

Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki

Kurs: Media transmisyjne (CBEK00007P)

Tytuł projektu:

3. Projekt sieci dostępu radiowego dla budynku
szkoły

Wrocław, 2020

1. Spis treści

Spis treści	2
1. Wprowadzenie do tematyki projektu	3
2. Podstawowe pojęcia	3
3. Problemy projektowania sieci bezprzewodowych w środowisku wewnątrzbudynkowym	4
4. Plan budynku i schemat ideologiczny sieci	6
5. Charakterystyka poszczególnych standardów 802.11x oraz pasm częstotliwości	8
6. Bilans energetyczny łącza radiowego	13
Zysk	13
Moc	14
Straty	14
Obliczanie bilansu energetycznego łącza radiowego dla projektu	15
7. Analiza modeli propagacyjnych dla przyjętych parametrów	17
Model propagacji w wolnej przestrzeni	17
Model jednościeżkowy (1SM)	18
Model liniowy (LAM)	19
Model Motleya-Keenana	20
Model Multi-Wall	21
Porównanie modeli	22
8. Rozmieszczenie punktów dostępowych	23
9. Model dostępu do sieci i zabezpieczenia	25
10. Wybór urządzeń sieciowych i okablowania	28
11. Szacunkowe koszty wykonania sieci	30
12. Podsumowanie	31

1. Wprowadzenie do tematyki projektu

Obecnie cały rozwinięty świat jest „opieczony” sieciami bezprzewodowymi. Z każdym następnym krokiem w dowolnym mieście możemy się połączyć z nową siecią WLAN. Szacuje się, że obecnie jest na świecie około 24 miliardy urządzeń, korzystających z samego tylko WiFi¹, gdzie jeszcze 6 lat temu było to tylko lub aż 4 miliardy². Pokazuje to jak gwałtownie i szybko rozwija się ta dziedzina, a to jeszcze przed czasami Internet of Things, który wniesie to na wyższy – trudny do oszacowania poziom. Sieć bezprzewodowa pełni bardzo ważną funkcję w „hierarchii” dla użytkownika, gdyż jest najbardziej przyjazna przeciętnemu użytkownikowi, nie potrzeba żadnych kabli lub złączy, jedynym wymaganiem to to, by być w zasięgu punktu dostępowego oraz posiadać urządzenie przystosowane do funkcjonowania w danej technologii. Dlatego więc w niniejszym projekcie przedstawimy przykład implementacji sieci bezprzewodowej w szkole. Zostaną poruszone problemy z jakimi trzeba się zmierzyć, projektując sieć bezprzewodową w środowisku wewnątrzbudynkowym. Przybliżymy czytelnikom standardy IEEE oraz podstawę projektowania łącz względem wymagań energetycznych czyli bilans energetyczny. Skupimy się na analizie modeli propagacyjnych oraz postaramy się wybrać jak najbardziej optymalne wartości i odpowiadającym im urządzeniom spełniające zadane przez sytuację warunki, by korzystanie z naszej sieci było najbardziej komfortowe dla użytkowników. Błędem byłoby pominiecie aspektu bezpieczeństwa, więc kolejnym krokiem będzie prezentacja sposobu, w jaki ów sieć zabezpieczyliśmy. Oczywiście na końcu pojawi się oszacowany kosztorys całego przedsięwzięcia, by uzmysłowić czytelnikowi w jakich widelkach się waha cena za taką usługę.

2. Podstawowe pojęcia

Sieć - siecią będziemy nazywać infrastrukturę połączonych ze sobą hostów za pomocą pewnego medium transmisyjnego

¹ <https://fon.com/fon-wifi-infographic/>

² Ibidem

Host – urządzenie końcowe posiadające swój unikalny adres IP i uczestniczące w wymianie danych w sieci, w której się znajduje. Może to być na przykład komputer, laptop, smartfon, drukarka itp.

Medium transmisyjne – nośnik dzięki któremu będą przenoszone sygnały w sieci. W naszym przypadku będziemy korzystać z fal elektromagnetycznych oraz skrętki miedzianej

Serwer – oprogramowanie komputerowe oferujące usługi innym hostom

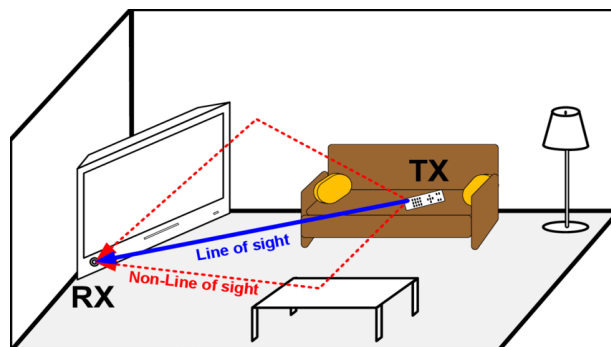
Urządzenia dostępne – urządzenia łączące ze sobą hosty, czyli na przykład router lub punkt dostępowy

