozwiązano liczne problemy implementacyjne, aby wdrożyć architekturę opisaną w rozdziale trzecim. Każdy podrozdział omawia po jednym z aspektów – od wymagań do implementacji.

#### 4.3.2. Komunikacja pomiędzy Elementami Luples

Pierwszym krokiem w implementacji było wymyślenie sposobu na komunikację pomiędzy **Elementami Luples**. Z racji, że **Elementy Luples** są *Zasobami Własnymi*, wykorzystano tu natywne mechanizmy Kubernetes opisane w podrozdziałach 4.2 i 4.3. Ideą było to, że *Operator jednego elementu dokonuje zmian w obiekcie API innego elementu, co wywoła ponownie Operator elementu ale z innym obiektem wejściowym*. **Elementy Luples** modyfi-

## 4. Implementacja

kującą nawzajem swój Status, a dokładniej jego pole `input`, przekazując tam swoją **finalną postać danych**.



Rysunek 4.4. Komunikacja pomiędzy Elementami Lupus. Źródło: Opracowanie własne.

Sposób działania został ukazany na rysunku 4.4. Początkowo **Elementy Lupus** mogły przyjąć postać jednego z trzech typów: Observe, Decide lub Act<sup>19</sup>. **Agent Ingress** modyfikował Status obiektu Observe (krok 1), co wywoływało operator elementu Observe (krok 2). Operator Observe modyfikował Status obiektu Decide (krok 3). Na koniec modyfikacje otrzymywał obiekt elementu Act (krok 5), którego Operator przekazywał swoje **Dane** do **Agenta Egress** (krok 7).

Z czasem jednak, aby nie narzucać konkretnej struktury pętli, zrezygnowano z trzech typów i stworzono jeden uniwersalny typ, którego Operator jest w stanie wykonać **Workflow Akcji**, co pozwalało na wyrażenie logiki dowolnego z 3 poprzednich typów. W ten sposób spełniono Wymaganie 10.

### 4.3.3. Dane

Wymaganie 10 nakazuje, aby **Elementy Lupus** były sterowane danymi (*data-driven*). **Dane** oraz **Workflow Akcji** spełniają to wymaganie. Dzięki nim **Elementy Lupus** mogą wykonać dowolny zestaw **Akcji na Danych**, dając **Projektantowi** pewną elastyczność. To właśnie **Dane** przekazywane są jako pole `input` w statusie obiektu API **Elementu Lupus**.

Z racji uniwersalności **Danych**, należało wybrać format, który pozwoli na ich możliwie dużą dowolność. Wybór padł na JSON, ze względu na jego ogólnie przyjęty standard i możliwości reprezentacji dowolnej struktury danych.

Kubernetes z kolei wymaga, aby pola umieszczane w Statusie Zasobu miały konkretny typ. Dokonano więc analizy, jaki typ nadaje się do reprezentacji obiektu JSON. Wybór

<sup>19</sup>W myśl okojonej pętli OODA

padł na RawExtension. Jest to typ zdefiniowany przez zespół Kubernetes, używany do obsługi dowolnych surowych danych w formacie JSON lub YAML. Należy do pakietu k8s.io/apimachinery/pkg/runtime i jest często stosowany, gdy zasób musi osadzić lub pracować ze strukturą danych, która jest elastyczna, ale jednocześnie uporządkowana. RawExtension spełnia te wymagania.

**Listing 3.** Definicja struktury Go reprezentującej status Elementu Lupus

```
// ElementStatus defines the observed state of Element
type ElementStatus struct {
    // Input contains operational data
    Input runtime.RawExtension `json:"input"`
    // Timestamp of the last update
    LastUpdated metav1.Time `json:"lastUpdated"`
}
```

RawExtension to typ, którego użyjemy do przenoszenia **Danych** między **Elementami Lupus**. Pozostaje kwestia reprezentacji tych **Danych** w Operatorach **Lupus**.

**Listing 4.** Definicja struktury Go RawExtension w paczce k8s.io/apimachinery/pkg/runtime

```
type RawExtension struct {
    Raw []byte `json:"-"` // Serialized JSON or YAML data
    Object Object `json:"object"` // A runtime.Object representation
}
```

Zamierzonym celem RawExtension według deweloperów Kubernetes jest umożliwienie deserializacji do określonej, znanej struktury. Jednak ze względu na Wymaganie 10 taka struktura nie istnieje. Potrzebujemy więc natywnej struktury Go, która jest w stanie reprezentować dowolny obiekt JSON. Pierwszym pomysłem, który się nasuwa, jest użycie typu Go interface, ponieważ może on reprezentować dowolne dane. Problem z interface polega jednak na tym, że nie można na nim operować – nie udostępnia żadnego interfejsu do interakcji. Jest to typ podstawowy.

Drugim pomysłem na reprezentację JSON-a było użycie map[string] interface, ponieważ większość instancji JSON-a to faktycznie obiekty klucz-wartość. Klucze w tym przypadku są typu string, a wartości mogą być dowolne (stąd użycie interface) w Go. W większości przypadków obiekty JSON zawierają kilka głównych pól (ang. *top-level fields*), co idealnie pasuje do reprezentacji map[string] interface.

Tak właśnie narodziło się pojęcie **Danych. Dane** to w rzeczywistości struktura opakowująca i dającą odpowiedni interfejs (ang. *Wrapper*) dla wspomnianej wcześniej mapy.

**Listing 5.** Definicja struktury Go dla **Danych**

```
type Data struct {
    Body map[string]interface{}}
```

Ta struktura posiada bogaty zestaw funkcji (metod), które pełnią rolę interfejsu do pracy z **Danymi**. Metody te są wywoływanie podczas wykonywania **Akcji** i zazwyczaj – z wyjątkiem metod Get i Set – każda metoda odpowiada dokładnie jednej akcji. Kluczowym konceptem **Danych** jest **Pole Danych** (ang. *Data-field*). Jest ono odpowiednikiem pola w JSON-ie. Każde pole jest identyfikowane przez swój **Klucz** i przechowuje wartość. Za pomocą metody Get możemy pobrać wartość znajdująca się pod danym kluczem, a przy użyciu Set możemy ustawić nową wartość dla pola wskazanego określonym kluczem.

Nie obejmuje to jednak wszystkich obiektów JSON, jakie istnieją. JSON pozwala, aby element na najwyższym poziomie był tablicą. Nakłada to pewne ograniczenia na projektowanie pętli. Szczególnie JSON reprezentujący aktualny stan **Systemu Zarządzanego**, wysyłany przez **Interfejs Lupin**, musi być serializowalny do `map[string]` interface. Oznacza to, że nie może być:

- typem prymitywnym,
- tablicą,
- obiektem JSON z kluczami innymi niż `string`.

Warto zaznaczyć, że nazwa „Dane” nawiązuje do definicji przedstawionej we wstępie historycznym. Dopiero komponenty zewnętrzne względem platformy LUPUS, czyli elementy systemu zarządzania wyposażone w mechanizmy sztucznej inteligencji, będą przekształcać dane pochodzące z systemu zarządzanego w informacje lub wiedzę.

Dla platformy, która pełni jedynie funkcję orkiestratora workflow pętli sterowania, dane pozostają transparentne. Nazwa „Dane” podkreśla ich surową formę, wskazując, że platforma nie dokonuje ich interpretacji ani przetwarzania.

### 4.3.4. Polimorfizm w Go

Notacja **LupN** pozwala, aby wiele jej obiektów posiadało swój typ. Przykładowo akcje są różnorakiego typu. Mają pewną część wspólną, ale też pola szczegółowe dla każdego typu. Go jest statycznie typowanym językiem, który nie posiada dziedziczenia ani tradycyjnego obiektowego polimorfizmu. Dlatego dokonano analizy jak w Go osiągnąć tę wielopostraciowość.

#### Polimorfizm poprzez interfejsy

Natynym sposobem na polimorfizm w Go jest ten osiągany poprzez interfejsy. To zagadnienie najlepiej tłumaczy poniższy kod.

**Listing 6.** Przykład polimorfizmu poprzez interfejsy

```
package main

import (
    "fmt"
)

type Forwarder interface {
    Forward() string
}
```

```

}

type NextElement struct {
    Name string
}

func (e *NextElement) Forward() string {
    return fmt.Sprintf("Forwarding_to_element:_%s", e.Name)
}

type Destination struct {
    URL string
}

func (d *Destination) Forward() string {
    return fmt.Sprintf("Forwarding_to_destination:_%s", d.URL)
}

func ProcessForwarder(f Forwarder) {
    fmt.Println(f.Forward())
}

func main() {
    element := &NextElement{Name: "Element1"}
    destination := &Destination{URL: "https://example.com"}

    ProcessForwarder(element)
    ProcessForwarder(destination)
}

```

### Schemat działania

- **Definicja interfejsu:** Forwarder definiuje metodę Forward(), którą muszą zaimplementować określone typy.
- **Konkretne implementacje:** NextElement oraz Destination implementują metodę Forward().
- **Zastosowanie:** Każdy typ spełniający interfejs Forwarder może być przekazywany do funkcji oczekujących obiektu Forwarder.

### Polimorfizm poprzez wskaźniki oraz pole dyskryminatora

Kolejnym potężnym i idiomatycznym wzorcem w Go jest **polimorfizm w stylu Go z użyciem wskaźników**, gdzie struktura posiada opcjonalne pola wskaźnikowe, a pole type (dyskryminator) określa, które z tych pól jest istotne w czasie działania programu.

**Listing 7.** Przykład polimorfizmu poprzez wskaźniki oraz pole dyskryminatora

```

type Next struct {
    // Type specifies the type of next loop-element
    Type string ‘json:"type"’
    // List of input keys (Data fields) that have to be forwarded
    Keys []string ‘json:"keys"’
    // One of the fields below is not null
    Element *NextElement ‘json:"element",omitempty"’
    Destination *Destination ‘json:"destination",omitempty"’
}

type NextElement struct {
    Name string ‘json:"name"’
}

type Destination struct {
    URL string ‘json:"url"’
}

func (n *Next) Validate() error {
    if n.Type == "element" && n.Element == nil {
        return fmt.Errorf("Element_must_be_set
for_type_element")
    }
    if n.Type == "destination" && n.Destination == nil {
        return fmt.Errorf("Destination_must_be_set
for_type_destination")
    }
    if n.Element != nil && n.Destination != nil {
        return fmt.Errorf("Only_one_of_Element
or_Destination_can_be_set")
    }
    return nil
}

```

### Schemat działania

**Unia tagowana** to wzorzec, w którym pole tag określa, którą z kilku możliwych reprezentacji danych wykorzystuje dany obiekt. W Go jest to realizowane poprzez kombinację:

- Pole dyskryminujące typ (np. `Type string`).
- Pola wskaźnikowe dla możliwych wariantów. Jeśli dane pole nie występuje w aktualnej reprezentacji obiektu, jego wartość jest po prostu `nil`.
- Podczas działania programu możemy zweryfikować, której reprezentacji danych używa obiekt, i odpowiednio na tej podstawie podjąć działanie.

Podczas działania programu możemy zweryfikować, której reprezentacji danych używa obiekt, i odpowiednio na tej podstawie podjąć działanie.

### **Porównanie**

Porównanie zostało przedstawione w tabeli 4.1

Funkcja	Polimorfizm przez wskaźniki	Polimorfizm przez interfejsy
<b>Zachowanie w czasie działania</b>	Używa dyskryminatora (Type) i pól wskaźnikowych	Używa implementacji metod do polimorfizmu
<b>Bezpieczeństwo typów</b>	Wymaga jawniej walidacji	Wymuszane podczas komplikacji za pomocą interfejsów
<b>Serializacja</b>	Bezproblemowa z JSON	Może wymagać niestandardowego marshaling
<b>Rozszerzalność</b>	Dodaj nowe pola wskaźnikowe i zaktualizuj enum Type	Dodaj nowe typy implementujące interfejs
<b>Łatwość użycia</b>	Prosta, ale wymaga ręcznej walidacji	Czysta i idiomatyczna w Go
<b>Wspólne zachowanie</b>	Wymaga zewnętrznej logiki	Enkapsulowane w metodach interfejsu

**Tabela 4.1.** Porównanie polimorfizmu przez wskaźniki i przez interfejsy w Go.

Polimorfizm przez wskaźniki oferuje przejrzystą reprezentację danych, która jest łatwo serializowana i deserializowana do formatu JSON lub YAML. Dodatkowo wspiera włączenie pola type jako części modelu danych, dzięki czemu może być ono również przechowywane lub przesyłane. Z drugiej strony polimorfizm przez interfejsy jest natywny dla Go, bardziej czytelny i zapewnia silne sprawdzanie typów podczas komplikacji.

### **Podsumowanie:**

- Polimorfizm przez wskaźniki jest preferowany w aplikacjach skoncentrowanych na danych.
- Polimorfizm przez interfejsy jest preferowany w aplikacjach skoncentrowanych na zachowaniach.

W **Lupus** polimorfizm był potrzebny do reprezentacji różnych typów (odmian) niektórych **Obiektów LupN**, takich jak **Actions** lub **Next**, dlatego wybrano polimorfizm poprzez wskaźniki oraz pole dyskryminatora.

#### **4.3.5. Dwa rodzaje workflow**

W **Lupus** występują dwa rodzaje *workflow*: **Workflow Pętli**, które definiuje przepływ pracy **Elementów Lupus**, oraz **Workflow Akcji**, które definiuje przepływ **Akcji** we wnętrzu pojedynczego elementu. Występują między nimi pewne różnice w możliwościach, wynikające ze sposobu implementacji komunikacji między ich węzłami.

- Węzły w **Workflow Pętli** komunikują się ze sobą poprzez pobudzanie operatorów.

- Węzły w **Workflow Akcji** komunikują się poprzez pamięć RAM zaalokowaną przez pojedynczy operator **Elementu Lupus**.

Różnice są widoczne w specyfikacji LupN w Załączniku 3.

### 4.3.6. Funkcje użytkownika

Zgodnie z Wymaganiem 7, **Elementy Lupus** nie wykonują **Części Obliczeniowej Logiki Pętli**. Zamiast tego, jest ona delegowana do **Elementów Zewnętrznych**.

W tym kontekście pojawiają się dwa kluczowe zagadnienia:

- Jak ma postępować **Użytkownik** w sytuacji, gdy konieczne jest wykonanie prostej operacji na Danych (np. dodanie dwóch wartości), a wdrażanie dedykowanego serwera HTTP okazuje się nieopłacalne?
- Każda platforma ramowa (ang. *framework*) powinnna być rozszerzalna.

Z tych dwóch powodów wdrożono mechanizm o nazwie „Definiowane przez użytkownika, wewnętrzne funkcje Go”, określany w skrócie jako **Funkcje Użytkownika**.

**Użytkownik** może definiować własne fragmenty kodu Go jako funkcje i wywoływać je jako jedną z **Destynacji** w akcji **Send**.

W repozytorium kodu z projektem Kubebuilder znajduję plik o nazwie `user-functions.go`<sup>20</sup>. To w nim **Użytkownik** może definiować swoje funkcje. Plik posiada jedną przykładową funkcję.

**Listing 8.** Przykładowa funkcja użytkownika

```
// Exemplary user-function. It just returns the input
func (UserFunctions) Echo(input interface{}) (interface{}, error) {
    return input, nil
}
```

Funkcja jako argument przyjmuje `interface`, który będzie reprezentował **pole danych**.<sup>21</sup> Zwracanym typem jest również `interface`, ponieważ wartość zwieracana przez element zewnętrzny zostaje wpisana do **pola danych**.

Nazwa `UserFunctions` jest strukturą, która gromadzi funkcje użytkownika.

**Listing 9.** Struktura składająca funkcje użytkownika jako swoje metody.

```
// UserFunctions struct for user-defined, internal functions
type UserFunctions struct {
```

Pojawia się zatem pytanie, jak wywołać taką funkcję w notacji **LupN**. Na szczęście funkcje w Go mogą być używane jako typy i przechowywane jako co umożliwia ich zapis w strukturze mapy klucz-wartość, gdzie nazwy funkcji (typ `string`) pełnią rolę kluczy.

**Listing 10.** Mapa przechowująca funkcje użytkownika

```
// A global map to store function references
```

<sup>20</sup><https://github.com/0x41gawor/lupus/blob/master/lupus/internal/controller/user-functions.go>

<sup>21</sup>Pola lub pól, gdyż pod tym pojęciem może też się kryć użycie "/\*"

```
var FunctionRegistry = map[string] func(input interface{}) (interface{}, error){}
```

Następnie, z pomocą biblioteki `reflect`<sup>22</sup> można zaimplementować funkcję, która iteruje po metodach struktury `UserFunctions` i zapisuje je do powyższej mapy jako wartości, dla których kluczami są nazwy funkcji.

**Listing 11.** Funkcja zapełniająca mapę funkcji użytkownika

```
// RegisterFunctions dynamically registers user-defined functions
func RegisterFunctions(target interface{}) {
    t := reflect.TypeOf(target)
    v := reflect.ValueOf(target)

    for i := 0; i < t.NumMethod(); i++ {
        method := t.Method(i)

        // Ensure the method matches the required signature
        if method.Type.NumIn() == 2 && // Receiver + input
            method.Type.NumOut() == 2 && // Output + error
            method.Type.In(1).Kind() == reflect.Interface && // Input: interface{}
            method.Type.Out(0).Kind() == reflect.Interface && // Output: interface{}
            method.Type.Out(1).Implements(reflect.TypeOf((*error)(nil)).Elem()) { // Second output: error

                funcName := method.Name
                FunctionRegistry[funcName] = func(input interface{}) (interface{}, error) {
                    // Call the user-defined function
                    result := method.Func.Call([]reflect.Value{v, reflect.ValueOf(input)})

                    // Handle result[1] (error) being nil
                    var err error
                    if !result[1].IsNil() {
                        err = result[1].Interface().(error)
                    }
                }

                return result[0].Interface(), err
            }
        }
    }
}
```

Funkcja widoczna na listingu 11 jest wywoływana podczas inicjalizacji paczki kontrolera z strukturą `UserFunctions` jako argument.

**Listing 12.** Inicjaliza mapy

```
func init() {
    // Fill in the FunctionRegistry map
    // with functions defined as a method of UserFunctions{}
    RegisterFunctions(UserFunctions{})
}
```

Od tego momentu, dana funkcja może zostać wywołana po nazwie w funkcji obsługującej akcję `Send` w interpreterze Operatora Elementu Lopus.