Adres IP – adres identyfikujący hosta w danej sieci

3. Problemy projektowania sieci bezprzewodowych w środowisku wewnątrzbudynkowym

Charakteryzowanie wewnątrzbudynkowych sieci bezprzewodowych różni się od pozostałych modeli ze względu, iż działamy w mikro skali. Więc nie musimy wiedzieć czym są strefy Fresnela, jak się sygnał propaguje w czasie deszczu i jak odbija się od poszczególnych stref atmosfery. Badając modele we wspomnianym mikroświecie, będziemy zmagać się z problemami niższej skali, co nie implikuje, że jest to prostsze, ponieważ takie środowisko jest o wiele bardziej szczegółowe i na przykład takie pozornie błahe rzeczy jak ciągi klimatyzacyjne czy okablowanie może mieć niemały wpływ na końcowy rezultat, ale z powodu charakterystyki budynku, jaką przyjęliśmy, nie powinny one utrudniać propagacji fal. Największy wpływ na rozchodzenie się sygnału ma rozkład wszelkiego rodzaju przeszkód. Najlepiej jest zapewnić warunek LOS (ang. line-of-sight), czyli bezpośrednia widoczność hosta z punktem dostępowym. Niestety nie jest to często możliwe i będziemy mieć do czynienia z warunkiem NLOS (ang. non-line-of-sight), co oznacza że pomiędzy urządzeniem dostępowym a końcowym jest przeszkoda. Z tego względu kluczowymi tutaj są właściwości poszczególnych materiałów, które stają na drodze sygnałowi. Niektóre z nich mogą się charakteryzować właściwościami ekranującymi i tym samym wspomaga propagację wielodrogową, czyli odbieranie 2 lub więcej sygnałów przez odbiornik, co powodować interferencję jak i zanikanie

fali i przez to dziury w zasięgu. Lub może mieć właściwości tłumienne, co niweluje energię fali i implikuje mniejszą propagację. Ciekawym rozwiązaniem jest wykorzystanie efektu falowodowego do propagacji³, innymi słowy traktujemy korytarz wzdłuż



Rys. SEQ Rysunek 1* ARABIC 1 Przykład różnych warunków propagacji.

Źródło: https://www.researchgate.net/figure/An-example-of-multipath-propagation-in-indoor-environment_fig2_224240135

którego nadajemy jako falowód, pozwala to nam przesyłać sygnał na dłuższe odległości. Kolejnym ważnym aspektem wartym wypunktowania jest również gładkość ścian oraz podatność ich wspomnianych wyżej właściwości na różne czynniki takie jak na przykład temperatura czy wilgotność. Również należy zwracać uwagę na takie rzeczy, jak meble w danych pokojach lub inne urządzenia (np. telewizor), generujące fale elektromagnetyczne i mogące powodować zakłócenia. Wartym wspomnienia jest jeszcze fakt, że projektując w danym budynku taką sieć należałoby uwzględnić ludzi i ich liczebność, gdyż w pustym korytarzu propagacja może być zupełnie inna, niż w zatłoczonym podczas przerwy. Niestety, powyższe przeszkody są złożone i zmienne, przez co trudno oszacować konkretnie ich wpływ na zachowanie sygnału, dlatego w obliczeniach postanowiliśmy użyć nieco bardziej pesymistycznych parametrów, aby zasymulować ewentualne przeszkody.

Widzimy zatem, że pomniejszając skalę narażamy się na szereg innych komplikacji, często trudnych do opisanie matematycznie, dlatego najlepszą metodą wyznaczenia wiarygodnych właściwości propagacyjnych w budynku jest metoda empiryczna, czyli zbadanie rzeczywistych parametrów sygnału w konkretnych miejscach budynku i stworzenie oddzielnego modelu propagacyjnego.

Z oczywistych względów nie mieliśmy do dyspozycji prawdziwego budynku szkolnego oraz stosownego sprzętu do empirycznych pomiarów, dlatego postanowiliśmy stworzyć

³ R. Katulski – „Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej”, WKŁ

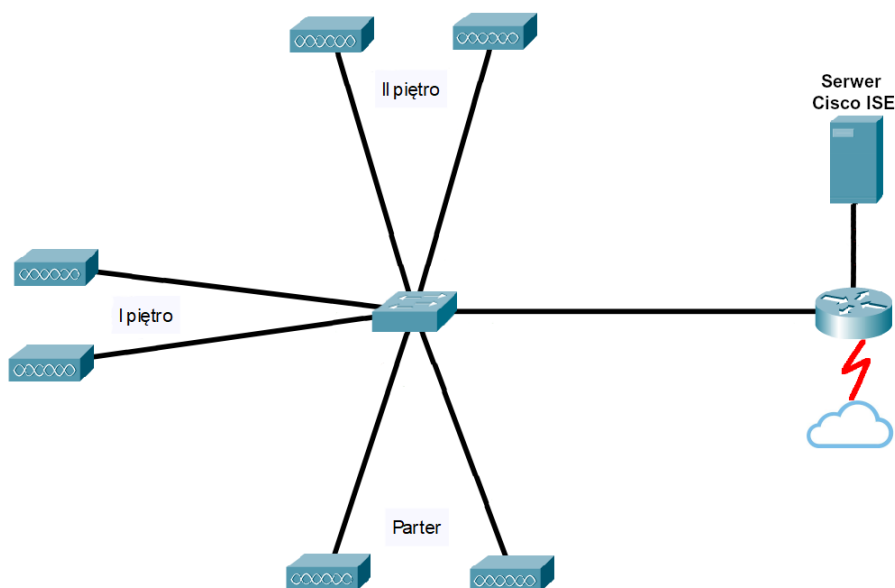
hipotetyczny budynek o realistycznych właściwościach. Składa się on z trzech kondygnacji o wymiarach i rozkładzie takim, jak na poniższych grafikach.

4. Plan budynku i schemat ideologiczny sieci



Dla lepszego zobrazowania naszej koncepcji na instalację sieciową, postanowiliśmy stworzyć ideowy schemat projektowanej sieci. Dokładne modele wykorzystanych urządzeń, ich parametry i rozmieszczenie zostaną podane w dalszej części dokumentu, po stosownych wyliczeniach.

Jako centralę naszej sieci przyjmujemy pomieszczenie „Serwerownia” na I piętrze, oznaczone na planie piętra kolorem zielonym. Takie umiejscowienie centrali pozwoli na zoptymalizowanie długości wykorzystanych połączeń przewodowych między przełącznikiem, a punktami dostępowymi. W pomieszczeniu będzie znajdował się router, przełącznik oraz serwer odpowiedzialny za regulowanie dostępu do sieci. Zakładamy, że do szkoły jest doprowadzony szerokopasmowy Internet o satysfakcjonującej przepustowości, do którego podłączamy router.