**Listing 13.** Wywołanie funkcji użytkownika w akcji `send`

```
func sendToGoFunc(funcName string, body interface{}) (interface{}, error) {
    if fn, exists := FunctionRegistry[funcName]; exists {
        return fn(body)
    } else {
        return nil, fmt.Errorf("no_such_UserFunction_defined")
    }
}
```

<sup>22</sup><https://pkg.go.dev/reflect>

#### 4. Implementacja

}

W notacji **LupN** wystarczy zapis:

**Listing 14.** Użycie funkcji użytkownika w LupN

```
- name: "bounce"
  type: send
  send:
    inputKey: "field1"
    destination:
      type: gofunc
      gofunc:
        name: echo
        outputKey: "field2"
```

## **5. Test platformy na emulatorze sieci 5G**

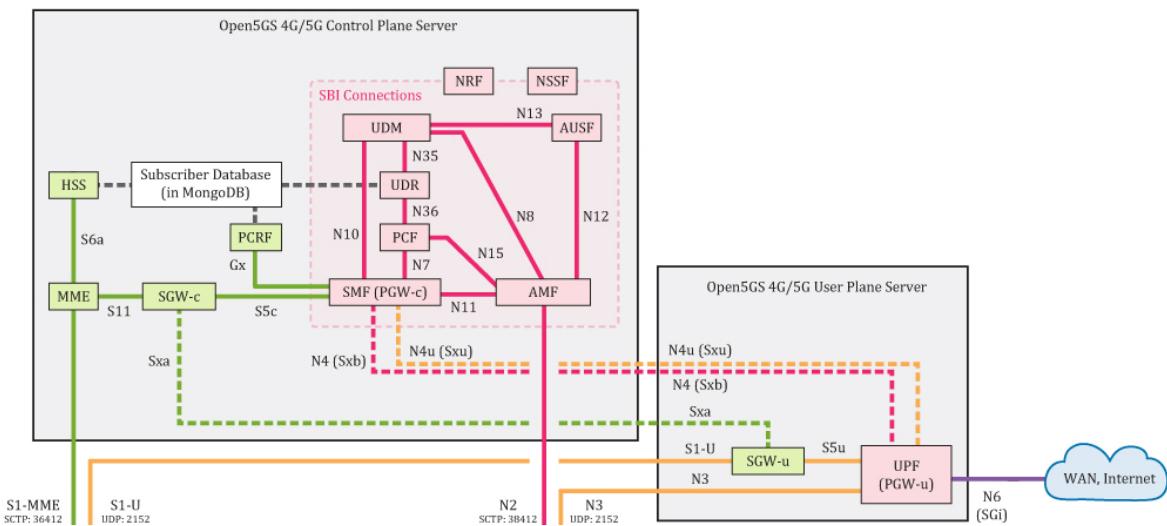
## 5.1. Wstęp

Niniejszy rozdział omawia przypadek użycia (ang. *use case*) proponowanej architektury na emulatorze sieci 5G zbudowanym przy użyciu Open5GS oraz UERANSIM. Opisuje również sam emulator sieci 5G. Następnie, prezentuje przykładowy **Problem Zarządzania** oraz zastosowanie **Lupus** w celu jego rozwiązywania. Rozdział omawia proces pojedynczego **Wdrożenia Lupus**.

## 5.2. Emulator sieci 5G

### 5.2.1. Open5GS

Pierwszym komponentem emulatora jest otwartoźródłowe oprogramowanie Open5GS. Oficjalna strona projektu znajduje się pod adresem: <https://open5gs.org/open5gs/>. Open5GS emuluje sieć rdzeniową (core network) czwartej oraz piątej generacji, zgodnie ze standardami 3GPP. Architektura tego oprogramowania została przedstawiona na Rysunku 5.1.

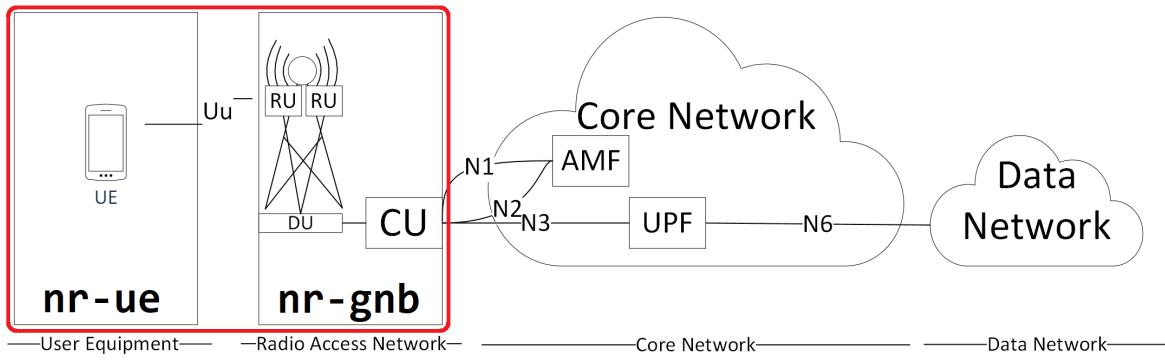


**Rysunek 5.1.** Architektura Open5GS. Źródło: Opracowanie własne na podstawie <https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/>

### 5.2.2. UERANSIM

Drugim komponentem emulatora jest otwartoźródłowe oprogramowanie UERANSIM. Oficjalna strona projektu znajduje się pod adresem: <https://github.com/aligungr/UERANSIM>. UERANSIM symuluje Radiową Sieć Dostępową (ang. *Radio Access Network (RAN)*) wraz z Terminalami Abonenta (ang. *User Equipment (UE)*). UERANSIM składa się z dwóch programów nr-ue oraz nr-gnb, które mogą działać w wielu instancjach. Ich rolę w architekturze sieci 5G przedstawiono na rysunku 5.2 w czerwonej obwódcie.

## 5. Test platformy na emulatorze sieci 5G



Rysunek 5.2. Architektura UERANSIM. Źródło: Opracowanie własne.

### 5.2.3. Wdrożenie na Kubernetes

Emulator sieci 5G złożony z Open5GS oraz UERANSIM wdrożono na klastrze Kubernetes według repozytorium: <https://github.com/niloys/hopen5gs-k8s>. Przeprowadzenie kroków wskazanych w repozytorium skutkuje stanem podów w klastrze przedstawionym na rysunku 5.3.

NAME	READY	STATUS	RESTARTS	AGE
cluster-network-addons	2/2	Running	48 (9m28s ago)	51d
cluster-network-addons	1/1	Running	26 (9m28s ago)	51d
kube-flannel	1/1	Running	25 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	24 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	24 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	24 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	24 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	24 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	29 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	24 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	30 (9m28s ago)	51d
kube-system	1/1	Running	19 (9m28s ago)	43d
open5gs	1/1	Running	23 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	31 (9m28s ago)	43d
open5gs	1/1	Running	36 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	36 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	25 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	35 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	36 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	36 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	37 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	37 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	40 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	37 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	16 (9m28s ago)	39d
open5gs	1/1	Running	13 (9m28s ago)	36d
open5gs	1/1	Running	22 (9m28s ago)	45d
open5gs	1/1	Running	21 (9m28s ago)	43d
openebs	1/1	Running	32 (9m28s ago)	51d
openebs	1/1	Running	48 (8m19s ago)	51d
openebs	1/1	Running	24 (9m28s ago)	51d

Rysunek 5.3. Stan podów w klastrze. Źródło: Opracowanie własne.

Programy UERANSIM typu nr-ue zostały uruchomione poza klastrem. Tej decyzji dokonano z prostego powodu. System operacyjny hostujący klasterek (Ubuntu 22.04 LTS) posiada dużo większe możliwości, jeśli chodzi o narzędzia generowania ruchu, niż okrojony system operacyjny użyty w podach UERANSIM.

### 5.3. Wdrożenie LUPUS

Rozdział opisuje użycie **LUPUS** jako **Systemu Sterowania dla Problemu Zarządzania** opisanego poniżej. Rolę **Systemu Zarządzanego** przyjmuje opisany w poprzednim podrozdziale emulatora sieci 5G.

#### 5.3.1. Problem Zarządzania

Celem jest utrzymanie żądanych wartości zasobów dla funkcji płaszczyzny użytkownika (ang. *User Plane Function, UPF*) na optymalnym poziomie. Optymalność oznacza zapewnienie wystarczających zasobów do obsługi obciążenia przy jednoczesnym unikaniu ich nadmiernego przydziału, co pozwala ograniczyć zbędne koszty wynajmu zasobów chmurowych.

W ramach wdrożenia Open5GS, w tym dla komponentu UPF, istnieje kilka instancji uruchomieniowych (ang. *Deployments*), jak pokazano na rysunku 5.4.

NAME	READY	UP-TO-DATE	AVAILABLE	AGE
open5gs-amf	1/1	1	1	45d
open5gs-ausf	1/1	1	1	45d
open5gs-bsf	1/1	1	1	45d
open5gs-nrf	1/1	1	1	45d
open5gs-nssf	1/1	1	1	45d
open5gs-pcf	1/1	1	1	45d
open5gs-scp	1/1	1	1	45d
open5gs-smf1	1/1	1	1	45d
open5gs-smf2	1/1	1	1	45d
open5gs-udm	1/1	1	1	45d
open5gs-udr	1/1	1	1	45d
open5gs-upf1	1/1	1	1	45d
open5gs-upf2	1/1	1	1	45d
open5gs-webui	1/1	1	1	45d
ueransim-gnb	1/1	1	1	43d

Rysunek 5.4. Wdrożenia Open5GS, w tym instancje UPF. Źródło: Opracowanie własne.

Każdy *pod* w klastrze Kubernetes posiada zdefiniowane wartości dotyczące przydziału zasobów:

- **requests** – określa ilość zasobów CPU oraz pamięci operacyjnej (RAM), jaką dany pod żąda od środowiska chmurowego. Kubernetes zapewnia, że *węzeł* posiada wystarczające zasoby, aby spełnić te wymagania przed przydzieleniem poda do *węzła*.
- **limits** – maksymalna ilość zasobów, jaką pod może zużyć. Przekroczenie tych wartości skutkuje zakończeniem procesu.

Dodatkowo, możliwe jest monitorowanie rzeczywistego (aktualnego, chwilowego) wykorzystania procesora i pamięci operacyjnej.

### Mechanizmy dostępne w Kubernetes

Kubernetes umożliwia:

- monitorowanie bieżącego zużycia CPU oraz pamięci dla konkretnego poda,
- monitorowanie zdefiniowanych wartości `requests` i `limits` dla konkretnego poda,
- aktualizację wartości `requests` i `limits` dla konkretnego poda.

Wdrożenie komponentu UPF w repozytorium open5gs-k8s wykorzystuje następujące wartości zasobów:

**Listing 15.** Konfiguracja zasobów dla UPF w Open5GS

```
resources:  
  requests:  
    memory: "256Mi"  
    cpu: "200m"  
  limits:  
    memory: "512Mi"  
    cpu: "500m"
```

Niniejsza konfiguracja jest traktowana jako punkt operacyjny (punkt pracy), który powinien być wystarczający w normalnych warunkach (np. przez 80% czasu). Jednak w sytuacjach, gdy pojedynczy pod UPF sporadycznie przekracza te wartości, konieczne jest zwiększenie dostępnych zasobów oraz proporcjonalne podniesienie limitów.

Zakłada się, że każdorazowe przekroczenie wartości operacyjnych CPU lub pamięci skutkuje przydzieleniem dodatkowych 20% zasobów dla `requests` oraz ustawieniem `limits` na poziomie dwukrotności nowej wartości `requests`.

### Przykładowa adaptacja zasobów

- Gdy zużycie CPU osiąga wartość 270m:
  - `requests` zostaje zwiększone do  $270m \times 1.2 = 324m$ ,
  - `limits` zostaje zwiększone do  $324m \times 2 = 648m$ .
- Analogiczne zasady dotyczą przydziału pamięci operacyjnej.

Jeśli rzeczywiste wykorzystanie zasobów jest znaczco niższe od wartości operacyjnej, nie jest podejmowana żadna akcja korygująca. Nadmierne skalowanie w dół skutkowałoby zbyt częstymi restartami podów, co w konsekwencji generowałoby większe koszty niż wynikające z niedostatecznego wykorzystania zasobów.

### 5.3.2. Implementacja Agentów Translacji

#### Agent Ingress

**Agent Ingress** okresowo pobiera aktualne zużycie zasobów oraz zdefiniowane wartości `requests` oraz `limits` dla podów UPF w obu wdrożeniach (ang. *deployments*). Następnie, zgodnie ze specyfikacją **Interfejsu Lupin**, będzie aktualizował pole Input statusu obiektu API **Elementu Ingress** obiektem JSON, jak pokazano na listingu 16 z przykładowymi wartościami. Jednocześnie taki obiekt JSON będzie stanowił początkową postać **Danych**.

**Listing 16.**

```
{
    "open5gs-upf1": {
        "actual": {
            "cpu": "1m",
            "memory": "18Mi"
        },
        "requests": {
            "cpu": "100m",
            "memory": "128Mi"
        },
        "limits": {
            "cpu": "250m",
            "memory": "256Mi"
        }
    },
    "open5gs-upf2": {
        "actual": {
            "cpu": "1m",
            "memory": "25Mi"
        },
        "requests": {
            "cpu": "200m",
            "memory": "256Mi"
        },
        "limits": {
            "cpu": "500m",
            "memory": "512Mi"
        }
    }
}
```

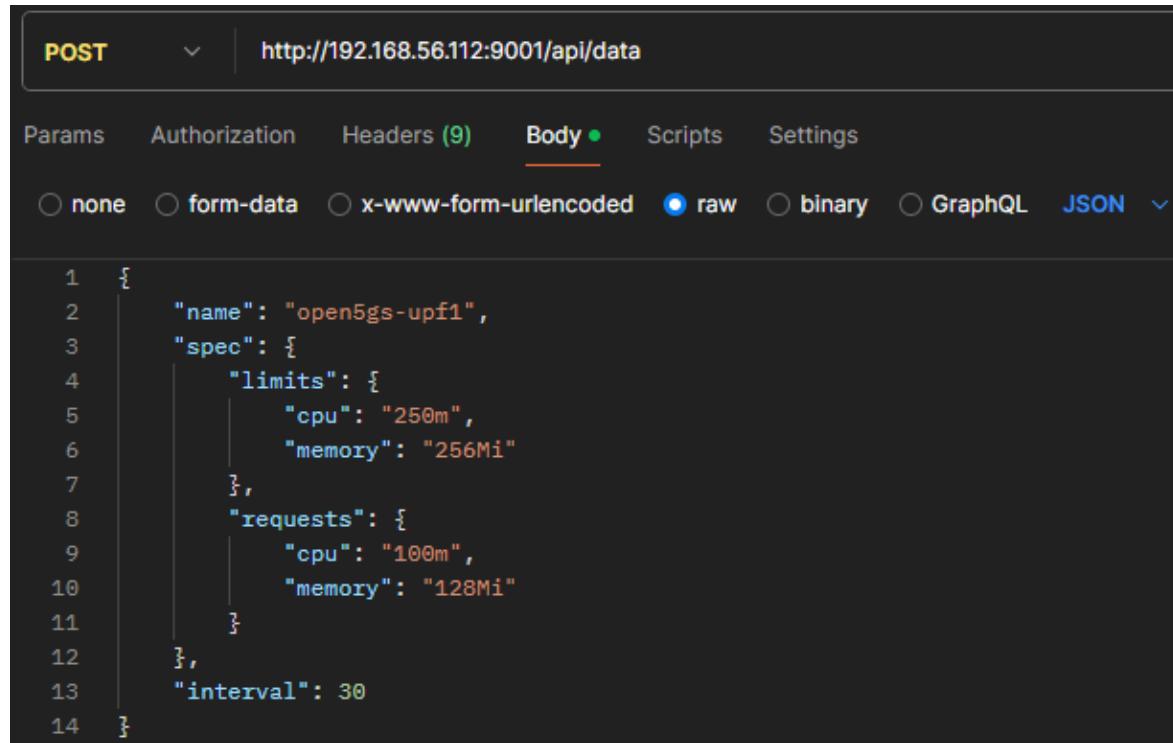
Kod agenta Ingress znajduje się w Załączniku 7.

### **Agent Egress**

Agent Egress udostępnia interfejs HTTP (endpoint), który przyjmuje dane w postaci przedstawionej na rysunku 5.5

Następnie dla wdrożenia (ang. *deployment*) zadanego polem name zmodyfikuje zdefiniowane wartości requests oraz limits według pola spec. Opcjonalne jest pole interval, które określa z jakim interwałem czasowym (w sekundach) raportować aktualne zużycie zasobów. Agent Egress odpowiednio wysteruje tym polem Agenta Ingress. Kod Agenta Egress znajduje się w Załączniku 8.

## 5. Test platformy na emulatorze sieci 5G



```
POST http://192.168.56.112:9001/api/data

Params Authorization Headers (9) Body Scripts Settings
 none  form-data  x-www-form-urlencoded  raw  binary  GraphQL JSON

1 {
2   "name": "open5gs-upf1",
3   "spec": {
4     "limits": {
5       "cpu": "250m",
6       "memory": "256Mi"
7     },
8     "requests": {
9       "cpu": "100m",
10      "memory": "128Mi"
11    }
12  },
13  "interval": 30
14 }
```

Rysunek 5.5. Endpoint Egress Agent przyjmujący finalne dane. Źródło: Opracowanie własne.

### 5.3.3. Planowanie Logiki Pętli

Analizując dane wejściowe z listingu 16, można wyróżnić cztery możliwe stany pojedynczego wdrożenia UPF:

- **NORMAL** – wartości requests i limits ustawione na wartości domyślne, rzeczywiste zużycie (actual) pozostaje poniżej wartości domyślnych.
- **NORMAL\_TO\_CRITICAL** – wartości requests i limits nadal są domyślne, ale rzeczywiste zużycie (actual) przekracza wartości domyślne.
- **CRITICAL** – wartości requests i limits przekraczają wartości domyślne, a rzeczywiste zużycie (actual) również pozostaje powyżej wartości domyślnych.
- **CRITICAL\_TO\_NORMAL** – wartości requests i limits nadal przekraczają wartości domyślne, ale rzeczywiste zużycie (actual) spadło poniżej wartości domyślnych.

W zależności od stanu systemu należy podjąć następujące działania:

- **NORMAL** – brak działań, system działa poprawnie.
- **NORMAL\_TO\_CRITICAL** – dostosowanie wartości requests i limits, ustawienie interwału obserwacji na wysoki (HIGH).
- **CRITICAL** – dostosowanie wartości requests i limits do aktualnego zapotrzebowania.
- **CRITICAL\_TO\_NORMAL** – przywrócenie wartości requests i limits do wartości domyślnych, ustawienie interwału obserwacji na niski (LOW).