5. Charakterystyka poszczególnych standardów 802.11x oraz pasm częstotliwości

Jest to podgrupa standardów IEEE 802 opisujących warstwę fizyczną i podwarstwę MAC bezprzewodowych sieci lokalnych. Standardy 802.11 stanowią podstawę certyfikatów Wi-Fi. Czasami określenia 802.11 używa się też w stosunku do pierwszego standardu z tej rodziny.

W 1997 roku pojawił się pierwszy standard 802.11 (bez dodatkowych liter) o przepustowości 1-2 Mb/s. Medium w 802.11 miało być promieniowanie podczerwone oraz wykorzystywany w przemyśle i medycynie zakres częstotliwości 2,4 GHz. Podczerwień się jednak nie przyjęła.

Pierwszym powszechnie zaakceptowanym standardem był 802.11b.

IEEE 802.11b

Rok powstania	1999
Pasmo[Ghz]	2,4
Ilość kanałów	14*
Szerokość kanału[Mhz]	22
Prędkość maksymalna[Mb/s]	11
Zasięg bez przeszkód[m]	140
Zasięg z przeszkodami[m]	35

**Kanał 14. powstał specjalnie do zastosowań w Japonii i tylko tam może być wykorzystywany(ciekawostka)*

Spektrum 802.11b jest podzielone na maksymalnie 14 kanałów o szerokości 22 MHz każdy. Kolejne kanały zachodzą na siebie nawzajem – tylko trzy kanały nie pokrywają się 1. 6. i 11.. Zastosowana modulacja kwadraturowa pozwala na odseparowanie danych użytecznych zarówno od zakłóceń losowych jak i pochodzących od nadajników pracujących na częściowo pokrywających się częstotliwościach. W Polsce można wykorzystywać pasmo(od 2400,0 do 2483,5 MHz,) czyli od kanału 1 do 13.

Odpowiednie anteny kierunkowe pozwalają osiągać zasięg do 8km lub nawet 40 kilometrów. Przeprowadzano nawet testy, w których połączenie 802.11b pracowało poprawnie na dystansie 120 km.

IEEE 802.11a

Rok powstania	1999
Pasmo[Ghz]	5
Ilość kanałów	12
Szerokość kanału[Mhz]	25
Prędkość maksymalna[Mb/s]	54
Zasięg bez przeszkód[m]	120
Zasięg z przeszkodami[m]	35

Urządzenia komunikują się za pomocą transmisji radiowej, która odbywa się na paśmie o częstotliwościach: 5,15 – 5,35 GHz oraz 5,725 – 5,825 GHz. Niski zasięg standardu 802.11a rekompensuje praca na paśmie o częstotliwości 5 GHz, które jest mniej obciążone, a co za tym idzie, nasza sieć jest mniej podatna na zakłócenia, powodowane np. przez bezprzewodowe telefony czy kuchenki mikrofalowe. Specyfikacja 802.11a oferuje 12 kanałów o szerokości 25Mhz, które nie zachodzą na siebie.

Modulacją stosowaną w standardzie 802.11a jest OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - ortogonalne wielokrotnianie w dziedzinie częstotliwości), która skutecznie zmniejsza zakłócenia.

IEEE 802.11g

Rok powstania	2003
Pasmo[Ghz]	2,4
Ilość kanałów	14
Szerokość kanału[Mhz]	22
Prędkość maksymalna[Mb/s]	54
Zasięg bez przeszkód[m]	120
Zasięg z przeszkodami[m]	38

W czerwcu 2003 roku uznano standard 802.11g. Pracuje on podobnie jak 802.11b na częstotliwości 2,4 GHz, ale pozwala na transfer z prędkością 54 Mb/s. Standard 802.11g jest całkowicie zgodny w dół ze standardem 802.11b, jednak wykorzystanie starszych urządzeń powoduje w praktyce redukcję prędkości do 11 Mb/s.

Modulacją stosowaną w standardzie 802.11g jest OFDM, które zostało zapożyczone ze standardu 802.11a z szybkościami transmisji danych 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 i 54 Mb/s oraz modulację CCK (Complementary Code Keying - uzupełniające kluczkowanie kodu - jak w standardzie 802.11b) dla 5,5 i 11 Mb/s oraz modulację DBPSK/DQPSK + DSSS dla 1 i 2 Mb/s. Pomimo, że 802.11g działa w tym samym paśmie częstotliwości co 802.11b, może osiągnąć wyższą prędkość transmisji danych ze względu na swoje „dziedzictwo” z 802.11a.(OFDM)

Specyfikacja 802.11g oferuje 14 kanałów, z czego trzy z nich nie zachodzą na siebie. Urządzenia 802.11g są w pełni kompatybilne wstecz z urządzeniami 802.11b.

Wielu producentów wprowadziło w swoich urządzeniach opcję Super G pozwalającą na łączenie pasma kilku kanałów w jedno. Dzięki wykorzystaniu Super G udało się osiągnąć prędkość 108 Mb/s. (ciekawostka)

IEEE 802.11n

Standard został zatwierdzony w roku 2009. Standard 802.11n pracuje w paśmie częstotliwości 2.4 lub 5.0 GHz i osiąga do 600 Mb/s prędkości. Osiągnięcie takich prędkości możliwe jest dzięki użyciu technologii Multiple Input Multiple Output (MIMO) wykorzystująca wiele anten do nadawania/odbioru sygnału, czyli sygnał jest nadawany z kilku źródeł i odbierany przez kilka odbiorników.