W związku z powyższym opisem, pętla powinna w każdej iteracji określi punkt pracy, czyli stan w jakim znajduje się UPF. Jeśli jest to stan NORMAL, nie ma potrzeby aby wykonywać jakiekolwiek akcje sterujące. W przeciwnym wypadku, należy "dostroić" UPF

odpowiednimi wartościami requests oraz limits. Jeśli UPF jest lub zbliża się do stanu krytycznego należy je ustawić z odpowiednim zapasem, zaś jeżeli UPF wraca z powrotem do stanu normalnego należy przywrócić im wartości domyślne. Na sam koniec, jeżeli mamy jeden ze stanów przejściowych (NORMAL\_TO\_CRITICAL bądź CRITICAL\_TO\_NORMAL) należy zmienić interwał obserwacji odpowiednio na wysoki lub niski.

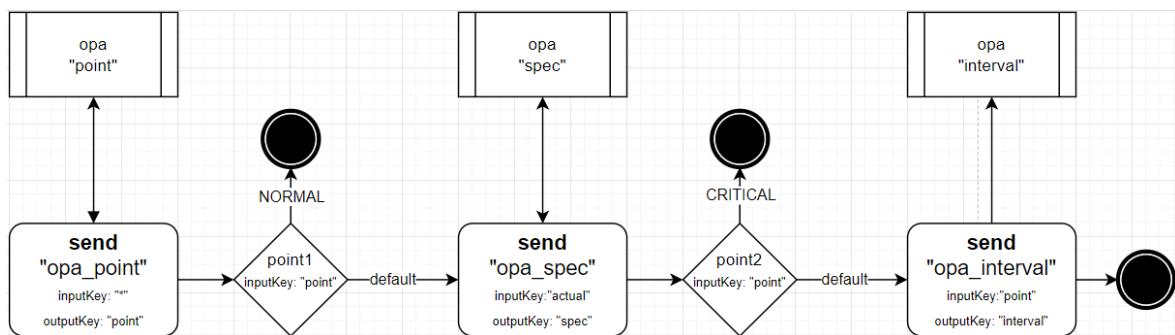
Z tego opisu widzimy, że **Część obliczeniowa** logiki pętli składa się z trzech części:

- Ustalenie punktu pracy
- Obliczenie wartości requests oraz limits
- Ustalenie wartości interwału na podstawie punktu pracy

Dlatego też powstaną trzy **Elementy Zewnętrzne**:

- **POINT** – akceptuje "\*" (wszystkie **Pola Danych**), zwraca "point".
- **SPEC** – akceptuje "actual", zwraca "spec" zawierające wartości "requests" oraz "limits".
- **INTERVAL** – akceptuje "point", zwraca "interval".

**Workflow Akcji dla Elementu Lupus** odpowiedzialnego za rekoncyliację jednego wdrożenia zostało zaprojektowane według rysunku 5.6.



Rysunek 5.6. Workflow Akcji Elementu Lupus. Źródło: Opracowanie własne.

### 5.3.4. Przygotowanie Elementów Zewnętrznych

Każdy z **Elementów Zewnętrznych** przygotowano jako aplikację Python emulującą serwer **Open Policy Agent**.

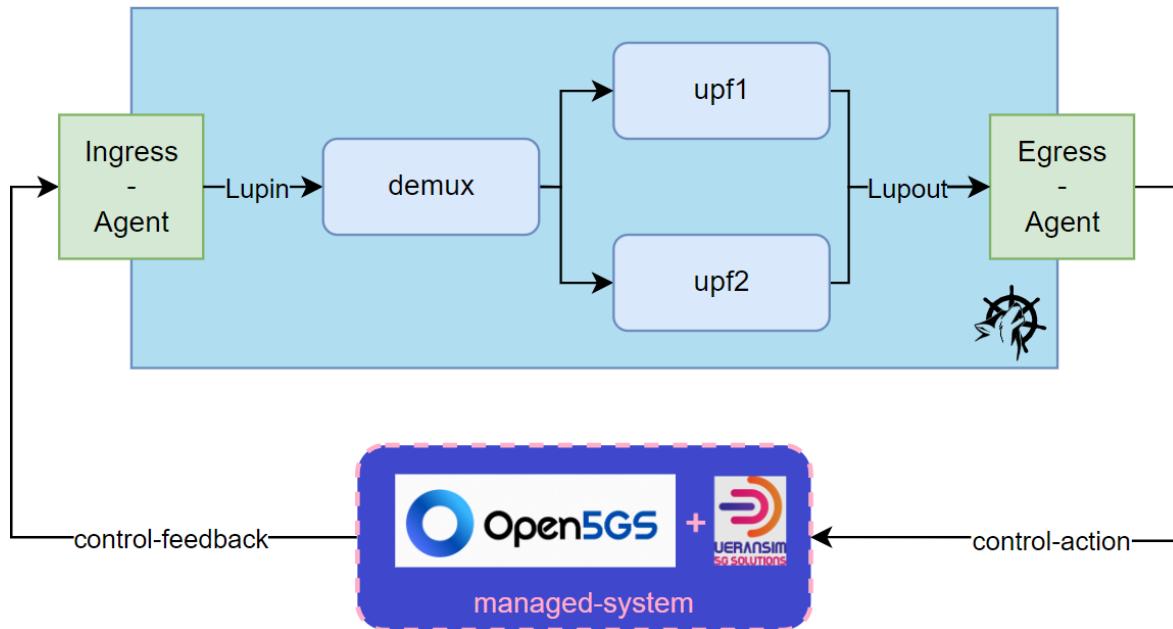
Implementacje można znaleźć w Załączniku 9.

### 5.3.5. Wyrażenie workflow pętli w notacji LupN

**Workflow Pętli** pokazano na rysunku 5.7.

Element demux służy do rozdzielenia **Danych** na dwie części. Każde wdrożenie UPF ma swój dedykowany element upf1 lub upf2, który obsługuje je według **Workflow Akcji** przedstawionego w poprzednim podrozdziale. Elementy upf1 oraz upf2 niezależnie pobudzają endpoint /api/data **Agenta Egress**.

Kod **LupN** znajduje się w Załączniku 10. Ostatnim krokiem w celu uruchomienia pętli jest zaaplikowanie **Pliku LupN**.



Rysunek 5.7. Workflow Pętli. Źródło: Opracowanie własne.

### 5.3.6. Prezentacja działania jednej iteracji pętli

Iterację rozpoczyna **Agent Ingress**, który pobiera **Dane** z Kubernetes (rys. 5.8). Następnie aktualizuje on Status obiektu API lola-demux (rys. 5.9), który wykonuje swoje **Workflow Akcji** (rys. 5.10) skutkujące aktualizacją Status'ów obiektów API upf1 i upf2 (rys. 5.11). To skutkuje wywołaniem Operatora dla tych obiektów. Operator wykonuje dla obu **Workflow Akcji** (rys. 5.12). Na koniec oba elementy wywołują endpoint api/data serwowany przez **Agenta Egress** (rys. 5.13).

```

ejek@open5gs-vm:~/lupus$ python3 examples/open5gs/sample-loop/ingress-agent.py --interval 30
 * Serving Flask app 'ingress-agent'
 * Debug mode: off
2025/01/30 17:02:02 Round: 1
{"open5gs-upf1": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}}, "open5gs-upf2": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}}}
Updated Kubernetes custom resource status successfully.
  
```

Rysunek 5.8. Logi Agenta Ingress. Źródło: Opracowanie własne.

Gdy pobudzimy funkcję UPF do większej pracy ruchem z UE, widzimy raportowane większe zużycie zasobów przez odpowiednie wdrożenie (rys. 5.14). Aktualne zużycie przekraczające zdefiniowany punkt pracy powoduje otrzymanie od elementu zewnętrznego opa-point punktu NORMAL\_TO\_CRITICAL, co z kolei wpływa na workflow akcji (rys. 5.15). W kolejnych iteracjach w logach Agenta Ingress widzimy błąd spowodowany tym, że Pod UPF1 chwilowo nie istnieje, stało się tak dlatego iż Agent Egress w poprzedniej iteracji zmienił jego wartość requests oraz limits, co poskutkowało restartem Poda. Po restartie widzimy, iż Agent Ingress raportuje nowe wartości requests i limits dla Poda UPF1.

Dokumentacja elektroniczna całego procesu wraz z instrukcją uruchomienia na właściwym środowisku znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/lupus/tree/master/examples/open5gs>.

```

Status:
Input:
open5gs-upf1:
  Actual:
    Cpu: 1m
    Memory: 19Mi
  Limits:
    Cpu: 250m
    Memory: 256Mi
  Requests:
    Cpu: 100m
    Memory: 128Mi
open5gs-upf2:
  Actual:
    Cpu: 1m
    Memory: 19Mi
  Limits:
    Cpu: 250m
    Memory: 256Mi
  Requests:
    Cpu: 100m
    Memory: 128Mi
Last Updated: 2025-01-30T17:07:09.652335Z
Events: <none>

```

## demux

Rysunek 5.9. Status obiektu API "lola-demux". Źródło: Opracowanie własne.

```

2025-01-30T17:09:12Z INFO ===== START OF lola-demux RECONCLIER:
  {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-demux", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-demux", "reconcileID": "cf248c50-8c3b-43ae-97a0-4be35949d2c5"}
-----print-----Data-----
{"open5gs-upf1": {"actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}}, "open5gs-upf2": {"actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf2", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}}}
2025-01-30T17:09:12Z INFO Success exit encountered {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-demux", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-demux", "reconcileID": "cf248c50-8c3b-43ae-97a0-4be35949d2c5"}
2025-01-30T17:09:12Z INFO Succesfully sent final Data to Next element {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-demux", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-demux", "reconcileID": "cf248c50-8c3b-43ae-97a0-4be35949d2c5"}
2025-01-30T17:09:12Z INFO Element sucessfully reconciled {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-demux", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-demux", "reconcileID": "cf248c50-8c3b-43ae-97a0-4be35949d2c5", "name": "lola-demux"}
2025-01-30T17:09:12Z INFO ===== START OF lola-upf1 RECONCLIER:
  {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf1", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf1", "reconcileID": "9bf0585c-8afb-4209-a3e8-8dc5795b43f4"}

```

Rysunek 5.10. Logi operatora element rekoncylującego obiekt API "lola-demux". Źródło: Opracowanie własne.

```

Status:
Input:
Actual:
  Cpu: 1m
  Memory: 19Mi
Limits:
  Cpu: 250m
  Memory: 256Mi
Name: open5gs-upf1
Requests:
  Cpu: 100m
  Memory: 128Mi
Last Updated: 2025-01-30T17:07:40Z
Events: <none>

```

## upf1

```

Status:
Input:
Actual:
  Cpu: 1m
  Memory: 19Mi
Limits:
  Cpu: 250m
  Memory: 256Mi
Name: open5gs-upf2
Requests:
  Cpu: 100m
  Memory: 128Mi
Last Updated: 2025-01-30T17:07:40Z
Events: <none>

```

## upf2

Rysunek 5.11. Statusy obiektów API "lola-upf1" oraz "lola-upf2". Źródło: Opracowanie własne.

## 5. Test platformy na emulatorze sieci 5G

---

```
2025-01-30T17:09:12Z    INFO      ===== START OF lola-upf1 RECONCLIER:
    {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf1", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf1", "reconcileID": "9bf0585c-8afb-4209-a3e8-8dc5795b43f4"}
-----print1-----Data:
{"actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}}
Sending {"input": {"actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}}} to POST http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/point
-----print2-----Data:
{"actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "point": "NORMAL", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}}
2025-01-30T17:09:12Z    INFO      Success exit encountered      {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf1", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf1", "reconcileID": "9bf0585c-8afb-4209-a3e8-8dc5795b43f4"}
Sending {"actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "point": "NORMAL", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}} to POST http://192.168.56.112:9001/api/data
2025-01-30T17:09:12Z    INFO      Succesfully sent final Data to Next element      {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf1", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf1", "reconcileID": "9bf0585c-8afb-4209-a3e8-8dc5795b43f4", "name": "lola-upf1"}
2025-01-30T17:09:12Z    INFO      ===== START OF lola-upf2 RECONCLIER:
    {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf2", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf2", "reconcileID": "07d57cd1-3723-46e8-834c-b8be308237ca"}
```

Rysunek 5.12. Logi operatora element rekoncylującego obiekt API "lola-upf1". Źródło: Opracowanie własne.

```
192.168.56.112 - - [30/Jan/2025 17:10:14] "POST /api/data HTTP/1.1" 200 -
{'actual': {'cpu': '1m', 'memory': '19Mi'}, 'limits': {'cpu': '250m', 'memory': '256Mi'}, 'name': 'open5gs-upf1',
 'point': 'NORMAL', 'requests': {'cpu': '100m', 'memory': '128Mi'}}
192.168.56.112 - - [30/Jan/2025 17:10:45] "POST /api/data HTTP/1.1" 200 -
{'actual': {'cpu': '1m', 'memory': '19Mi'}, 'limits': {'cpu': '250m', 'memory': '256Mi'}, 'name': 'open5gs-upf2',
 'point': 'NORMAL', 'requests': {'cpu': '100m', 'memory': '128Mi'}}
192.168.56.112 - - [30/Jan/2025 17:10:45] "POST /api/data HTTP/1.1" 200 -
{'actual': {'cpu': '1m', 'memory': '19Mi'}, 'limits': {'cpu': '250m', 'memory': '256Mi'}, 'name': 'open5gs-upf1',
 'point': 'NORMAL', 'requests': {'cpu': '100m', 'memory': '128Mi'}}
192.168.56.112 - - [30/Jan/2025 17:11:15] "POST /api/data HTTP/1.1" 200 -
{'actual': {'cpu': '1m', 'memory': '19Mi'}, 'limits': {'cpu': '250m', 'memory': '256Mi'}, 'name': 'open5gs-upf2',
 'point': 'NORMAL', 'requests': {'cpu': '100m', 'memory': '128Mi'}}
192.168.56.112 - - [30/Jan/2025 17:11:15] "POST /api/data HTTP/1.1" 200 -
```

Rysunek 5.13. Logi Agenta Egress. Źródło: Opracowanie własne.

```
ejek@open5gs-vm:~/lupus$ python3 examples/open5gs/sample-loop/ingress-agent.py --interval 30
* Serving Flask app 'ingress-agent'
* Debug mode: off
2025/01/30 18:36:46 Round: 1
{"open5gs-upf1": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "0m", "memory": "19Mi"}}, "open5gs-upf2": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}}}
Updated Kubernetes custom resource status successfully.
2025/01/30 18:37:19 Round: 2
{"open5gs-upf1": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "51m", "memory": "19Mi"}}, "open5gs-upf2": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}}}
Updated Kubernetes custom resource status successfully.
2025/01/30 18:37:52 Round: 3
{"open5gs-upf1": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"}}, "open5gs-upf2": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}}}
Updated Kubernetes custom resource status successfully.
Error fetching actual usage for pod open5gs-upf1-855cf568bb-2np85: Error from server (NotFound): podmetrics.metrics.k8s.io "open5gs/open5gs-upf1-855cf568bb-2np85" not found
2025/01/30 18:38:24 Round: 4
{"open5gs-upf1": {"requests": {"cpu": "129m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "259m", "memory": "256Mi"}, "actual": {}}, "open5gs-upf2": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}}}
Updated Kubernetes custom resource status successfully.
2025/01/30 18:38:57 Round: 5
{"open5gs-upf1": {"requests": {"cpu": "129m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "259m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "114m", "memory": "17Mi"}}, "open5gs-upf2": {"requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "actual": {"cpu": "1m", "memory": "19Mi"}}}
Updated Kubernetes custom resource status successfully.
```

Rysunek 5.14. Logi Agenta Ingress przy pobudzeniu ruchem. Źródło: Opracowanie własne.

```

2025-01-30T18:37:53Z    INFO  Element sucessfully reconciled {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-demux", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-demux", "reconcileID": "8a78e89d-fd16-4f1a-87aa-f26ff67a9b5e", "name": "lola-demux"}
2025-01-30T18:37:53Z    INFO  ===== START OF lola-upf1 RECONCLIER:
{"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf1", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf1", "reconcileID": "6f3171e8-e65e-4f0f-8b0c-cb8928fde1f0"}
-----print1-----Data:
{"actual": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}}
Sending {"input": {"actual": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"} } to POST http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/point
-----print2-----Data:
{"actual": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "point": "NORMAL_TO_CRITICAL", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}}
Sending {"input": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"} } to POST http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/spec
-----print3-----Data:
{"actual": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "point": "NORMAL_TO_CRITICAL", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "spec": {"limits": {"cpu": "259m", "memory": "256Mi"}, "requests": {"cpu": "129m", "memory": "128Mi"} }
-----print4-----Data:
{"actual": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"}, "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "point": "NORMAL_TO_CRITICAL", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "spec": {"limits": {"cpu": "259m", "memory": "256Mi"}, "requests": {"cpu": "129m", "memory": "128Mi"} }
Sending {"input": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"} } to POST http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/interval
-----print5-----Data:
{"actual": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"}, "interval": "HIGH", "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "point": "NORMAL_TO_CRITICAL", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "spec": {"limits": {"cpu": "259m", "memory": "256Mi"}, "requests": {"cpu": "129m", "memory": "128Mi"} }
2025-01-30T18:37:53Z    INFO  Success exit encountered {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf1", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf1", "reconcileID": "6f3171e8-e65e-4f0f-8b0c-cb8928fde1f0"}
Sending {"actual": {"cpu": "108m", "memory": "19Mi"}, "interval": "HIGH", "limits": {"cpu": "250m", "memory": "256Mi"}, "name": "open5gs-upf1", "point": "NORMAL_TO_CRITICAL", "requests": {"cpu": "100m", "memory": "128Mi"}, "spec": {"limits": {"cpu": "259m", "memory": "256Mi"}, "requests": {"cpu": "129m", "memory": "128Mi"} } } to POST http://192.168.56.112:9001/api/data
2025-01-30T18:37:53Z    INFO  Succesfully sent final Data to Next element {"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf1", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf1", "reconcileID": "6f3171e8-e65e-4f0f-8b0c-cb8928fde1f0"}
2025-01-30T18:37:53Z    INFO  ===== START OF lola-upf2 RECONCLIER:
{"controller": "element", "controllerGroup": "lupus.gawor.io", "controllerKind": "Element", "Element": {"name": "lola-upf2", "namespace": "default"}, "namespace": "default", "name": "lola-upf2", "reconcileID": "f4973e77-f"

```

**Rysunek 5.15.** Logi z workflow akcji elementu "upf1" przy pobudzeniu ruchem. Źródło: Opracowanie własne.

## 6. Podsumowanie

### 6.1. Wstęp

Niniejszy rozdział przedstawia wyzwania, z którymi się mierzono podczas pracy, analizuje wyniki w odniesieniu do założeń i celów projektu, omawia możliwe ograniczenia uzyskanych rezultatów, porównuje je z istniejącymi rozwiązaniami oraz przedstawia perspektywy dalszego rozwoju.

### 6.2. Wyzwania

W trakcie realizacji projektu napotkano liczne wyzwania, w tym:

- Dogłębne zrozumienie platformy Kubernetes – konieczne było opanowanie nie tylko jej podstaw operacyjnych, ale także mechanizmów działania warstwy sterowania. Tworzenie własnych operatorów jest uważane za zaawansowane zadanie, wymagające szczegółowej znajomości architektury Kubernetes.
- Projektowanie operatora bez wbudowanej logiki pętli – znalezienie odpowiedniego podejścia wymagało kilku iteracji implementacyjnych. Początkowo każdy element pętli był osobnym zasobem z własnym operatorem. Stopniowe identyfikowanie części wspólnych doprowadziło do stworzenia jednego uniwersalnego typu elementu oraz interpretera akcji w operatorze.
- Implementacja obiektu **danych** – ze względu na dynamicznie określana w czasie działania strukturę, trudne było jego odwzorowanie w języku Go, który jest silnie typowany. Dodatkowo, nawet po skutecznej reprezentacji w pamięci, manipulowanie danymi okazało się wyzwaniem. Szczególnie czasochłonne były kwestie związane z obsługą zagnieżdżonych pól.
- Wdrożenie platformy Open5GS-k8s do testowania – wymagało znacznego nakładu pracy, zwłaszcza w zakresie podłączania zewnętrznych urządzeń UE. Proces ten wiązał się z dogłębnią analizą oraz nauką rozszerzeń sieciowych wykorzystywanych przez autora repozytorium<sup>23</sup>.
- Złożoność dokumentacji – ze względu na skalę projektu oraz jego charakter, w którym efektem końcowym nie jest konkretna funkcjonalność, lecz propozycja frameworka dla użytkowników, opracowanie kompletnej i przejrzystej dokumentacji okazało się czasochłonne.
- 

### 6.3. Analiza w odniesieniu do założeń

Uzyskano platformę, za pomocą której można modelować, uruchamiać oraz zarządzać zamkniętymi pętlami sterowania, co potwierdzają wyniki przedstawione w rozdziale 5. Wszystkie wymagania zdefiniowane w podrozdziale 3.2 zostały spełnione. Jedynym brakiem można uznać niezaimplementowany w PoC interfejs graficzny określony w wymaganiu 13.

<sup>23</sup><https://github.com/niloysh/open5gs-k8s/issues/7>

### 6.4. Ograniczenia

Jednym z głównych ograniczeń jest długość plików kodu LupN. Ich rozbudowana struktura może wpływać na czytelność oraz utrudniać analizę i edycję. Kolejnym ograniczeniem może być nadmierna ogólność – duży ciężar implementacji spoczywa na użytkowniku platformy.

### 6.5. Porównanie z istniejącymi rozwiązaniami

Jednym bezpośrednio porównywalnym rozwiązaniem jest ONAP/CLAMP. Proponowana platforma oferuje dużo większą elastyczność modelowanych pętli oraz daje dowolność wyboru silnika polityk.

### 6.6. Możliwości rozwoju

W przypadku komercyjnej implementacji proponowanej architektury możliwe jest uzyskanie platformy, która może być integralną częścią systemów zarządzania sieciami telekomunikacyjnymi zgodnymi ze specyfikacjami ETSI ENI, ETSI ZSM oraz TM Forum.



## Bibliografia

- [1] J. O. Kephart i D. M. Chess, „The Vision of Autonomic Computing”, *IEEE Computer*, t. 36, nr. 1, s. 41–50, 2003. DOI: 10.1109/MC.2003.1160055. adr.: [https://www.researchgate.net/publication/2955831\\_The\\_Vision\\_Of\\_Autonomic\\_Computing](https://www.researchgate.net/publication/2955831_The_Vision_Of_Autonomic_Computing).
- [2] M. Minsky, *The Society of Mind*. New York, United States: Simon & Schuster, 1986, ISBN: 978-0671657130.
- [3] D. P. Doyle, „Architecture Evolution for Automation and Network Programmability”, *Ericsson Review*, 2014. adr.: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=7006f5e8c7b83f2ea265a6155ff9b4cfe11d4011>.
- [4] N. Alliance, „Automation and Autonomous System Architecture Framework”, spraw. tech. Version 1.0, 2022. adr.: [https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN\\_AAAF\\_v1.0.pdf](https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_AAAF_v1.0.pdf).
- [5] C. Benzaid i T. Taleb, „AI-Driven Zero Touch Network and Service Management in 5G and Beyond: Challenges and Research Directions”, *IEEE Network*, 2020. DOI: 10.1109/MNET.001.1900252. adr.: [https://www.researchgate.net/publication/339224458\\_AI-Driven\\_Zero\\_Touch\\_Network\\_and\\_Service\\_Management\\_in\\_5G\\_and\\_Beyond\\_Challenges\\_and\\_Research\\_Directions](https://www.researchgate.net/publication/339224458_AI-Driven_Zero_Touch_Network_and_Service_Management_in_5G_and_Beyond_Challenges_and_Research_Directions).
- [6] L. Fallon, J. Keeney i R. K. Verma, „Autonomic Closed Control Loops for Management, an Idea Whose Time Has Come?”, w *Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 2019. DOI: 10.23919/CNSM46954.2019.9012687. adr.: [https://www.researchgate.net/publication/339554962\\_Autonomic\\_Closed\\_Control\\_Loops\\_for\\_Management\\_an.idea.whose.time.has.come](https://www.researchgate.net/publication/339554962_Autonomic_Closed_Control_Loops_for_Management_an.idea.whose.time.has.come).
- [7] ONAP, „Open Network Automation Platform (ONAP) Architecture White Paper”, spraw. tech., 2018. adr.: [https://www.onap.org/wp-content/uploads/sites/20/2018/06/ONAP\\_CaseSolution\\_Architecture\\_0618FNL.pdf](https://www.onap.org/wp-content/uploads/sites/20/2018/06/ONAP_CaseSolution_Architecture_0618FNL.pdf).
- [8] ETSI, „Zero-touch Network and Service Management (ZSM); Reference Architecture”, ETSI, spraw. tech. ETSI GS ZSM 002 V1.1.1, 2019. adr.: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/ZSM/001\\_099/002/01.01.01\\_60/gs\\_ZSM002v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ZSM/001_099/002/01.01.01_60/gs_ZSM002v010101p.pdf).
- [9] J. R. Boyd, *The Essence of Winning and Losing*, Edited by Chet Richards and Chuck Spinney, 1995. adr.: [https://slightlyeastofnew.com/wp-content/uploads/2010/03/essence\\_of\\_winning\\_loosing.pdf](https://slightlyeastofnew.com/wp-content/uploads/2010/03/essence_of_winning_loosing.pdf).
- [10] ETSI, „Zero-touch Network and Service Management (ZSM); Closed-Loop Automation Enablers”, ETSI, spraw. tech. ETSI GS ZSM 009-1 V1.1.1, 2021. adr.: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/ZSM/001\\_099/00901/01.01.01\\_60/gs\\_ZSM00901v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ZSM/001_099/00901/01.01.01_60/gs_ZSM00901v010101p.pdf).
- [11] T. Forum, *Open Digital Architecture*, Dostęp online: 07.02.2025, 2018. adr.: <https://www.tmforum.org/resources/publication/open-digital-architecture/>.
- [12] T. Forum, „AI Closed Loop Automation - Anomaly Detection and Resolution”, TM Forum, spraw. tech. IG1219 V2.1.0, 2021. adr.: <https://www.tmforum.org/>

## 6. Bibliografia

---

- resources/introductory-guide/ig1219-ai-closed-loop-automation-anomaly-detection-and-resolution-v2-1-0/.
- [13] T. Forum, „Closed Loop Automation Implementation Architectures”, TM Forum, spraw. tech. TR284 V3.1.0, 2021. adr.: <https://www.tmforum.org/resources/how-to-guide/tr284-ai-closed-loop-automation-implementation-architectures-v3-1-0/>.
  - [14] T. Forum, „AI Closed Loop Automation Management”, TM Forum, spraw. tech. IG1219A V1.1.0, 2022. adr.: <https://www.tmforum.org/resources/introductory-guide/ig1219a-ai-closed-loop-automation-management-v2-0-0/>.
  - [15] ETSI, „Experiential Networked Intelligence (ENI); System Architecture”, ETSI, spraw. tech. ETSI GS ENI 005 V3.1.1, 2023. adr.: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/ENI/001\\_099/005/03.01.01\\_60/gs\\_ENI005v030101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ENI/001_099/005/03.01.01_60/gs_ENI005v030101p.pdf).
  - [16] ETSI, „Overview of Prominent Control Loop Architectures”, ETSI, spraw. tech. ETSI GR ENI 017 V2.2.1, 2024. adr.: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gr/ENI/001\\_099/017/02.02.01\\_60/gr\\_ENI017v020201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/ENI/001_099/017/02.02.01_60/gr_ENI017v020201p.pdf).
  - [17] J. Strassner, N. Agoulmine i E. H. Lehtihet, „FOCALE - A Novel Autonomic Networking Architecture”, *ITSSA Journal*, t. 3, nr. 1, s. 64–79, 2007. adr.: [https://www.researchgate.net/publication/268441498\\_FOCALE\\_-\\_A\\_Novel\\_Autonomic\\_Networking\\_Architecture](https://www.researchgate.net/publication/268441498_FOCALE_-_A_Novel_Autonomic_Networking_Architecture).
  - [18] J. Strassner, „DEN-ng: achieving business-driven network management”, *IEEE Communications Magazine*, t. 41, nr. 10, s. 90–96, 2003. adr.: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1015622>.
  - [19] „ETSI TS 103 195-2 V1.1.1 (2018-05): Autonomic network engineering for the self-managing Future Internet (AFI); Generic Autonomic Network Architecture; Part 2: An Architectural Reference Model for Autonomic Networking, Cognitive Networking and Self-Management”, ETSI, spraw. tech., 2018. adr.: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/103100\\_103199/10319502/01.01.01\\_60/ts\\_10319502v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103100_103199/10319502/01.01.01_60/ts_10319502v010101p.pdf).
  - [20] J. Strassner, J. W.-K. Hong i S. van der Meer, „The Design of an Autonomic Element for Managing Emerging Networks and Services”, w *International Conference on Ultra Modern Telecommunications*, 2009. DOI: 10.1109/ICUMT.2009.5345533. adr.: [https://www.researchgate.net/publication/221003980\\_The\\_design\\_of\\_an\\_Autonomic\\_Element\\_for\\_managing\\_emerging\\_networks\\_and\\_services](https://www.researchgate.net/publication/221003980_The_design_of_an_Autonomic_Element_for_managing_emerging_networks_and_services).

## Wykaz symboli i skrótów

**Architektura** – Zbiór reguł i metod opisujących funkcjonalność, organizację oraz implementację systemu.

**Dane** – Fakty oraz statystyk zebrane razem w celu analizy. Stanowią podstawę do wydobycia z nich informacji

**Definicje Zasobów Własnych (ang. Custom Resource Definitions)** – Pliki manifestacyjne YAML służące do zarejestrowania w klastrze nowe zasoby własne

**Doświadczenie (ang. Experience)** – Proces zdobywania wiedzy przez system podczas funkcjonowania w środowisku docelowym .

**Edukacja (ang. Education)** – Proces zdobywania wiedzy przez system poza środowiskiem docelowym, np. podczas trenowania modelu .

**Wiedza (ang. Knowledge)** – Zestaw wzorców, które są wykorzystywane do wyjaśniania, a także przewidywania tego, co się wydarzyło, dzieje lub może się wydarzyć w przyszłości. Bazuje na danych, informacjach oraz umiejętnościach zdobytych poprzez doświadczenie oraz edukację

**ENI** – Experiential Networked Intelligence

**ETSI** – European Telecommunications Standards Institute

Reprezentacja pojęć będących przedmiotem zainteresowania środowiska w formie niezależnej od formy danych

**Kognitywność (ang. cognition)** – Proces rozumienia danych oraz informacji w celu produkcji nowych danych, informacji oraz wiedzy

**Kognitywny System Zarządzania Siecią** – System zarządzania siecią, który jest jednocześnie kognitywny. Docelowy system specyfikowany przez ENI

**Kontroler (ang. controller)** – Proces monitorujący stan obiektów API w klastrze i doprowadzający je do stanu pożądanego

**Obiekt API (ang. API object)** – Zasób reprezentujący element klastra, np. Poda, Deployment, Service. Jest przechowywany w etcd i zarządzany przez API Server. Jest to konkretna instancja danego typu (ang. Kind) zasobów

**Plik Manifestowy YAML (ang. YAML Manifest File)** – Plik konfiguracyjny zapisany w formacie YAML, definiujący obiekty API Kubernetes. Służy do deklaratywnego zarządzania zasobami klastra

**Polityka (ang. Policy)** – Zestaw reguł, który jest używany do zarządzania i kontrolowania zmiany i/lub utrzymania stanu jednego lub więcej zarządzanych obiektów

**Regulator (ang. Control System)** – Pojęcie z teorii sterowania. System, który reguluje pracę obiektu

**Sterowany danymi (ang. Data-Driven)** – Nie narzucający żadnej logiki pętli – logika jest interpretowana na podstawie danych.

**System ENI** – Centralny punkt architektury ENI. Odpowiedzialny za zamkniętą pętlę sterowania, za pomocą której ENI chce osiągnąć kognitywność. Lupus aspiruje do tego, aby zaproponować architekturę dla Systemu ENI na Kubernetes

**System kognitywny** – System, który uczy się, wnioskuje oraz podejmuje decyzje w sposób przypominający ludzki umysł

**Uczenie maszynowe (ang. Machine Learning)** – proces, który zdobywa nową wiedzę i/lub aktualizuje istniejącą wiedzę w celu optymalizacji funkcjonowanie systemu przy użyciu przykładowych obserwacji

**Świadomość kontekstu (ang. Context Aware)** – Posiadanie przez system informacji oraz wiedzy, które opisują środowisko w jakim znajduje się dana jednostka w celu lepszego doboru wzorca do rozwiązyania danego problemu

**Wzorzec (ang. pattern)** – Generyczne, reużywalne rozwiązanie danego problemu. Część składowa wiedzy .

**Warstwa Sterowania (ang. Control Plane)** – Zestaw komponentów zarządzających statem klastra Kubernetes. W szczególności Controller Manager, który nadzoruje kontrolery zasobów

**Workflow** – Sekwencja połączonych węzłów, czasami zależnych warunkowo, która realizuje określony cel. Zazwyczaj workflow definiuje się w celu organizacji pracy.

**Wnioskowanie (ang. reasoning)** – Proces, w którym system wyciąga logiczne wnioski z dostępnych danych i wiedzy

**Wzorzec Operator (ang. Operator Pattern)** – Rozszerzenie Kubernetes pozwalające rozwijać kontrolery dla zasobów własnych

**Zasoby Własne (ang. Custom Resources)** – Mechanizm rozszerzenia klastra Kubernetes o nowe typy obiektów API

## Spis rysunków

2.1	Pracowniczki warszawskiej centrali telefonicznej z końca lat 20. XX wieku. Źródło: <a href="https://wielkahistoria.pl/wp-content/uploads/2020/07/Telefonistki-z-warszawskiej-centrali-1024x760.jpg">https://wielkahistoria.pl/wp-content/uploads/2020/07/Telefonistki-z-warszawskiej-centrali-1024x760.jpg</a> . . . . .	11
2.2	Dwa stany systemu: przed, oraz po realizacji zgłoszenia o treści: "D" chce zadzwonić do "F". Źródło: Opracowanie własne. . . . .	12
2.3	Architektura autonomicznych systemów IBM. Źródło [1]. . . . .	14
2.4	Zestawienie lini czasu rozwoju systemów zarządzania siecią oraz pętli sterowania. Źródło: [6]. . . . .	16
2.5	Architektura referencyjna ZSM. Źródło: [8]. . . . .	19
2.6	Mapowanie pomiędzy elementami składowymi architektury ZSM a zamkniętą pętlą sterowania. Źródło: Opracowanie własne na postawie [10]. . . . .	20
2.7	Fazy cyklu życia oraz aktywności zamkniętej pętli sterowania. Źródło: [10]. . .	21
2.8	Architektura logiczna CLADRA. Źródło: [12]. . . . .	21
2.9	Wysokopoziomowa architektura funkcjonalna ENI. Źródło: [15]. . . . .	23
2.10	Hierarchiczna organizacja zamkniętych pętli sterowania. Źródło: [16]. . . . .	24
2.11	Architektura pętli OODA. Źródło: [16]. . . . .	25
2.12	Architektura pętli MAPE-K. Źródło: [16]. . . . .	25
2.13	Architektura pętli Focale. Źródło: Opracowanie własne na podstawie [16]. . .	26

2.14 Architektura pętli GANA. Źródło: [16]. . . . .	27
2.15 Architektura pętli COMPA. Źródło: [16]. . . . .	27
2.16 Architektura pętli Focale v3. Źródło: Opracowanie własne na podstawie [16]. . .	28
3.1 Logo platformy Luples. Autor: Natalia Ruszkowska, na potrzeby niniejszej pracy.	29
3.2 Architektura referencyjna dla Luples. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	39
3.3 Architektura referencyjna z agentami translacji. Źródło: Opracowanie własne.	40
3.4 Przykładowe workflow pętli. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	41
3.5 Przykładowe workflow akcji. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	41
4.1 Architektura Kubernetes. Źródło: <a href="https://kubernetes.io/docs/concepts/architecture/">https://kubernetes.io/docs/concepts/architecture/</a> . . . . .	45
4.2 Flow pracy kontrolera. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	46
4.3 Zaznaczenie możliwych do zaprogramowania elementów flow pracy kontrolera. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	47
4.4 Komunikacja pomiędzy Elementami Luples. Źródło: Opracowanie własne. . .	48
5.1 Architektura Open5GS. Źródło: Opracowanie własne na podstawie <a href="https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/">https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/</a> . . . . .	57
5.2 Architektura UERANSIM. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	58
5.3 Stan podów w klastrze. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	58
5.4 Wdrożenia Open5GS, w tym instancje UPF. Źródło: Opracowanie własne. . . .	59
5.5 Endpoint Egress Agent przyjmujący finalne dane. Źródło: Opracowanie własne.	62
5.6 Workflow Akcji Elementu Luples. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	63
5.7 Workflow Pętli. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	64
5.8 Logi Agenta Ingress. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	64
5.9 Status obiektu API "lola-demux". Źródło: Opracowanie własne. . . . .	65
5.10 Logi operatora element rekoncylującego obiekt API "lola-demux". Źródło: Opracowanie własne. . . . .	65
5.11 Statusy obiektów API "lola-upf1" oraz "lola-upf2". Źródło: Opracowanie własne. .	65
5.12 Logi operatora element rekoncylującego obiekt API "lola-upf1". Źródło: Opracowanie własne. . . . .	66
5.13 Logi Agenta Egress. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	66
5.14 Logi Agenta Ingress przy pobudzeniu ruchem. Źródło: Opracowanie własne. .	66
5.15 Logi z workflow akcji elementu "upf1" przy pobudzeniu ruchem. Źródło: Opracowanie własne. . . . .	67

## Spis tabel

4.1 Porównanie polimorfizmu przez wskaźniki i przez interfejsy w Go. . . . .	53
--	----

## **Spis załączników**

1. Definicje Luples . . . . .	77
2. Instalacja Luples . . . . .	80
3. Specyfikacja notacji LupN . . . . .	82
4. Specyfikacja interfejsów Luples . . . . .	90
5. Specyfikacja obiektu danych . . . . .	92
6. Specyfikacja akcji . . . . .	93
7. Kod Agenta Ingress . . . . .	97
8. Kod Agenta Egress . . . . .	100
9. Kod Elementów Zewnętrznych . . . . .	102
10. Kod LupN . . . . .	106
11. Funkcje Menadżera Zamkniętych Pętli . . . . .	112

## Załącznik 1. Definicje Lupus

Specyfikacja w formie elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/lupus/blob/master/docs/defs.md>.