Ponadto urządzenia 802.11n potrafią wykorzystywać wiele kanałów transmisyjnych do stworzenia jednego połączenia, co teoretycznie dodatkowo podwaja dostępną prędkość transmisji. Celem tego standardu jest poprawa przepustowości sieci w porównaniu z dwoma poprzednimi standardami - 802.11a i 802.11g - przy znacznym wzroście maksymalnej prędkości transmisji danych z 54 Mb/s do 72 Mb/s za pomocą pojedynczego strumienia przestrzennego w 20 MHz. Przepustowość, z nadmiarem kodowania przy wykorzystaniu wszystkich anten, sieci 802.11n sięga do 600 Mb/s przy paśmie o szerokości 40 MHz.

Standard 802.11n był pierwszym wykorzystującym dwa układy radiowe obsługujące częstotliwości zarówno 2,4 GHz jak i 5 GHz.

Starsze urządzenia obsługujące jedynie standard B lub G mogą współpracować z ruterem działającym w standardzie N, jednak w takiej sytuacji ruter przełącza się na wolniejsze tempo standardu 802.11a/b/g.

Dla 2,4 GHz

Zakres częstotliwości dla sieci Wi-Fi podzielono na 13 kanałów, ale większość z nich na siebie zachodzi. Do uzyskania pełnej szybkości sieci wymagane jest użycie kanału o podwójnej szerokości(40MHz), a w takim wypadku jedynie dwa kanały (3 i 11) nie będą na siebie wpływać. W każdym innym przypadku kanały będą się wzajemnie zakłócać.

Rok powstania	2009
Pasmo[Ghz]	2,4
Ilość kanałów	13
Prędkość maksymalna[Mb/s]	150
Zasięg bez przeszkód[m]	35
Zasięg z przeszkodami[m]	110

Dla 5 Ghz

W tym zakresie częstotliwości nie ma wielu zakłóceń. 19 kanałów przeznaczonych dla sieci Wi-Fi nie zachodzi na siebie, więc działające na różnych kanałach sieci nie zakłócają się, jak ma to miejsce w wypadku częstotliwości 2,4 GHz.

Pasmo[Ghz]	5
Ilość kanałów	19
Prędkość maksymalna[Mb/s]	600
Zasięg bez przeszkód[m]	35
Zasięg z przeszkodami[m]	90

IEEE 802.11ac

Pomimo niewielkiego zasięgu pasma 5 GHz ruter standardu ac nadaje na większe odległości niż 802.11a/n. Zapewnia to technologia beamforming, która tak jak w nadawaniu kierunkowym tworzy wiązkę sygnału skierowaną w odbiornik.

Technologia AC zamiast 40 MHz wykorzystuje kanały o szerokości 80, a nawet 160 MHz. Co przekłada się na większe prędkości.

Specyfikacja ma przepustowość wielostanowiskową co najmniej 1 gigabit na sekundę (1 Gbit / s) i przepustowość pojedynczego łącza co najmniej 500 megabitów na sekundę (0,5 Gbit / s). Dokonuje się tego poprzez rozszerzenie koncepcji interfejsu radiowego objętego standardem 802.11n : szersze pasmo częstotliwości (do 160 MHz), więcej strumieni przestrzennych MIMO (do ośmiu), oraz modulacja wysokiej gęstości (256QAM), która pozwala to na zakodowanie większej ilości bitów w kanale o takiej samej szerokości.

Z komentarzem [1]: bez "to"

W standardzie 802.11ac, im więcej anten, tym lepiej. Współczesne routery AC przenoszą aktualnie do ośmiu przestrzennych strumieni danych przez cztery anteny równocześnie. Tylko tak można osiągnąć maksymalną przepustowość.

Pierwsza wersja standardu AC została opublikowana w 2013 roku, a druga, ulepszona w 2015 roku. Wersje te są często określane jako Wave 1 i Wave 2, choć nie są to nazwy oficjalne.

	Wave1	Wave2
Rok powstania	2013	2015
Pasmo[Ghz]	5	5
Szerokość kanału	20/40/80	20/40/80/160
Prędkość maksymalna[Mb/s]	1300	2340
Zasięg bez przeszkód[m]	35	35
Zasięg z przeszkodami[m]	130	130

Biorąc pod uwagę wymienione charakterystyki poszczególnych standardów 802.11 oraz własną wiedzę odnośnie powszechności poszczególnych standardów, zdecydowaliśmy się wybrać 802.11n w paśmie 2,4 GHz. N zapewnia satysfakcjonującą przepustowość łącza, odległy zasięg sygnału, a duża ilość kanałów rozwiązuje problemy wzajemnej interferencji. Dodatkowo jest to standard występujący w największej ilości urządzeń (powoli wypierany przez ac) i jest wstecznie kompatybilny. 802.11ac nie wybraliśmy ze względu na oferowane pasmo – zależało nam, aby sieć pracowała w paśmie 2,4 GHz ze względu na lepsze właściwości propagacyjne tego sygnału. Przepustowość łącza dla każdego hosta będzie ograniczona administracyjnie.

6. Bilans energetyczny łącza radiowego

Jest to całkowita ilość mocy pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem. Biorąc pod uwagę straty mocy przez wolną przestrzeń i inne przeszkody, takie jak ściany, można z grubsza oszacować efektywną odległość transmisji i zrozumieć, w jaki sposób różne przeszkody i inne zmiany wpływają na sygnał. Oczywiście obliczenia siły sygnału bezprzewodowego nie są tak proste, **czynniki** takie jak kierunkowość anteny, wydajność nadajnika, odbicie, rozproszenie, dyfrakcja i warunki środowiskowe.