**Akcja (ang. Action)** – Obiekt LupN. Za jej pomocą możliwe są operacje na danych

**Akcja Sterująca (ang. Control Action)** – Akcja wywnioskowana przez System Sterowania i wykonywana na Systemie Zarządzanym przez Agenta Egress. Akcja Sterowania ma za zadanie przybliżyć Stan Aktualny do Stanu Pożądanego.

**Agent Translacji (ang. Translation Agent)** – Agent oprogramowania na styku Lupus oraz Systemu Zarządzanego pełniący rolę integratora. Termin zbiorczy na Agent Ingress i Agent Egress.

**Agent Egress (ang. Egress Agent)** – Jeden z agentów translacji umieszczony na wyjściu z Lupus. Przekazuje finalne dane reprezentujące akcję sterowania do systemu zarządzanego. Implementuje interfejs Lupout.

**Agent Ingress (ang. Ingress Agent)** – Jeden z agentów translacji umieszczony na wejściu do Lupus. Przekazuje stan aktualny zarządzanego systemu do Lupus. Implementuje interfejs Lupin.

**Część Obliczeniowa (ang. Computing Part)** – Część logiki pętli odpowiedzialna za obliczenia. Wykonywana jest przez elementy zewnętrzne, nie elementy Lupus.

**Dane (ang. Data)** – Nośnik informacji w jednej iteracji pętli. Informacje zapisane są w formacie JSON.

**Destynacja (ang. Destination)** – Referencja do Elementu Zewnętrznego. Jednoznacznie opisuje żądaną HTTP, jakie ma wykonać Operator Zasobu Element.

**Element (ang. Element)** – Typ (ang. kind) obiektu API stanowiącego Element Lupus.

**Element Egress (ang. Egress Element)** – Ostatni element w danej ścieżce workflow pętli. Implementuje interfejs Lupout.

**Element Ingres (ang. Ingress Element)** – Pierwszy element w workflow pętli. Implementuje interfejs Lupin.

**Element Lupus (ang. Lupus Element)** – Jeden z elementów pętli. Działa w warstwie sterowania Kubernetes. Jego celem jest wyrażenie workflow pętli oraz delegacja części obliczeniowej do elementów zewnętrznych.

**Element Pętli (ang. Loop Element)** – Element realizujący jednostkę logiki pętli. Termin zbiorczy na Element Lupus oraz Element Zewnętrzny.

**Element Zewnętrzny (ang. External Element)** – Jeden z elementów pętli. Działa poza klastrzem Kubernetes. Jego celem jest część obliczeniowa logiki pętli.

**Finalne dane (ang. Final Data)** – Postać danych po wykonaniu ostatniej akcji z workflow akcji Elementu. W przypadku elementu Egress ona definiuje Akcję Sterującą.

**Funkcje użytkownika (ang. User Functions)** – Alternatywa dla wdrażania serwerów HTTP do prostych obliczeń. Funkcje użytkownika działają jak elementy zewnętrzne, ale są wykonywane w klastrze Kubernetes. Jest to jedna z dostępnych Destynacji w Lupu.

**Interfejs Lupin (ang. Lupin interface)** – Interfejs wejściowy do Lupus. Implementować go musi Agent Ingress oraz Element Ingress.

**Interfejs Lupout (ang. *Lupout interface*)** – Interfejs wyjściowy z LUPUS. Implementować go musi Agent Egress oraz Element Egress.

**Interfejsy LUPUS (ang. *LUPUS interfaces*)** – Termin zbiorczy na Interfejs Lupin oraz Interfejs Lupout.

**Kod LupN (ang. *LupN code*)** – Kod wyrażający notację LupN. Zbiór obiektów LupN zapisanych w YAML. Zapisany jest w pliku LupN.

**Logika Pętli (ang. *Loop logic*)** – Kroki, które muszą zostać wykonane, aby w każdej iteracji pętli przybliżyć Stan Aktualny do Stanu Pożądanego. Instrukcje określające, jak na podstawie reprezentacji Stanu Aktualnego ma zostać *wywnioskowana* Akcja Sterująca.

**LupN (ang. *LupN*)** – Notacja do wyrażania workflow pętli za pomocą obiektów LupN. Zapisywana w pliku LupN.

**LUPUS (ang. *LUPUS*)** – System o proponowanej w pracy architekturze, który pełni rolę Systemu Sterowania.

**LUPUS Master (ang. *LUPUS Master*)** – Nadzorca pojedynczej pętli LUPUS. Odpowiedzialny za kreację obiektów Zasobu LUPUS Element.

**Master (ang. *Master*)** – Typ (ang. *kind*) obiektu API dla LUPUS Master.

**Open Policy Agent (ang. *Open Policy Agent*)** – Serwer HTTP dedykowany do definiowania polityk i stosowania ich w systemach informatycznych.

**Operator Zasobu Master (ang. *Master Operator*)** – Kontroler zasobu Master. Odpowiedzialny za interpretację workflow pętli notacji LupN i tworzenie obiektów Element.

**Obiekt LupN (ang. *LupN Object*)** – Obiekty składające się na składnię LupN za pomocą, których wyrażane jest workflow pętli

**Operator Zasobu Element (ang. *Element Operator*)** – Kontroler zasobu Element. Odpowiedzialny za interpretację workflow akcji notacji LupN i jego wykonanie.

**Plik LupN (ang. *LupN file*)** – Plik manifestowy YAML zasobu Master. Zapisana jest w nim notacja LupN.

**Pole Danych (ang. *Data Field*)** – Jedno pole JSON w danych. Dostępne pod kluczem. Przekazywane jako wejście/wyjście akcji.

**Problem Zarządzania (ang. *Management Problem*)** – Problem występujący w Systemie Zarządzanym, który System Sterowania ma za cel rozwiązać.

**Projektant (ang. *Designer*)** – Jednostka użytkownika odpowiedzialna jedynie za projekt pętli. Nie musi posiadać umiejętności technicznych, a jedynie posługiwać się notacją LupN.

**Sprzężenie Zwrotne (ang. *Control Feedback*)** – Reprezentacja Stanu Aktualnego wysyłana przez (lub pobierana z) Systemu Zarządzanego.

**Stan Aktualny (ang. *Current State*)** – Obserwowany w danej chwili stan Systemu Zarządzanego. Kontrastuje ze Stanem Pożądanym.

**Stan Pożądany (ang. *Desired State*)** – Pożądany stan obserwowany w Systemie Zarządzanym, który System Sterowania próbuje osiągnąć. Zazwyczaj można go wywieść z Problemu Zarządzania.

**System Sterowania (ang. *Control System*)** – System odpowiedzialny za rozwiązanie

Problemu Zarządzania w Systemie Zarządzanym za pomocą Zamkniętej Pętli Sterowania. Lupus aspiruje do tej roli.

**System Zarządzany (ang. *Managed System*)** – Dowolny system w posiadaniu Użytkownika, w którym występuje Problem Zarządzania.

**Użytkownik (ang. *User*)** – Organizacja lub indywidualność, która ma za cel użyć Lupus w celu rozwiązyania Problemu Zarządzania w swoim Systemie Zarządzanym. W zespole użytkownika potrzebne są kompetencje programistyczne (do wdrożenia agentów translacji oraz elementów zewnętrznych), a także wyróżnia się rolę Projektanta.

**Wdrożenie Lupus (ang. *Lupus deployment, Lupus usage or Lupus application*)** – Pojęcie dotyczące rozwiązywanie Problemu Zarządzania przez Użytkownika w danym Systemie Zarządzanym.

**Workflow Akcji (ang. *Actions Workflow*)** – *Workflow* złożone z Akcji w pojedynczym Elementie Lupus. Interpretowane przez Operator Zasobu Element .

**Workflow Pętli (ang. *Loop Workflow*)** – *Workflow* złożone z Elementów Pętli. Musi realizować Logikę Pętli.

**Zamknięta Pętla Sterowania (ang. *Closed Control Loop*)** – Sposób, w jaki Lupus jako System Sterowania rozwiązuje Problem Zarządzania.

## Załącznik 2. Instalacja Luples

Specyfikacja w formie elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/luples/blob/master/docs/installation.md>.

### 2.1. Przedsłowie

Instalacja **Luples** wymaga umiejętności technicznych oraz podstawowej znajomości operacyjnej Kubernetes.

**Luples** jest zaimplementowany jako projekt Kubebuilder<sup>24</sup>. Zalecanym sposobem instalacji **Luples** jest sklonowanie tego repozytorium i przyjęcie roli dewelopera tego projektu.

Nie istnieje coś takiego jak instalacja **Luples** w tradycyjnym rozumieniu, np. jako pakiet systemowy w systemie operacyjnym. Możliwe jest natomiast zarejestrowanie **Zasobów Własnych** dla **Elementów Luples** w klastrze Kubernetes i uruchomienie dla nich **Kontrolerów**. Niniejszy załącznik opisuje właśnie taki proces.

### 2.2. Wymagania wstępne

**Użytkownik** musi posiadać działający klaster Kubernetes. Może to być Minikube<sup>25</sup>, zainstalowany silnik kontenerów (ang. *container engine*) (np. Docker<sup>26</sup>) oraz język Go<sup>27</sup>.

#### 2.2.1. Instalacja Kubebuilder

Instrukcja dostępna pod adresem: <https://book.kubebuilder.io/quick-start>.

### 2.3. Klonowanie repozytorium

**Listing 17.** Klonowanie repozytorium

```
git clone https://github.com/0x41gawor/luples  
cd luples
```

### 2.4. Instalacja CRD w klastrze

Niniejsze polecenie zastosuje **CRD** (pl. Definicje **Zasobów Własnych**) dla **Master** i **Element**, umożliwiając ich użycie.

**Listing 18.** Instalacja CRD

```
make install
```

<sup>24</sup><https://book.kubebuilder.io>

<sup>25</sup><https://minikube.sigs.k8s.io/docs/>

<sup>26</sup><https://docs.docker.com>

<sup>27</sup><https://go.dev>

## 2.5. Uruchomienie kontrolerów

Niniejsze polecenie uruchomi *kontrolery* dla *zasobów własnych master i element*.

### Listing 19. Uruchomienie kontrolerów

```
make run
```

Istnieje możliwość uruchomienia kontrolerów jako pody w klastrze Kubernetes. W tym celu użytkownik jest zaproszony do bliższego zapoznania się z platformą Kubebuilder. Dopóki **Użytkownik** jest pewien, że nie będzie dopisywał **Funkcji Użytkownika** nie jest to zalecane podejście.

## Załącznik 3. Specyfikacja notacji LupN

Specyfikacja w formie elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/lupus/blob/master/docs/spec/lupn.md>.

**LupN** (od ang. *loop* oraz *Notation*) to język/notacja służąca do wyrażania **Workflow Pętli**. Nie zawiera opisu **Części Obliczeniowej Logiki Pętli**. **Część Obliczeniowa** jest określona poza **Lupus**, w **Elementach Zewnętrznych**.

LupN specyfikuje:

- **Workflow Pętli**, czyli workflow **Elementów Lupus**,
- odniesienia do **Elementów Zewnętrznych**, wyrażone jako **Destynacje**,
- **Workflow Akcji** w ramach **Elementu Lupus**,
- odniesienie (lub odniesienia) do **Agenta Egress** jako **Destynacja**.

Można zauważyc iż, LupN wyraża **workflow** na dwóch poziomach: globalnym (czyli **Workflow Elementów Lupus**) oraz wewnątrz **Elementu Lupus** (czyli **Workflow Akcji**). Możliwości obu poziomów są do siebie zbliżone, ale ostatecznie różne. Ten załącznik omówi również tę kwestię.

Z punktu widzenia implementacji **Plik LupN** to w rzeczywistości *YAML manifest file* dla *Zasobu Własnego Master*. Po zaaplikowaniu (ang. *apply*), **Operator Zasobu Master** uruchamia **Elementy Lupus**, które realizują wyrażone **Workflow Pętli**.

LupN wyraża **Workflow Pętli** poprzez specyfikację różnych obiektów w notacji YAML. Obiekty te nazwano **Obiektami LupN**. Załącznik 3 specyfikuje te obiekty oraz relacje między nimi. Wskazuje również, co oznacza użycie każdego z nich w kontekście **Workflow Pętli** i jak **Operator Zasobu Element** interpretuje je w czasie działania.

Obiekty YAML w **Pliku LupN** są pochodnymi struktur Go, dlatego **Obiekty LupN** możemy opisać na ich podstawie.

Wymagane jest wcześniejsze zapoznanie się z formatem YAML. Załącznik nie obejmuje translacji dokonywanej przez Kubernetes między strukturami Go a reprezentacjami obiektów YAML. Serializacja jest wykonywana przez controller-gen i opisana w *Kubebuilder Book*. Tłumaczenie to można łatwo zaobserwować i nauczyć się, analizując przykłady zamieszczone w repozytorium projektu: <https://github.com/0x41gawor/lupus/tree/master/examples>. Dodatkowo, w Załączniku 11 zamieszczono krótkie komentarze pliku LupN wykorzystywanego w teście platformy opisany w rozdziale 5.

### 3.1. Możliwości LupN

Ze względu na różnice implementacyjne węzłów omówione w podrozdziale 4.3.5, możliwości Workflow Pętli oraz Workflow Akcji różnią się od siebie. Sekwencja wykonawcza elementów jest definiowana poprzez obiekty next. Każdy element definiuje listę następnych elementów. Zazwyczaj jest to jeden element. Możliwe są rozgałęzienia (ang. *forks*) czyli lista z większą ilością elementów, ale wtedy zostaje wywołane wiele elementów niezależnie. Nie ma możliwości na zsynchronizowane powrotne złączenie przepływu danych. W przypadku akcji stosowany jest ten sam mechanizm opierający się na definiowaniu następnej akcji, z tym, że tutaj może być ona tylko jedna. Flow akcji interpretowane jest

bowiem przez kontroler elementu, który procesuje je po jednej na raz. Z tego powodu możliwe jest sterowanie przepływem (ang. *flow control*), które zostało zaimplementowane jako specjalny typ akcji - switch.

### 3.2. Specyfikacja

Plik **LupN** posiada 4 główne pola (ang. *top-level fields*).

**Listing 20.** Główne pola pliku LupN

```
apiVersion: lupus.gawor.io/v1
kind: Master
metadata:
  labels:
    app.kubernetes.io/name: lupus
    app.kubernetes.io/managed-by: kustomize
  name: lola
spec:
  <lupn-objects>
```

Każde z nich musi być ustawione jak w 20 oprócz `metadata.name`, to pole odróżnia instancje pętli między sobą w obrębie klastra Kubernetes.

Notacja LupN rozpoczyna się od pola `spec`. Każdy obiekt Lupn zostanie opisany poprzez swoją definicję w Go.

#### 3.2.1. Drzewo obiektów LupN

Podczas przeglądania specyfikacji **obiektów LupN** pomocne będzie śledzenie aktualnej pozycji w drzewie zależności obiektów.

#### 3.2.2. MasterSpec

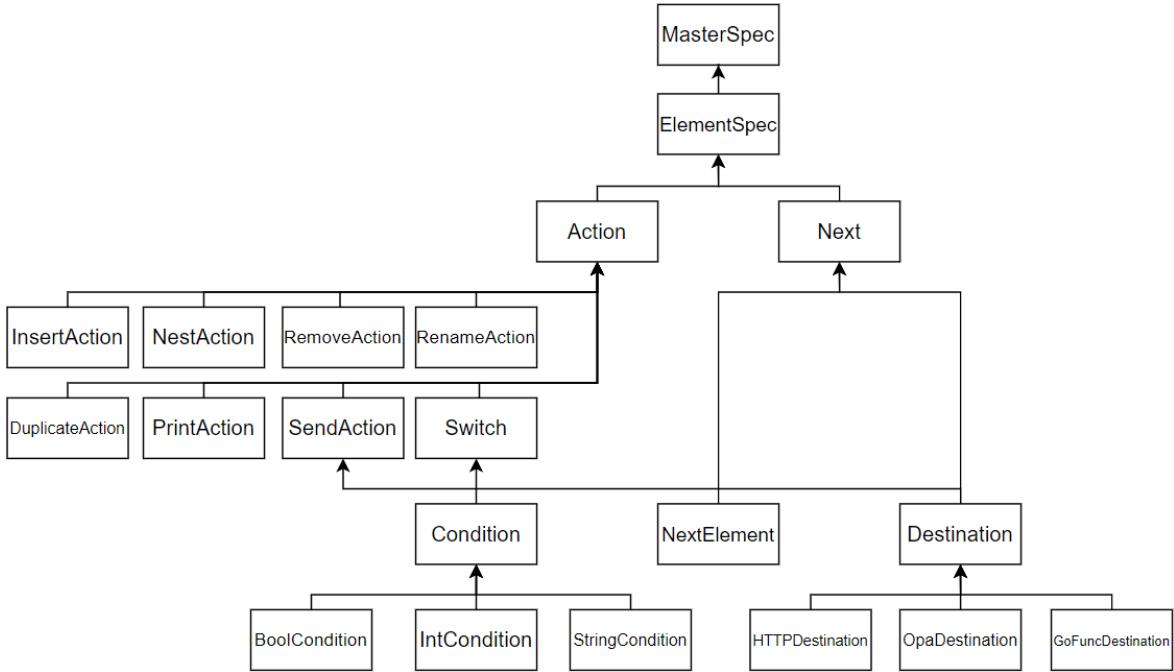
**Listing 21.** MasterSpec

```
// MasterSpec defines the desired state of Master
type MasterSpec struct {
    // Name of the Master CR (indicating the name of the loop)
    Name string `json:"name"`
    // Elements is a list of Luples-Elements
    Elements []ElementSpec `json:"elements"`
}
```

Każdy element na liście `Elements` spowoduje, że **Operator Zasobu Master** stworzy obiekt API typu **Lupus Element**.