Bilans łącza to równanie wyznaczające potrzebną moc nadajnika/odbiornika lub parametry anteny w funkcji pozostałych czynników.

$$P_r = P_{pr} + G_n + G_o - L_r - L_d \quad \text{lub} \quad P_r = EIRP + G_o - L_r$$

Gdzie:

P_r – moc odbiornika [dBm]

G_o – zysk anteny odbiorczej [dBi]

P_{pr} – moc nadajnika [dBm]

G_n – zysk anteny nadawczej [dBi]

L_r – straty rozproszeniowe [dB]

L_d – straty dodatkowe [dB]

EIRP - Zastępcza moc promieniowana izotropowego [dB]

Zysk

Zysk anteny (G) wyrażony w jednostce dBi informuje nas, o jaką wartość, w decybelach, zysk anteny jest większy w stosunku do hipotetycznej anteny izotropowej, zakładając, że do obu anten doprowadzona jest identyczna moc.

Izotropowa - w nauce tą nazwą określa się cechy ciał wykazujące identyczne, równomierne właściwości we wszystkich kierunkach. Antena izotropowa ma zysk = 0 dBi (jej charakterystyką promieniowania jest kula).

Tak naprawdę jest to wartość tylko teoretyczna, ponieważ antena izotropowa nie istnieje w rzeczywistości i nie można jej ani skonstruować, ani zbudować. Można to tylko wyliczyć teoretycznie.

Z komentarzem [2]: przez czynniki

Z komentarzem [3R2]: albo na końcu dopisać "...znacząco na nie wpływają"

Przeliczanie zysku w mW na zysk w dBi. Obliczenia w dBi jest dużo prostsze.

$$G [dBi] = 10 * \log \log (G[mW])$$

G – zysk anteny [mW]

G – ile razy silniej antena nadaje/odbiera od anteny izotropowej w skali liniowej [dBi]

Moc

Dla zapewnienia zadowalającej niezawodności łącza radiowego konieczna jest odpowiednia moc nadajnika. Moc ta zależy od wielu czynników, jak odległość, częstotliwość, ukształtowanie terenu, wielkość, typ i lokalizacja anteny, przewidywane tłumienie sygnału w atmosferze, wymagany poziom dostępności łącza.

EIRP[dBi] - Zastępcza moc promieniowana izotropowego, wyrażana w decybelach względem wata. Moc jaką musiałaby wypromieniować hipotetyczna antena izotropowa, aby otrzymać taki sam poziom sygnału na kierunku maksymalnego promieniowania danej anteny.

$$EIRP = P_{pr} + G_n + L_d$$

P_{pr} – moc nadajnika [dBm]

G_n – zysk energetyczny anteny [dBi]

L_d – tłumienie kabli i złącz [dB]

Straty

Tłumienie rozproszeniowe – jest to tłumienie w przestrzeni.

Dla przestrzeni bez przeszkód obliczamy je za pomocą wzoru:

$$L_r [dB] = 20 * \log \log x + 20 * \log \log f - 27,55$$

x – długość drogi [m]

f - częstotliwość [Mhz]

L_r – straty rozproszeniowe [dB]

Dla sieci WLAN w przestrzeniach z przeszkodami do obliczenia tłumienia najczęściej używa się metody Multi-Wall.

Tłumienie dodatkowe – wywołane kablami i złączami.

$$L_d = d_1 * t_{w1} + d_2 * t_{w2} + t_{k1} + t_{k2}$$

L_d - tłumienie dodatkowe [dB]

d_1, d_2 - długości kabla do anteny [m]

t_{w1}, t_{w2} - tłumienie właściwe kabla [dB/m]

t_{k1}, t_{k2} - tłumienie złącz konektorowych [dB]

Z uwagi na to, że długość okablowania mieści się w granicach zasięgu dla standardu Ethernet 1000Base-T, możemy zakładać, że sygnał nie ulegnie znaczącemu zniekształceniu na linii przełącznik – punkt dostępowy WLAN, zatem tłumienie wywołane przez złącza i okablowanie (przynajmniej wewnątrz naszej sieci) możemy pominąć. Ponadto użyte przez nas punkty dostępowe są aktywne, czyli korzystając z zasilania PoE, same generują odpowiednie pasma o zadanej mocy i przenoszą dane pomiędzy drogą przewodową, a radiową, zatem jakość naszego sygnału bezprzewodowego zależy w głównej mierze od samego punktu dostępowego i występujących później przeszkód materialnych.

Obliczanie bilansu energetycznego łącza radiowego dla projektu

1. Odszukaliśmy jaką moc musi mieć sygnał na odbiorniku, aby była odpowiednia do optymalnego korzystania z sieci WLAN przez urządzenia (poparte doświadczeniami empirycznymi):

$P_r = -80$ [dBm] moc sygnału na odbiorniku

Zasięg	moc sygnału odbieranego[dBm]
Świetny	-70
Akceptowalny	-80
Ledwo widoczny	-100

2. Dane punktu dostępowego: (Cisco Catalyst 9130AXI)

$P_{pr} = 17[\text{dBm}]$ moc nadajnika

$G_n = 4[\text{dBi}]$ zysk anteny nadajnika

3. Dane odbiorników- wzięliśmy pod uwagę te urządzenia, które mają najsłabsze odbiorniki (telefony/tablety...):

$G_o = 4[\text{dBi}]$ zysk anteny odbiornika

4. Tłumienie kabli i złącz pomijamy ponieważ używamy punktów dostępowych z wbudowanymi antenami.

$L_d = 0[\text{dBi}]$ tłumienie kabli i złącz

5. Szukane:

$L_r = ?$ Tłumienie rozproszeniowe

6. Obliczenia:

Brakuje nam tylko jednej danej, więc wystarczy podstawić resztę pod wzór:

$$\begin{aligned}P_r &= EIRP + G_o - L_r \\EIRP &= P_{pr} + G_n - L_d = 17 + 4 - 0 = 21[\text{dBm}] \\-80 &= 21 + 4 - L_r - 0 \\L_r &= 105[\text{dB}]\end{aligned}$$

W miejscach ,w których straty rozproszeniowe przekraczają próg 105 dB, nastąpi spadek mocy sygnału w odbiorniku poniżej -80dBm, co skutkuje zmniejszeniem prędkości łącza lub jego brakiem.