#### 3.2.3. ElementSpec

**Listing 22.** MasterSpec



**Rysunek 3.1.** Drzewko zależności obiektów LupN. Źródło: Opracowanie własne.

```

// ElementSpec defines the desired state of Element
type ElementSpec struct {
    // Name is the name of the element, its distinct from Kubernetes API Object name,
    // but rather serves ease of management aspect for loop-designer
    Name string `json:"name"`
    // Descr is the description of the lupus-element, same as Name it serves as
    // the ease of management aspect for loop-designer
    Descr string `json:"descr"`
    // Actions is a list of Actions that lupus-element has to perform
    Actions []Action `json:"actions,omitempty"`
    // Next is a list of next objects (can be lupus-element or external-element)
    // to which send the final-data
    Next []Next `json:"next,omitempty"`
    // Name of master element (used as prefix for lupus-element name)
    Master string `json:"master,omitempty"`
}
  
```

### 3.2.4. Next

#### Listing 23. Next

```

// Next specifies the next loop-element in a loop workflow,
// it may be either lupus-element or reference to an external-element
// It allows to forward the whole final-data, but also parts of it
type Next struct {
    // Type specifies the type of next loop-element, lupus-element (element)
    // or external-element (destination)
    Type string `json:"type"\u00d7kubebuilder:"validation:Enum=element,destination"`
    // List of input keys (Data fields) that have to be forwarded
    // Pass array with single element '*' to forward the whole input
    Keys []string `json:"keys"`
    // One of the fields below is not null
    Element     *NextElement `json:"element,omitempty"\u00d7kubebuilder:"validation:Optional"`
    Destination *Destination `json:"destination,omitempty"\u00d7kubebuilder:"validation:Optional"`
}
  
```

### 3.2.5. NextElement

#### Listing 24. NextElement

```
// NextElement indicates the next loop-element
```

```

// in loop-workflow of type lupus-element
type NextElement struct {
    // Name is the lupus-name of lupus-element
    // (the one specified in Element struct)
    Name string ‘json：“name”’
}

```

### 3.2.6. Destination

**Listing 25.** Destination

```

// Destination represents an external-element
// It holds all the info needed to make a call to an external-element
// It supports calls to HTTP server, Open Policy Agent or user-functions
type Destination struct {
    // Type specifies if the external element is: a HTTP server in general,
    // a special kind of HTTP server like Open Policy Agent or internal, a user-function
    Type string ‘json：“type”’kubebuilder：“validation:Enum=http;opa;gofunc”
    // One of these fields is not null depending on a Type
    HTTP *HTTPDestination ‘json：“http,omitempty”’kubebuilder：“validation:Optional”
    Opa *OpaDestination ‘json：“opa,omitempty”’kubebuilder：“validation:Optional”
    GoFunc *GoFuncDestination ‘json：“gofunc,omitempty”’kubebuilder：“validation:Optional”
}

```

### 3.2.7. HTTPDestination

**Listing 26.** HTTPDestination

```

// HTTPDestination defines fields specific to a HTTP type
// This is information needed to make a HTTP request
type HTTPDestination struct {
    // Path specifies HTTP URI
    Path string ‘json：“path”’
    // Method specifies HTTP method
    Method string ‘json：“method”’
}

```

### 3.2.8. OpaDestination

**Listing 27.** OpaDestination

```

// OpaDestination defines fields specific to Open Policy Agent type
// This is information needed to make an Open Policy Agent request
// Call to Opa is actually a special type of HTTP call
type OpaDestination struct {
    // Path specifies HTTP URI, since method is known
    Path string ‘json：“path”’
}

```

### 3.2.9. GoFuncDestination

**Listing 28.** GoFuncDestination

```
// GoFuncDestination defines fields specific to GoFunc type
// This is information needed to call an user-function
type GoFuncDestination struct {
    // Name specifies the name of the function
    Name string `json:"name"`
}
```

### 3.2.10. Action

**Listing 29.** Action

```
// Action represents operation that is performed on Data
// Action is used in Element spec. Element has a list of Actions
// and executes them in a workflow manner
// In general, each action has an input and output keys that define
// which Data fields it has to work on
// Each action indicates the name of the next Action in Action Chain
// There is special type - Switch. Actually, it does not perform any operation on Data,
// but rather controls the flow of Actions chain
type Action struct {
    // Name of the Action, it is for designer to ease the management of the Loop
    Name string `json:"name"`
    // Type of Action
    Type string `json:"type"`
    kubebuilder:"validation:Enum=send,nest,remove,rename,duplicate,print,insert,switch"
    // One of these fields is not null depending on a Type.
    Send     *SendAction      `json:"send,omitempty"`
    Nest    *NestAction      `json:"nest,omitempty"`
    Remove  *RemoveAction   `json:"remove,omitempty"`
    Rename  *RenameAction   `json:"rename,omitempty"`
    Duplicate *DuplicateAction `json:"duplicate,omitempty"`
    Print   *PrintAction    `json:"print,omitempty"`
    Insert  *InsertAction   `json:"insert,omitempty"`
    Switch  *Switch         `json:"switch,omitempty"`
    // Next is the name of the next action to execute, in the case of Switch-type action it stands as a default branch
    Next string `json:"next"`
}
```

Pole Next, oprócz nazw akcji, może przyjąć jedną z dwóch zdefiniowanych wartości. Wartość final oznacza, że postać **Danych** po tej akcji jest już w swojej **Finalnej Postaci** i musi zostać przekazana do następnego **Elementu Lupus**. Wartość exit oznacza nagłe zaniechanie aktualnej iteracji **Pętli Sterowania** (zazwyczaj wskutek błędu).

### 3.2.11. SendAction

**Listing 30.** SendAction

```
// SendAction is used to make call to external-element
// Element's controller obtains a data field using InputKey,
// and attaches it as a json body when performing a call to destination.
// Response is saved in data under an OutputKey
type SendAction struct {
    InputKey    string      `json:"inputKey"`
    Destination Destination `json:"destination"`
    OutputKey   string      `json:"outputKey"`
}
```

### 3.2.12. InsertAction

**Listing 31.** InsertAction

```
// InsertAction is used to make a new field and insert value to it
// Normally new fields are created as an outcome of other types of actions
// It is useful in debugging or logging,
// e.g. can indicate the path taken by the actions workflow
type InsertAction struct {
    OutputKey string "json:\"outputKey\""
    Value     runtime.RawExtension "json:\"value\""
}
```

### 3.2.13. NestAction

**Listing 32.** NestAction

```
// NestAction is used to group a number of data-fields together.
// Element's controllers gather fields indicated by InputKeys list
// and nest them in a new field under an OutputKey.
type NestAction struct {
    InputKeys []string "json:\"inputKeys\""
    OutputKey string "json:\"outputKey\""
}
```

### 3.2.14. RemoveAction

**Listing 33.** RemoveAction

```
// RemoveAction is used to delete a data-field.
// Elements' controllers remove fields indicated by the list InputKeys
type RemoveAction struct {
    InputKeys []string "json:\"inputKeys\""
}
```

### 3.2.15. RenameAction

**Listing 34.** RenameAction

```
// RenameAction is used to change the name of a data-field.
// InputKey indicates a field to be renamed
// OutputKey is the new field name.
type RenameAction struct {
    InputKey string "json:\"inputKey\""
    OutputKey string "json:\"outputKey\""
}
```

### 3.2.16. DuplicateAction

**Listing 35.** DuplicateAction

```
// DuplicateAction is used to make a copy of a data-field.  
// InputKey indicates the field of which value has to be copied.  
// OutputKey indicates the field to which values have to be pasted in.  
type DuplicateAction struct {  
    InputKey string ‘json：“inputKey”’  
    OutputKey string ‘json：“outputKey”’  
}
```

### 3.2.17. PrintAction

**Listing 36.** PrintAction

```
// PrintAction is used to print the value of each field  
// indicated by InputKeys in a controller’s console.  
// It is useful in debugging or logging.  
type PrintAction struct {  
    InputKeys []string ‘json：“inputKeys”’  
}
```

### 3.2.18. Switch

**Listing 37.** Switch

```
// Switch is a special type of action used for flow-control  
// When Element’s controller encounters switch action on the chain  
// it emulates the work of a switch known in other programming languages  
type Switch struct {  
    Conditions []Condition ‘json：“conditions”’  
}
```

### 3.2.19. Condition

**Listing 38.** Condition

```
// Condition represents a single condition present in Switch action  
// It defines on which Data field it has to be performed,  
// the actual condition to be evaluated,  
// and the next Action if evaluation returns true.  
type Condition struct {  
    // Key indicates the Data field that has to be retrieved  
    Key string ‘json：“key”’  
    // Operator defines the comparison operation, e.g. eq, ne, gt, lt  
    Operator string ‘json：“operator”’kubebuilder：“validation:Enum=eq,ne,gt,lt”’  
    // Type specifies the type of the value: string, int, float, bool  
    Type string ‘json：“type”’kubebuilder：“validation:Enum=string,int,float,bool”’  
    // One of these fields is not null depending on a Type.  
    BoolCondition *BoolCondition ‘json：“bool,omitempty”’kubebuilder：“validation:Optional”’  
    IntCondition *IntCondition ‘json：“int,omitempty”’kubebuilder：“validation:Optional”’  
    StringCondition *StringCondition ‘json：“string,omitempty”’kubebuilder：“validation:Optional”’  
    // Next specifies the name of the next action to execute if evaluation returns true
```

```
    Next string `json:"next"`
}
```

### 3.2.20. BoolCondition

**Listing 39.** BoolCondition

```
// BoolCondition defines a boolean-specific condition
type BoolCondition struct {
    Value bool `json:"value"`
}
```

### 3.2.21. IntCondition

**Listing 40.** IntCondition

```
// IntCondition defines an integer-specific condition
type IntCondition struct {
    Value int `json:"value"`
}
```

### 3.2.22. StringCondition

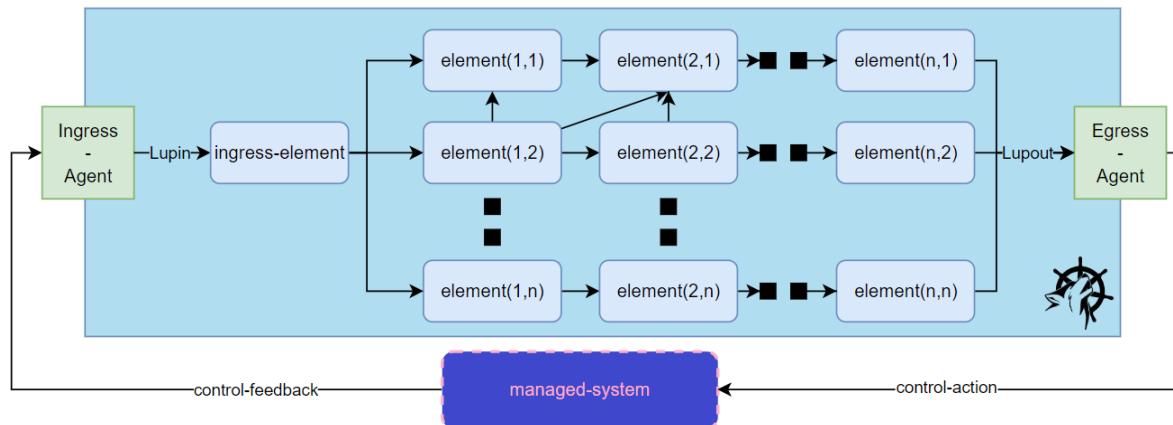
**Listing 41.** StringCondition

```
// StringCondition defines a string-specific condition
type StringCondition struct {
    Value string `json:"value"`
}
```

## Załącznik 4. Specyfikacja interfejsów Lupus

Specyfikacja w formie elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gavor/lupus/blob/master/docs/spec/lupin-lupout.md>.

### 4.1. Architektura



Rysunek 4.1. Architektura Lupus. Źródło: Opracowanie własne.

### 4.2. Interfejs Lupin

**Projektant** może zdefiniować wiele **Elementów Lupus**, połączonych na różne, skomplikowane sposoby. Musi jednak zdecydować, który z nich zostanie wywołany przez **Agenta Ingress**. Taki element można nazwać **Elementem Ingress**. **Lupus** zaleca posiadanie tylko jednego **Elementu Ingress**.

Jeśli **Agent Ingress** chce zasygnalizować, że można zaobserwować nowy stan **Systemu Zarządzanego** (co oznacza, że musi zostać uruchomiona nowa iteracja **Pętli Sterowania**), musi zmodyfikować pole **Status . Input** w *obiekcie API Elementu Ingress*. Wartość umieszczona w tym polu będzie reprezentować nowy **Stan Aktualny**.

Pole **Status . Input** w **Ingress Element CR** jest typu **RawExtension**, co oznacza, że podlega pod specyfikację **Danych** (Załącznik 5).

JSON przesłany w tym miejscu będzie stanowił **Dane** dla tego elementu.

Oprogramowanie implementuje interfejs Lupin, jeśli w pewnym miejscu swojego kodu wysyła żądanie HTTP do **kube-api-server**, które aktualizuje status **Elementu Ingress**, a dokładniej pole **input**. Wartość musi być obiektem JSON, który reprezentuje **Aktualny Stan Systemu Zarządzanego**.

### 4.3. Interfejs Lupout

Punktem wyjścia z **Systemu Sterowania Lupus** jest ostatni **Element Lupus**, czyli **Element Egress**. Wysyła on swoje **Finalne Dane** (lub ich część) do **Agenta Egress**. **Agent Egress** musi przekształcić to wejście w **Akcję Sterowania**, wykonywaną bezpośrednio na **Systemie Zarządzanym**.

Oprogramowanie implementuje interfejs Lupout, jeśli implementuje serwer HTTP, który akceptuje wejściowe **Dane** w formacie JSON i tłumaczy je na **Akcję Sterowania**, wykonywaną na **Systemie Zarządzanym**.

## Załącznik 5. Specyfikacja obiektu danych

Specyfikacja w formie elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gavor/lupus/blob/master/docs/spec/data.md>.

**Dane** są kluczowym elementem spełnienia Wymagania 5. **Dane** to sposób, w jaki **Użytkownik**, podczas każdej iteracji, może:

- uzyskać informacje o **Aktualnym Stanie**,
- przechowywać pomocnicze informacje (takie jak odpowiedzi od **Elementów Zewnętrznych**),
- przechowywać informacje debuggingowe,
- zapisywać informacje potrzebne do sformułowania **Akcji Sterowania**.

**Dane** są reprezentowane jako JSON dający się zapisać w strukturze Go `map[string] interface{}`. Nie mogą, więc być jedną z następujących form obiektu JSON:

- typem prymitywnym,
- tablicą,
- obiektem JSON z kluczami innymi niż `string`.

To, w jaki sposób można operować na **Danych**, prezentuje specyfikacja akcji (Załącznik 6).

Kluczowym pojęciem jest **Pole Danych**. Jest to pojedyncze pole JSON dostępne pod danym kluczem. Jest jednostką operacyjną danych. Przekazywane jako wejście lub wyjście akcji.

Parametry kluczowe wejściowe lub wyjściowe akcji akceptują znak \*. Jego użycie wskazuje na przekazanie całego obiektu danych jako wejście/wyjście do/z akcji. Dodatkowo też klucze wejściowe/wyjściowe akcji wspierają zagnieżdżanie pól za pomocą operatora kropki (.).

## Załącznik 6. Specyfikacja akcji

Specyfikacja w formie elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/lupus/blob/master/docs/spec/actions.md>.

Specyfikacja **Akcji** w **LupN** znajduje się w Załączniku 3. Niniejszy załącznik prezentuje przykładowe działanie **Akcji na Danych**.

**Akcje** zostały opracowane jako najbardziej atomowe operacje, które, gdy zostaną odpowiednio połączone, stanowią narzędzie umożliwiające **Projektantowi Pętli** pełne operowanie na **Danych**.

Czasami operacja, która na pierwszy rzut oka wydaje się atomowa, wymaga użycia dwóch połączonych **Akcji**. Z drugiej strony, zdarza się, że operacja początkowo uznana za atomową okazuje się jedynie szczególnym przypadkiem bardziej ogólnej operacji. Dobrym przykładem jest nieistniejąca już **Akcja concat**. Została ona zaprojektowana do łączenia dwóch pól w jedno, jednak okazało się, że jest to specyficzny przypadek **Akcji nest**, w której lista InputKey zawiera tylko dwa elementy.

### 6.1. Podział ogólny

Zdefiniowano 8 typów akcji:

- **Send**
- **Nest**
- **Remove**
- **Rename**
- **Duplicate**
- **Insert**
- **Print**
- **Switch**

Wśród, których można wyróżnić następujące kategorie:

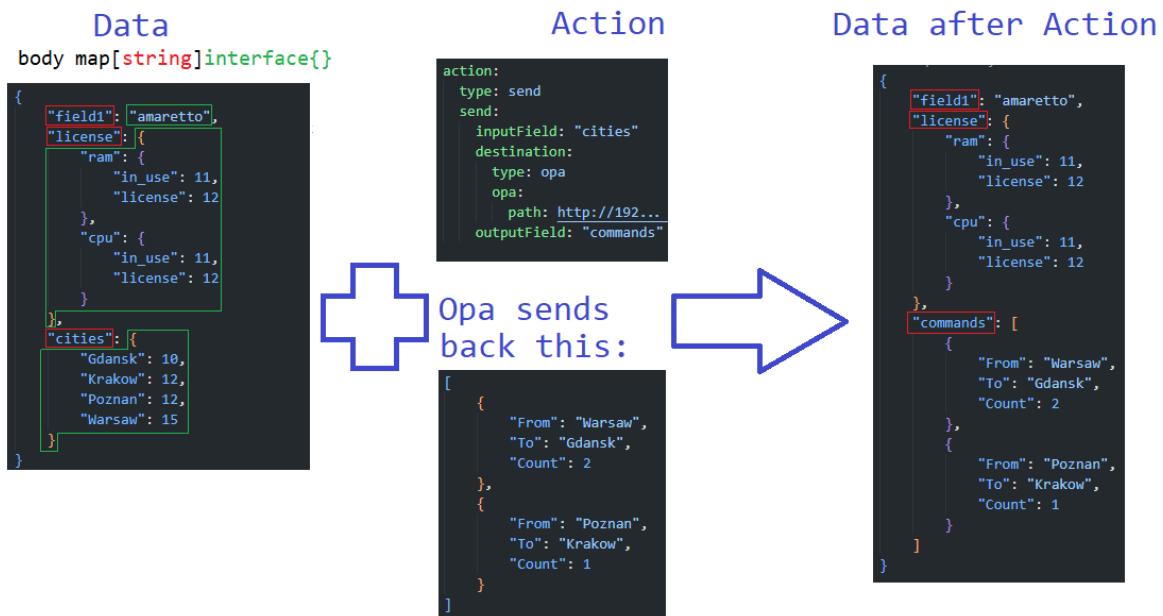
- 6 akcji, które mogą być używane do modyfikacji danych:  
{Send, Nest, Remove, Rename, Duplicate, Insert}
- 1 akcja do komunikacji z **Elementami Zewnętrznymi**:  
{Send}
- 2 akcje do debugowania:  
{Insert, Print}
- 1 akcja do logowania:  
{Print}
- 1 akcja do sterowania przepływem **workflow akcji**:  
{Switch}

### 6.2. Przykłady

Załącznik przedstawi przykładowe użycie sześciu akcji, które mogą modyfikować dane. Każdy przykład zawiera:

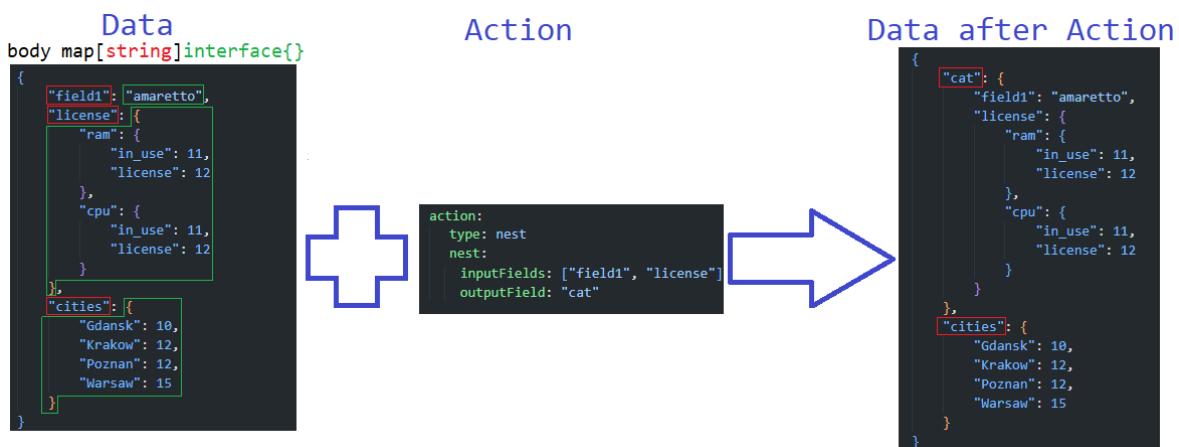
- reprezentację JSON stanu **danych** przed modyfikacją akcji,
- notację **LupN** zastosowanej akcji,
- reprezentację JSON stanu **danych** po modyfikacji akcji

### 6.2.1. Send

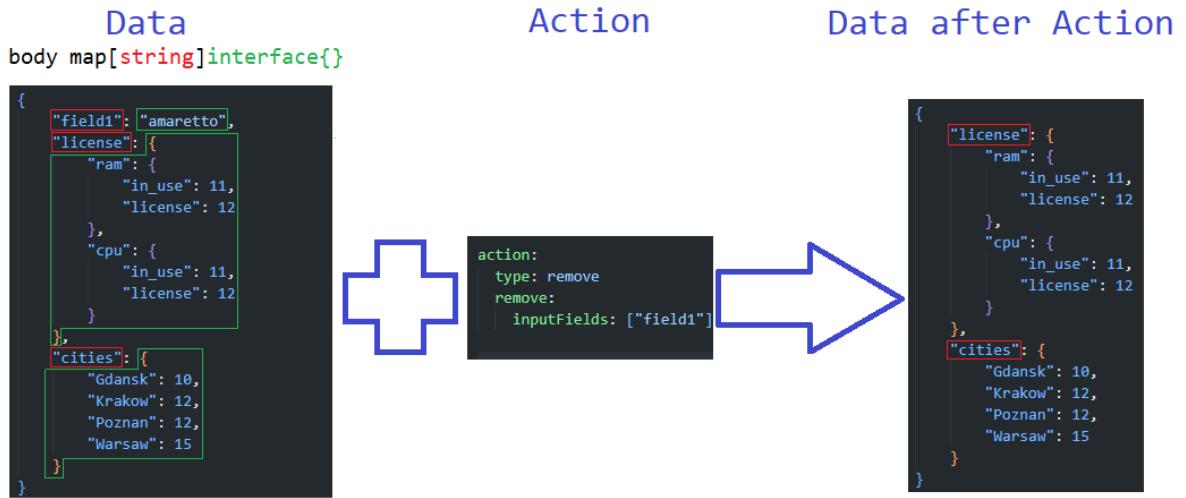


Rysunek 6.1. Przykład modyfikacji danych przez akcje Send. Źródło: Opracowanie własne.

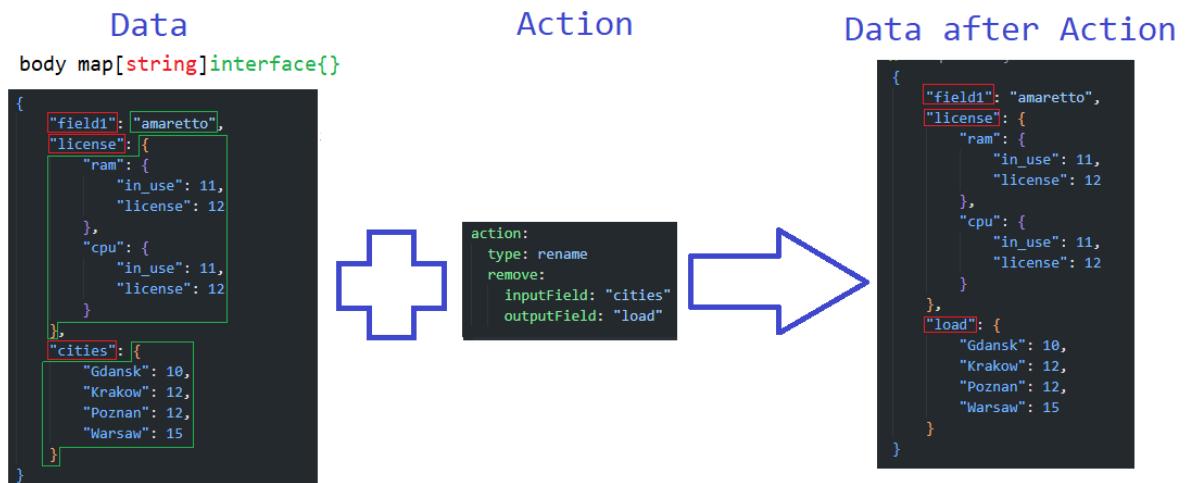
### 6.2.2. Nest



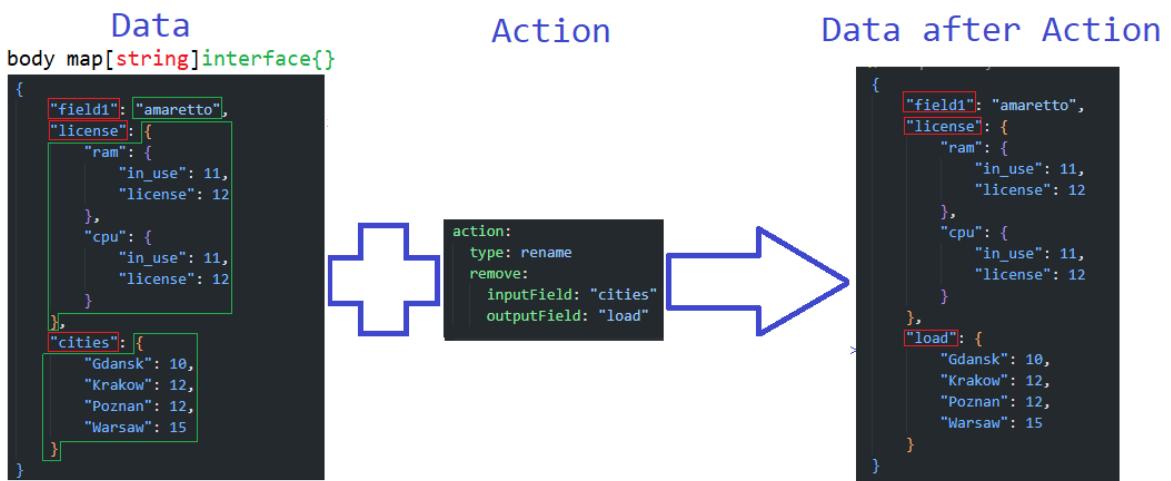
Rysunek 6.2. Przykład modyfikacji danych przez akcje Nest. Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 6.3. Przykład modyfikacji danych przez akcje Remove. Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 6.4. Przykład modyfikacji danych przez akcje Rename. Źródło: Opracowanie własne.



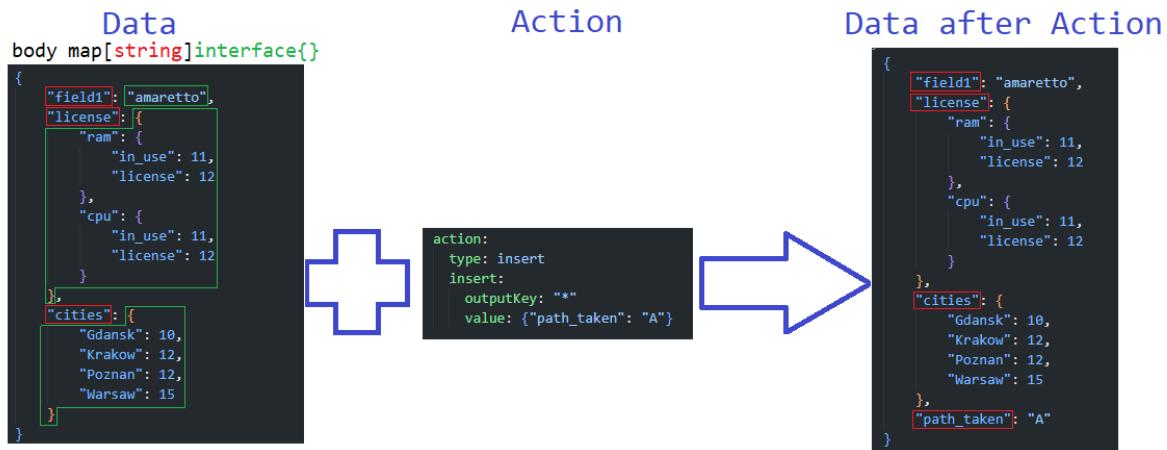
Rysunek 6.5. Przykład modyfikacji danych przez akcje Duplicate. Źródło: Opracowanie własne.

### 6.2.3. Remove

### 6.2.4. Rename

### 6.2.5. Duplicate

### 6.2.6. Insert



Rysunek 6.6. Przykład modyfikacji danych przez akcje Insert. Źródło: Opracowanie własne.

## Załącznik 7. Kod Agenta Ingress

Kod w wersji elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/lupus/blob/master/examples/open5gs/sample-loop/ingress-agent.py>

**Listing 42. Kod Agenta Ingress**

```
from kubernetes import client, config
import argparse
import time
import json
from datetime import datetime
import subprocess
from kubernetes.client import CustomObjectsApi
from flask import Flask, request, jsonify
from threading import Thread

# Load Kubernetes configuration
config.load_kube_config()

# Kubernetes API clients
core_v1_api = client.CoreV1Api()
apps_v1_api = client.AppsV1Api()

import logging
log = logging.getLogger('werkzeug')
log.setLevel(logging.ERROR)

global interval
round = 0

def get_pods_by_deployment_prefix(prefix):
    try:
        # List all deployments in the current namespace
        deployments = apps_v1_api.list_deployment_for_all_namespaces(watch=False)
        matching_deployments = [d for d in deployments.items if d.metadata.name.startswith(prefix)]
        # Find all pods associated with matching deployments
        pods = core_v1_api.list_pod_for_all_namespaces(watch=False)
        deployment_pod_map = {}
        for deployment in matching_deployments:
            filtered_pods = []
            for pod in pods.items:
                if pod.metadata.owner_references:
                    for owner in pod.metadata.owner_references:
                        if owner.kind == "ReplicaSet" and owner.name.startswith(deployment.metadata.name):
                            filtered_pods.append(pod)
            deployment_pod_map[deployment.metadata.name] = filtered_pods
    return deployment_pod_map
    except client.rest.ApiException as e:
        print(f"Exception when calling Kubernetes API: {e}")
        return {}

def get_pod_resources(pod):
    containers = pod.spec.containers
    resource_info = []
    for container in containers:
        resources = container.resources
        resource_info.append({
            "container_name": container.name,
            "requests": resources.requests or {},
            "limits": resources.limits or {},
        })
    return resource_info

def get_pod_actual_usage(pod_name, namespace):
    try:
        # Use kubectl top to fetch actual usage (requires metrics-server installed)
        result = subprocess.run([
            ["kubectl", "top", "pod", pod_name, "-n", namespace, "--no-headers"],
            stdout=subprocess.PIPE,
            stderr=subprocess.PIPE,
            text=True
        ])
        if result.returncode == 0:
            usage_data = result.stdout.strip().split()
            if len(usage_data) >= 3:
                return {
                    "cpu": usage_data[1],
                    "memory": usage_data[2],
                }
            else:
    
```

```

        print(f"Error fetching actual usage for pod {pod_name}: {result.stderr}")
        return {}
    except Exception as e:
        print(f"Error running kubectl top for pod {pod_name}: {e}")
        return {}

def get_json_data():
    deployment_prefix = "open5gs-upf"
    deployment_pod_map = get_pods_by_deployment_prefix(deployment_prefix)
    metrics = {}

    for deployment_name, pods in deployment_pod_map.items():
        # Initialize deployment entry in metrics
        metrics[deployment_name] = {
            "requests": {},
            "limits": {},
            "actual": {}
        }

    for pod in pods:
        pod_name = pod.metadata.name
        namespace = pod.metadata.namespace

        # Resource requests and limits
        resource_info = get_pod_resources(pod)
        for container_info in resource_info:
            metrics[deployment_name]["requests"] = container_info["requests"]
            metrics[deployment_name]["limits"] = container_info["limits"]

        # Actual resource usage
        actual_usage = get_pod_actual_usage(pod_name, namespace)
        metrics[deployment_name]["actual"] = actual_usage

    return json.dumps(metrics)

def send_to_kube(state):
    custom_objects_api = CustomObjectsApi() # Use CustomObjectsApi to interact with CRDs
    try:
        # Retrieve the custom resource
        observe = custom_objects_api.get_namespaced_custom_object(
            group="lupus.gawor.io",
            version="v1",
            namespace='default',
            plural="elements",
            name='lola-demux'
        )

        # Update the 'status.input' field with the state
        observe_status = observe.get('status', {})
        observe_status['input'] = json.loads(state) # Convert JSON string to an object
        observe_status['lastUpdated'] = datetime.utcnow().isoformat() + "Z" # Proper ISO 8601 format

        # Update the custom resource's status
        custom_objects_api.patch_namespaced_custom_object_status(
            group="lupus.gawor.io",
            version="v1",
            namespace='default',
            plural="elements",
            name='lola-demux',
            body={"status": observe_status} # Send only the 'status' field
        )
        print("Updated Kubernetes custom resource successfully.")
    except Exception as e:
        print(f"Error updating custom resource: {e}")

def periodic_task():
    json_data = get_json_data()
    timestamp = datetime.utcnow().strftime('%Y/%m/%d %H:%M:%S')
    global round
    round = round + 1
    print(timestamp + " Round: " + str(round) + "\n" + json_data)
    send_to_kube(json_data)

app = Flask(__name__)

@app.route('/api/interval', methods=['POST'])
def update_interval():
    global interval
    try:
        data = request.get_json()
        if "value" in data and isinstance(data["value"], int) and data["value"] > 0:
            interval = data["value"]
            return jsonify({"message": "Interval updated successfully", "new_interval": interval}), 200
        else:
            return jsonify({"error": "Invalid input. 'value' must be a positive integer."}), 400
    except:
        return jsonify({"error": "Error occurred while processing the request."}), 500

```

```

except Exception as e:
    return jsonify({"error": str(e)}), 500

if __name__ == "__main__":
    parser = argparse.ArgumentParser(description='PeriodicK8sMetricsFetcher')
    parser.add_argument('--interval', type=int, default=60, help='Interval in seconds for periodic task')
    args = parser.parse_args()

    # Declare that you are modifying the global variable
    interval = args.interval

    # Start Flask server in a separate thread
    flask_thread = Thread(target=lambda: app.run(host='0.0.0.0', port=9000, debug=False, use_reloader=False))
    flask_thread.daemon = True
    flask_thread.start()

    while True:
        periodic_task()
        time.sleep(interval)

```

## Załącznik 8. Kod Agenta Egress

Kod w wersji elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/lupus/blob/master/examples/open5gs/sample-loop/egress-agent.py>

**Listing 43. Kod Agenta Egress**

```
from flask import Flask, request, jsonify
from kubernetes import client, config
from kubernetes.client.rest import ApiException

app = Flask(__name__)

# Load Kubernetes config (use kubeconfig if running locally, in-cluster config if running in a cluster)
try:
    config.load_incluster_config()
except:
    config.load_kube_config()

# Function to patch deployment resources
def patch_deployment_resources(namespace, deployment_name, resource_type, cpu, memory):
    try:
        api_instance = client.AppsV1Api()

        # Define the patch
        patch = {
            "spec": {
                "template": {
                    "spec": {
                        "containers": [
                            {
                                "name": "upf",
                                "resources": {
                                    "resource_type.split(".")[-1]: { # Extract "requests" or "limits"
                                        "cpu": cpu,
                                        "memory": memory
                                    }
                                }
                            }
                        ]
                    }
                }
            }
        }

        # Patch the deployment
        api_response = api_instance.patch_namespaced_deployment(name=deployment_name, namespace=namespace, body=patch)
        return api_response

    except ApiException as e:
        return str(e)

import requests

def send_interval_request(url: str, value: int):
    headers = {
        "Content-Type": "application/json"
    }
    data = {
        "value": value
    }
    try:
        response = requests.post(url, json=data, headers=headers)
        response.raise_for_status() # Raise an exception for HTTP errors
        return response.json()
    except requests.RequestException as e:
        print(f"Request failed: {e}")
        return None

@app.route('/api/data', methods=['POST'])
def get_data():
    data = request.get_json()
    print(data)
    if "spec" in data:
        deployment_name = data.get('name')
        namespace = 'open5gs'
        lim_cpu = data['spec'][['limits']].get('cpu')
        lim_ram = data['spec'][['limits']].get('memory')
        req_cpu = data['spec'][['requests']].get('cpu')
        req_ram = data['spec'][['requests']].get('memory')
```

```
res1 = patch_deployment_resources(namespace, deployment_name, 'resources.limits', lim_cpu, lim_ram)
res2 = patch_deployment_resources(namespace, deployment_name, 'resources.requests', req_cpu, req_ram)

if "interval" in data:
    interval = data['interval']
    response = send_interval_request("http://192.168.56.112:9000/api/interval", interval)

return jsonify({"res": "ok"})

if __name__ == '__main__':
    app.run(host='0.0.0.0', port=9001)
```