7. Analiza modeli propagacyjnych dla przyjętych parametrów

Model propagacji w wolnej przestrzeni

$$L_r [dB] = 20 * \log \log x + 20 * \log \log f - 27,55$$

gdzie:

- L_r – straty rozproszeniowe [dB]
- f – częstotliwość fali radiowej [Mhz]
- d – odległość między antenami [m]

Podstawowy model propagacji uwzględniający jedynie częstotliwość fali radiowej i odległość między antenami. Służy do określania minimalnego tłumienia, dlatego jest podstawą wielu bardziej rozbudowanych modeli.

Z komentarzem [4]: to już było opisane przy bilansie energetycznym, to bym usunął to z jednego miejsca

W celu lepszego sformatowania tekstu pod kolejne strony, zawartość została przeniesiona na stronę następną.

Model jednościeżkowy (ISM)

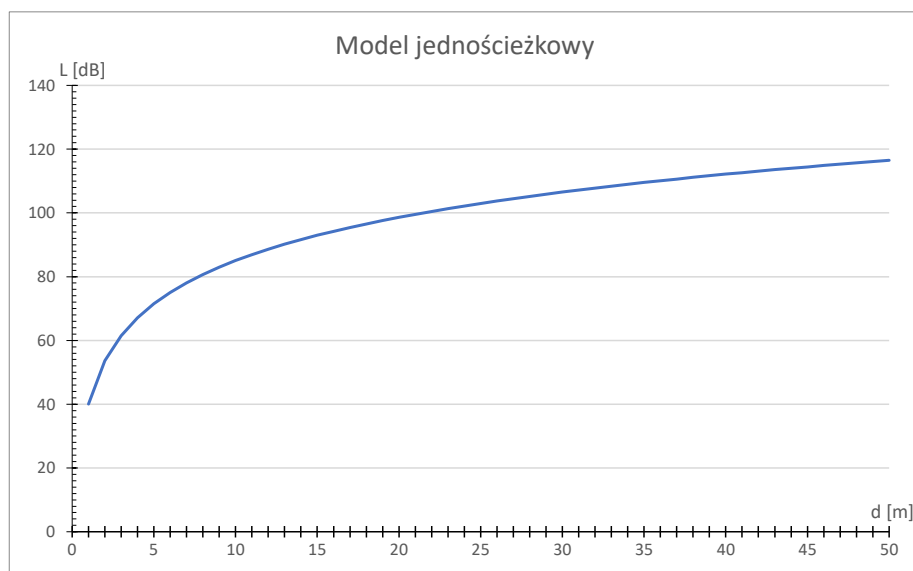
$$L_{ISM} [dB] = L_0 + 10\gamma \log \log d$$

gdzie:

- L_{ISM} – tłumienie między antenami [dB]
- L_0 – tłumienie odniesienia w odległości 1m [dB]
- γ – indeks odległościowego zaniku mocy
- d – odległość między antenami [m]

Jest to prosty model propagacyjny, nieuwzględniający szczegółów architektonicznych budynku, przeznaczony do wyznaczania tłumienia na jednej kondygnacji, a najlepiej w jednym pomieszczeniu. Tłumienie odniesienia w odległości 1m (L_0) dobiera się w sposób empiryczny, lecz na potrzeby projektu zostało ono wyznaczone za pomocą modelu propagacji w swobodnej przestrzeni.

Indeks odległościowego zaniku mocy (γ) dobierany jest eksperymentalnie, lecz dla środowiska wewnątrzbudynkowego zwykle zawiera się on w przedziale od 2 do 5. Do obliczeń przyjęliśmy wartość $\gamma = 4,5$



Model liniowy (LAM)

$$L_{LAM} [dB] = L_{FS} + \alpha * d$$

gdzie:

- L_{LAM} – tłumienie między antenami [dB]
- L_{FS} – tłumienie w wolnej przestrzeni [dB]
- α – tłumienie jednostkowe [dB/m]
- d – odległość między antenami [m]

Model ten ma podobne ograniczenia i zastosowania do modelu 1SM. Jednak ze względu na liczenie dodatkowego tłumienia za pomocą funkcji liniowej jest od niego mniej dokładny.

W obliczeniach za wartość tłumienia jednostkowego przyjęliśmy $\alpha = 0,85[\text{dB/m}]$

Z komentarzem [5]: odnośnik:
Ocena wybranych empirycznych modeli propagacyjnych do projektowania sieci WLAN wewnątrz budynków – P. Gajewski, S. Wszelak



Model Motleya-Keenana

$$L_{M-K} [dB] = L_{FS} + (n_W * L_W) + (n_F * L_F)$$

gdzie:

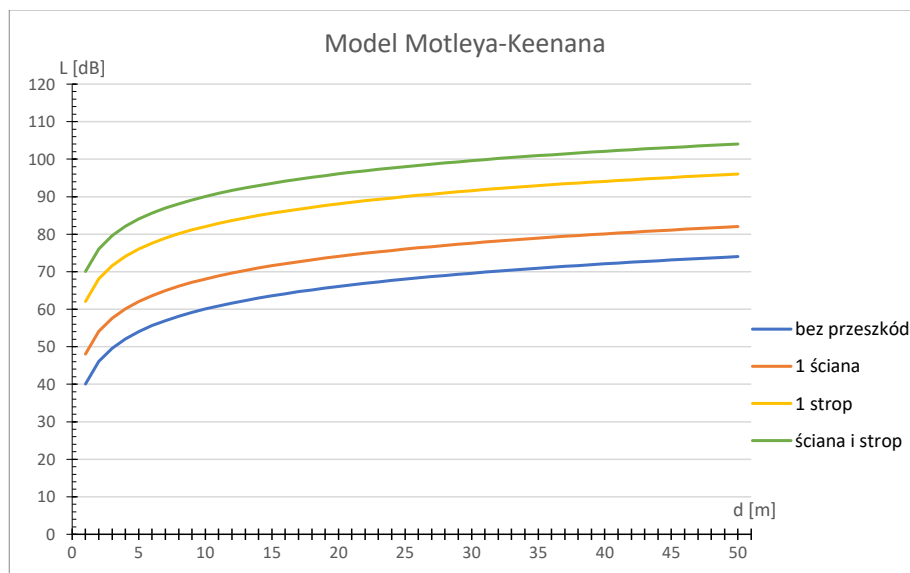
- L_{M-K} – tłumienie między antenami [dB]
- L_{FS} – tłumienie w wolnej przestrzeni [dB]
- n_W – liczba ścian między antenami
- L_W – tłumienie ściany [dB]
- n_F – liczba stropów między antenami
- L_F – tłumienie stropu [dB]

Model ten poza tłumieniem w swobodnej przestrzeni, uwzględnia również tłumienie wynikające z przechodzenia fali radiowej przez przeszkody w postaci ścian i stropów. Z tego względu można używać go do analizy siły sygnału pomiędzy różnymi kondygnacjami lub pomieszczeniami. Jednocześnie model ten nie uwzględnia charakterystyki pomieszczeń w których rozchodzi się fala.

W obliczeniach przyjęliśmy:

tłumienie ściany $L_W = 8$ [dB]

tłumienie stropu $L_F = 22$ [dB]



Model Multi-Wall

$$L_{MW} [dB] = L_0 + 10\gamma * \log \log d + \sum_{i=1}^I (n_W * L_W) + \sum_{j=1}^J (n_F * L_F)$$

gdzie:

- L_{MW} – tłumienie między antenami [dB]
- L_0 – tłumienie odniesienia w odległości 1m [dB]
- γ – indeks odległościowego zaniku mocy
- d – odległość między antenami [m]
- n_{Wi} – liczba ścian kategorii i
- L_{Wi} – tłumienie ściany kategorii i [dB]
- n_{Fj} – liczba stropów kategorii j
- L_{Fj} – tłumienie stropu kategorii j [dB]

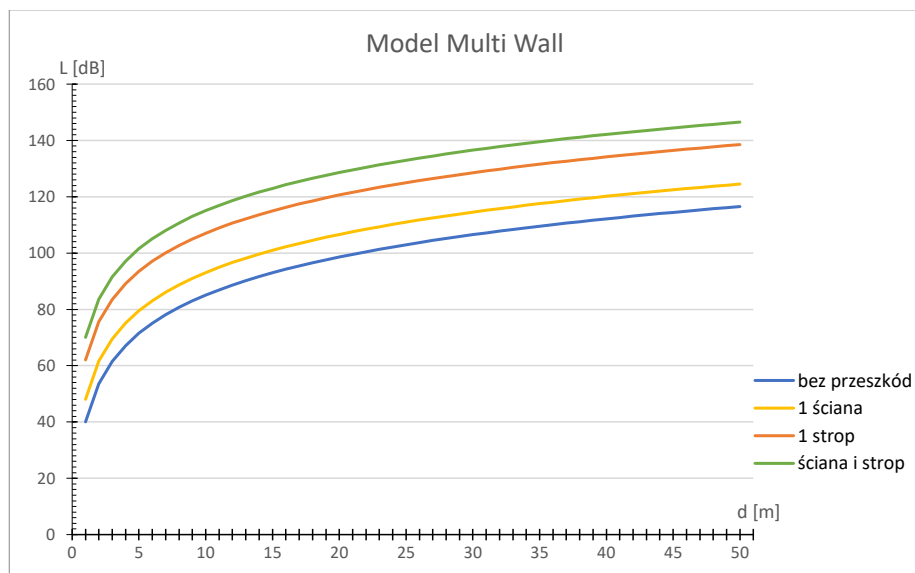
Jest to rozbudowany model, pozwalający na rzetelną analizę propagacji fali radiowej w środowisku wewnątrzbudynkowym. Uwzględnia szereg parametrów, takich jak ilość oraz kategoria przeszkód oraz charakterystykę pomieszczeń.

W obliczeniach przyjęliśmy:

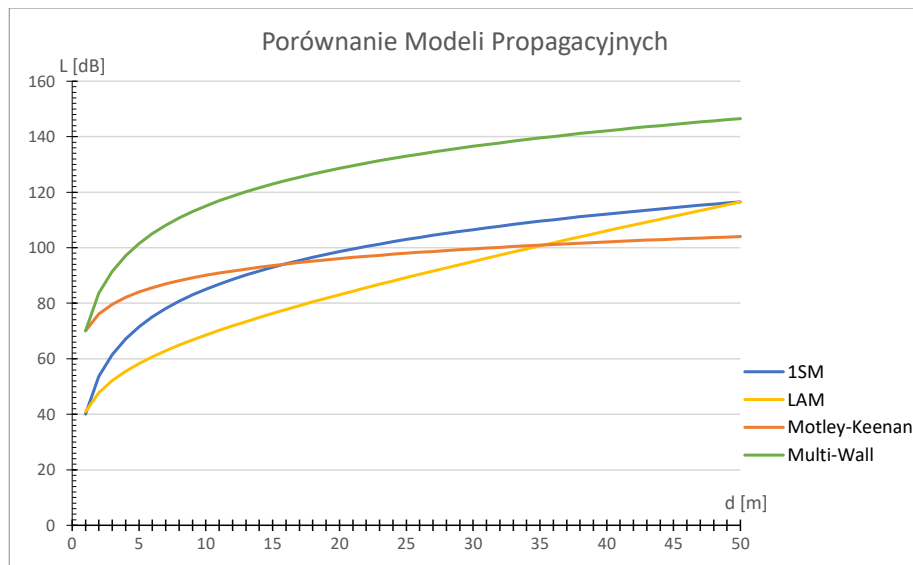
indeks odległościowego zaniku mocy $\gamma = 4,5$

tłumienie ściany $L_W = 8$ [dB]

tłumienie stropu $L_F = 22$ [dB]



Porównanie modeli



Do wyznaczenia siły sygnału przy planowaniu rozmieszczenia punktów dostępowych został przez nas użyty model Multi-Wall.