## Załącznik 9. Kod Elementów Zewnętrznych

Kod w wersji elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/lupus/blob/master/examples/open5gs/sample-loop/opa.py>

**Listing 44. Kod Elementów Zewnętrznych**

```
from flask import Flask, request, jsonify

app = Flask(__name__)

# Hardcoded default values
DEFAULT_VALUES = {
    "requests": {
        "memory": "128Mi",
        "cpu": "100m"
    },
    "limits": {
        "memory": "256Mi",
        "cpu": "250m"
    }
}

# ----- Parsing Helpers -----
def parse_cpu(cpu_str: str) -> int:
    """
    Convert a CPU string to an integer representing millicores.

    Examples:
    "300m" -> 300
    "2" -> 2000 (interpreted as 2 CPU cores -> 2000 millicores)
    "1.5" -> 1500
    """
    cpu_str = cpu_str.strip().lower()
    if cpu_str.endswith("m"):
        # e.g. "300m" -> 300
        numeric_part = cpu_str[:-1] # remove "m"
        return int(float(numeric_part))
    else:
        # e.g. "2" -> 2000, "1.5" -> 1500
        return int(float(cpu_str) * 1000)

def parse_memory(mem_str: str) -> int:
    """
    Convert a memory string to an integer representing megabytes (MB).

    Examples:
    "300Mi" -> 300
    "1Gi" -> 1024
    "1024Ki" -> 1
    "512" -> 512 (no unit, assume MB)
    """
    mem_str = mem_str.strip()
    lower_str = mem_str.lower()

    if lower_str.endswith("mi"):
        # e.g. "300Mi"
        numeric_part = lower_str.replace("mi", "")
        return int(float(numeric_part))
    elif lower_str.endswith("gi"):
        # e.g. "2Gi" -> 2 * 1024 = 2048
        numeric_part = lower_str.replace("gi", "")
        return int(float(numeric_part) * 1024)
    elif lower_str.endswith("ki"):
        # e.g. "1024Ki" -> 1024 / 1024 = 1
        numeric_part = lower_str.replace("ki", "")
        return int(float(numeric_part) / 1024)
    else:
        # e.g. "512" -> 512
        return int(float(lower_str))

# ----- Comparison Helpers -----
def is_higher_cpu(actual_cpu_str, default_cpu_str) -> bool:
    """
    Return True if actual_cpu_str is higher than default_cpu_str (in millicores).
    """
    return parse_cpu(actual_cpu_str) > parse_cpu(default_cpu_str)

def is_higher_memory(actual_mem_str, default_mem_str) -> bool:
    """
    Return True if actual_mem_str is higher than default_mem_str (in MB).
    """
    return parse_memory(actual_mem_str) > parse_memory(default_mem_str)
```

```

def is_default_cpu(actual_cpu_str, default_cpu_str) -> bool:
    """Return True if actual == default (in millicores)."""
    return parse_cpu(actual_cpu_str) == parse_cpu(default_cpu_str)

def is_default_memory(actual_mem_str, default_mem_str) -> bool:
    """Return True if actual == default (in MB)."""
    return parse_memory(actual_mem_str) == parse_memory(default_mem_str)

# ----- Core Logic -----
def determine_point(data):
    """
    Determine the operational point type:

    1. NORMAL
        - actual < default_values['requests'] for both cpu, memory

    2. NORMAL_TO_CRITICAL
        - requests == default_values['requests']
        - limits == default_values['limits']
        - actual > default_values['requests'] for cpu or memory

    3. CRITICAL
        - actual, requests, limits are ALL higher than the defaults
        (at least one field of each is higher than the default)

    4. CRITICAL_TO_NORMAL
        - requests, limits are above their defaults
        - actual is below the default (requests) for both cpu, memory
    """

    # Extract input values
    req_cpu_str = data["requests"]["cpu"]
    req_mem_str = data["requests"]["memory"]
    lim_cpu_str = data["limits"]["cpu"]
    lim_mem_str = data["limits"]["memory"]
    act_cpu_str = data["actual"]["cpu"]
    act_mem_str = data["actual"]["memory"]

    # Extract defaults
    def_req_cpu = DEFAULT_VALUES["requests"]["cpu"]
    def_req_mem = DEFAULT_VALUES["requests"]["memory"]
    def_lim_cpu = DEFAULT_VALUES["limits"]["cpu"]
    def_lim_mem = DEFAULT_VALUES["limits"]["memory"]

    # 1. NORMAL: actual < default_values.requests (cpu & mem)
    condition_normal = (not is_higher_cpu(act_cpu_str, def_req_cpu) and
                        not is_higher_memory(act_mem_str, def_req_mem))

    # 2. NORMAL_TO_CRITICAL:
    #     - requests == default (cpu & mem)
    #     - limits == default (cpu & mem)
    #     - actual > default.requests for cpu or memory
    condition_normal_to_critical = (
        is_default_cpu(req_cpu_str, def_req_cpu) and
        is_default_memory(req_mem_str, def_req_mem) and
        is_default_cpu(lim_cpu_str, def_lim_cpu) and
        is_default_memory(lim_mem_str, def_lim_mem) and
        (
            is_higher_cpu(act_cpu_str, def_req_cpu) or
            is_higher_memory(act_mem_str, def_req_mem)
        )
    )

    # 3. CRITICAL:
    #     - actual is higher than default requests (cpu or mem)
    #     - requests is higher than default requests (cpu or mem)
    #     - limits is higher than default limits (cpu or mem)
    condition_critical = (
        (is_higher_cpu(act_cpu_str, def_req_cpu) or is_higher_memory(act_mem_str, def_req_mem)) and
        (is_higher_cpu(req_cpu_str, def_req_cpu) or is_higher_memory(req_mem_str, def_req_mem)) and
        (is_higher_cpu(lim_cpu_str, def_lim_cpu) or is_higher_memory(lim_mem_str, def_lim_mem))
    )

    # 4. CRITICAL_TO_NORMAL:
    #     - requests, limits are above defaults
    #     - actual is below default.requests for cpu & mem
    #     => requests > default, limits > default, actual < default
    condition_critical_to_normal = (
        (is_higher_cpu(req_cpu_str, def_req_cpu) or is_higher_memory(req_mem_str, def_req_mem)) and
        (is_higher_cpu(lim_cpu_str, def_lim_cpu) or is_higher_memory(lim_mem_str, def_lim_mem)) and
        (not is_higher_cpu(act_cpu_str, def_req_cpu)) and
        (not is_higher_memory(act_mem_str, def_req_mem))
    )

    # Decide which point applies in priority order
    if condition_critical:
        return "CRITICAL"

```

```

        elif condition_normal_to_critical:
            return "NORMAL_TO_CRITICAL"
        elif condition_critical_to_normal:
            return "CRITICAL_TO_NORMAL"
        elif condition_normal:
            return "NORMAL"
        else:
            # Fallback if no exact condition matched
            return "NORMAL"

def _int_mul(value: int, factor: float) -> int:
    """
    Multiplies an integer by a float factor and returns an int.
    E.g. _int_mul(100, 1.2) -> 120
    """
    return int(value * factor)

def _cpu_to_str(millicores: int) -> str:
    """
    Format an integer millicore value back into a string with the 'm' suffix.
    E.g. 120 -> '120m'
    """
    return f"{millicores}m"

def _mem_to_str(megabytes: int) -> str:
    """
    Format an integer MB value back into a string with the 'Mi' suffix.
    E.g. 256 -> '256Mi'
    """
    return f"{megabytes}Mi"

def generate_spec(actual: dict) -> dict:
    """
    Given something like:
    actual = {"cpu": "110m", "memory": "18Mi"}
    Return a dict of the form:
    {
        "spec": {
            "requests": {"cpu": "...", "memory": "..."},
            "limits": {"cpu": "...", "memory": "..."}
        }
    }
    Where each CPU/memory is either scaled from actual (if above defaults)
    or uses the default value (if at or below defaults).
    """
    # Parse default values
    def_req_cpu = parse_cpu(DEFAULT_VALUES["requests"]["cpu"])
    def_req_mem = parse_memory(DEFAULT_VALUES["requests"]["memory"])
    def_lim_cpu = parse_cpu(DEFAULT_VALUES["limits"]["cpu"])
    def_lim_mem = parse_memory(DEFAULT_VALUES["limits"]["memory"])

    # Parse actual values
    actual_cpu = parse_cpu(actual["cpu"])
    actual_mem = parse_memory(actual["memory"])

    # ----- CPU logic -----
    if actual_cpu > def_req_cpu:
        requests_cpu = _int_mul(actual_cpu, 1.2)
        limits_cpu = _int_mul(actual_cpu, 2.4)
    else:
        requests_cpu = def_req_cpu
        limits_cpu = def_lim_cpu

    # ----- Memory logic -----
    if actual_mem > def_req_mem:
        requests_mem = _int_mul(actual_mem, 1.2)
        limits_mem = _int_mul(actual_mem, 2.4)
    else:
        requests_mem = def_req_mem
        limits_mem = def_lim_mem

    return {
        "result": {
            "requests": {
                "cpu": _cpu_to_str(requests_cpu),
                "memory": _mem_to_str(requests_mem)
            },
            "limits": {
                "cpu": _cpu_to_str(limits_cpu),
                "memory": _mem_to_str(limits_mem)
            }
        }
    }

# ----- Flask Endpoints -----
@app.route("/v1/data/policy/point", methods=["POST"])

```

```

def logic_endpoint():
    data = request.get_json(force=True)
    point = determine_point(data['input'])
    return jsonify({"result": point})

@app.route("/v1/data/policy/spec", methods=["POST"])
def spec_endpoint():
    data = request.get_json(force=True)
    actual = data['input']
    spec_obj = generate_spec(actual)
    return jsonify(spec_obj)

@app.route("/v1/data/policy/interval", methods=["POST"])
def interval_endpoint():
    data = request.get_json(force=True)
    point_value = data['input']
    if point_value in ("NORMAL_TO_CRITICAL", "CRITICAL"):
        interval = "HIGH"
    else:
        interval = "LOW"

    return jsonify({"result": interval})

if __name__ == "__main__":
    # Run the Flask app. You can also set a different port, debug mode, etc.
    app.run(host="0.0.0.0", port=9500, debug=True)

```

## Załącznik 10. Kod LupN

Kod w wersji elektronicznej znajduje się pod linkiem: <https://github.com/0x41gawor/lupus/blob/master/examples/open5gs/sample-loop/master.yaml>

**Listing 45.** Kod LupN

```
1 apiVersion: lupus.gawor.io/v1
2 kind: Master
3 metadata:
4   labels:
5     app.kubernetes.io/name: lupus
6     app.kubernetes.io/managed-by: kustomize
7   name: lola
8 spec:
9   name: "lola"
10  elements:
11    - name: "demux"
12      descr: "Demuxes_Data_input_into_separate_elements_for_each_UPF"
13      actions:
14        - name: "insert1"
15          type: insert
16          insert:
17            outputKey: "open5gs-upf1"
18            value: {name: "open5gs-upf1"}
19            next: "insert2"
20        - name: "insert2"
21          type: insert
22          insert:
23            outputKey: "open5gs-upf2"
24            value: {name: "open5gs-upf2"}
25            next: "print"
26        - name: "print"
27          type: print
28          print:
29            inputKeys: [ "*" ]
30            next: final
31      next:
32        - type: element
33        element:
34          name: "upf1"
35          keys: [ "open5gs-upf1" ]
36        - type: element
```

```

37      element:
38          name: "upf2"
39          keys: [ "open5gs-upf2" ]
40      - name: "upf1"
41          descr: "Reconciliation_of_UPF1_deployment"
42          actions:
43              - name: "print1"
44                  type: print
45                  print:
46                      inputKeys: [ "*" ]
47                      next: "opa-point"
48                  - name: "opa-point"
49                      type: send
50                      send:
51                          inputKey: "*"
52                          destination:
53                              type: opa
54                              opa:
55                                  path: http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/point
56                                  outputKey: "point"
57                                  next: "print2"
58                  - name: "print2"
59                      type: print
60                      print:
61                          inputKeys: [ "*" ]
62                          next: "switch1"
63                  - name: "switch1"
64                      type: switch
65                      switch:
66                          conditions:
67                              - key: "point"
68                                  operator: eq
69                                  type: string
70                                  string:
71                                      value: "NORMAL"
72                                      next: final
73                                      next: "opa-spec"
74                  - name: "opa-spec"
75                      type: send
76                      send:
77                          inputKey: "actual"
78                          destination:

```

```

79          type: opa
80          opa:
81              path: http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/spec
82              outputKey: "spec"
83              next: "print3"
84          - name: "print3"
85              type: print
86              print:
87                  inputKeys: ["*"]
88                  next: "switch2"
89          - name: "switch2"
90              type: switch
91              switch:
92                  conditions:
93                      - key: "point"
94                          operator: eq
95                          type: string
96                          string:
97                              value: "CRITICAL"
98                              next: final
99                  next: "print4"
100             - name: "print4"
101                 type: print
102                 print:
103                     inputKeys: ["*"]
104                     next: "opa-interval"
105             - name: "opa-interval"
106                 type: send
107                 send:
108                     inputKey: "point"
109                     destination:
110                         type: opa
111                         opa:
112                             path: http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/interval
113                             outputKey: "interval"
114                             next: "print5"
115                         - name: "print5"
116                             type: print
117                             print:
118                                 inputKeys: ["*"]
119                                 next: final
120             next:

```

```

121     - type: destination
122         destination:
123             type: http
124             http:
125                 path: http://192.168.56.112:9001/api/data
126                 method: POST
127                 keys: [ "*" ]
128     - name: "upf2"
129         descr: "Reconciliation_of_UPF2_deployment"
130         actions:
131             - name: "print"
132                 type: print
133                 print:
134                     inputKeys: [ "*" ]
135                     next: "opa-point"
136             - name: "opa-point"
137                 type: send
138                 send:
139                     inputKey: "*"
140                     destination:
141                         type: opa
142                         opa:
143                             path: http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/point
144                             outputKey: "point"
145                             next: "print2"
146             - name: "print2"
147                 type: print
148                 print:
149                     inputKeys: [ "*" ]
150                     next: "switch1"
151             - name: "switch1"
152                 type: switch
153                 switch:
154                     conditions:
155                         - key: "point"
156                             operator: eq
157                             type: string
158                             string:
159                                 value: "NORMAL"
160                                 next: final
161             next: "opa-spec"
162             - name: "opa-spec"

```

```

163     type: send
164     send:
165         inputKey: "actual"
166         destination:
167             type: opa
168             opa:
169                 path: http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/spec
170                 outputKey: "spec"
171                 next: "print3"
172             - name: "print3"
173                 type: print
174                 print:
175                     inputKeys: [ "*" ]
176                     next: "switch2"
177             - name: "switch2"
178                 type: switch
179                 switch:
180                     conditions:
181                         - key: "point"
182                             operator: eq
183                             type: string
184                             string:
185                                 value: "CRITICAL"
186                                 next: final
187                                 next: "print4"
188             - name: "print4"
189                 type: print
190                 print:
191                     inputKeys: [ "*" ]
192                     next: "opa-interval"
193             - name: "opa-interval"
194                 type: send
195                 send:
196                     inputKey: "point"
197                     destination:
198                         type: opa
199                         opa:
200                             path: http://192.168.56.112:9500/v1/data/policy/interval
201                             outputKey: "interval"
202                             next: "print5"
203             - name: "print5"
204                 type: print

```

```
205     print:
206         inputKeys: [ "*" ]
207         next: final
208     next:
209         - type: destination
210             destination:
211                 type: http
212                 http:
213                     path: http://192.168.56.112:9001/api/data
214                     method: POST
215             keys: [ "*" ]
```

## **Załącznik 11. Funkcje Menadżera Zamkniętych Pętli**

Załącznik specyfikuje funkcjonalności realizowane przez komponent architektury CLA-DRA o nazwie Menadżer Zamkniętych Pętli, który jest odpowiedzialny za ich zarządzanie. Tabela pozostała w języku angielskim w oryginalnej formie jak w [14].

#	Function	Description
Fx.01	Define Closed Loop	Provides the capability to define a closed loop based on a distinct name, goal, and detailed requirements (policies, actions required, impact entities, etc.).
Fx.02	Design Closed Loop	Enables the input of workflows, actions, and control flows that configure and realize a named closed loop for defined goals. Can be applied to existing or new loops.
Fx.03	Deploy Closed Loop	Registers a closed loop in a closed loop manager so that it can be controlled by a closed loop controller (instantiate, terminate, monitor, remove, secure).
Fx.04	Instantiate Closed Loop	Creates another instance of an existing closed loop at runtime, including initializing and starting it.
Fx.05	Monitor Closed Loops	Tracks a closed loop throughout its lifecycle.
Fx.06	Terminate Closed Loops	Stops or terminates a running closed loop instance, either abruptly or gracefully. Includes reporting on impact.
Fx.07	Remove Closed Loop	Decommissions a closed loop and nullifies its existence in a closed loop management system or platform.
Fx.08	Discover Closed Loop	Identifies and automatically discovers closed loops within the scope of a closed loop management system or platform.
Fx.09	Secure Closed Loop	Assigns security restrictions, such as access control, and manages security concerns, such as vulnerabilities.
Fx.10	Administer Closed Loop	Manages and applies changes to a closed loop, including policy assignments, modifications, and state alterations.
Fx.11	Validate Closed Loop	Ensures the validity or accuracy of the design, deployment, and security of closed loops by incorporating real-life data and environments.
Fx.12	Store Closed Loop	Stores closed loops to support design and other functions.
Fx.13	Control Closed Loop	Controls closed loops, including calling other functions and managing segment changes, monitoring, troubleshooting, and maintenance.
Fx.14	Configure Closed Loop	(Re)configures parameters of a closed loop instance.
Fx.15	Expose Closed Loop	Announces closed loops with information about dependencies.
Fx.16	Orchestrate Closed Loops	Plans and arranges the launch of closed loops.
Fx.17	Pause Closed Loop	Pauses a closed loop function due to scheduling, troubleshooting, etc.
Fx.18	Resume Closed Loop	Resumes a closed loop function after resolving scheduling conflicts or troubleshooting.