Główną przyczyną tej decyzji było to, że uwzględnia on najwięcej aspektów wpływających na propagację fali, przez co można założyć, że jego wyniki będą najbliższe rzeczywistym.

Parametry tłumienia ścian i stropów zostały wzięte z tablicy tłumienia materiałów budowlanych.

Indeks odległościowego zaniku mocy dla pomieszczeń biurowych wynosi 3,5 jednak w obliczeniach przyjęliśmy wartość 4,5 w celu symulacji niekorzystnych warunków i zapewnieniu odpowiednio dobrej jakości sygnału.

8. Rozmieszczenie punktów dostępowych

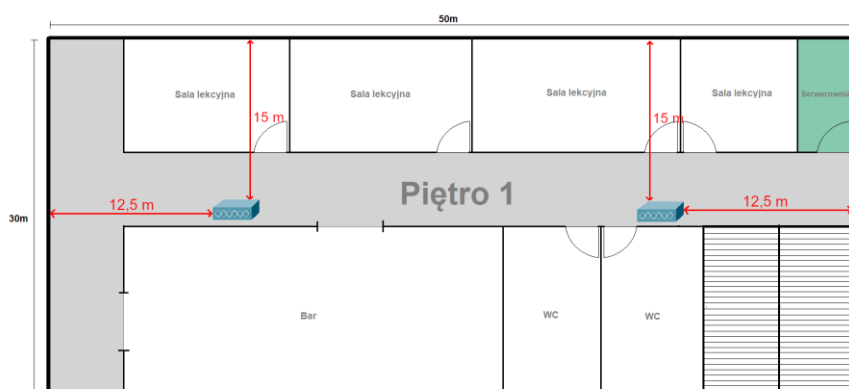
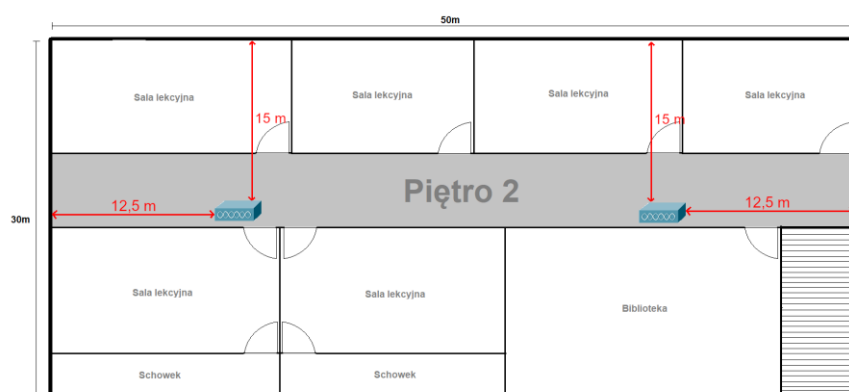
Z analizy sygnału przy wykorzystaniu modelu Multi-Wall wynika, że przyjęta przez nas akceptowalna moc sygnału ($-80[\text{dBm}]$), uzyskiwana przy tłumieniu w granicach $105[\text{dB}]$.

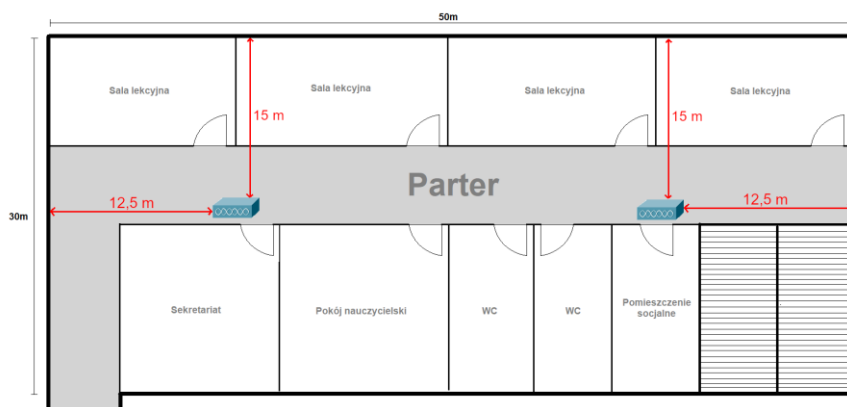
Tłumienie takie występuje w odległości $19[\text{m}]$ od nadajnika, gdy na drodze sygnału stoi pojedyncza ściana. Dodatkowe przejście fali radiowej przez strop zmniejsza jednak ten zasięg do $8[\text{m}]$. Z tego względu do zapewnienia dostatecznej siły sygnału potrzebne są przynajmniej dwa punkty dostępowe na każdą kondygnację tego budynku.

Z komentarzem [6]: To zdanie brzmi dziwnie, trzeba pewnie dodać jakieś jedno słówko, może: "...jest uzyskiwana..."

Z komentarzem [7]: a tutaj:

Ocena wybranych empirycznych modeli propagacyjnych do projektowania sieci WLAN wewnątrz budynków – P. Gajewski, S. Wszelak



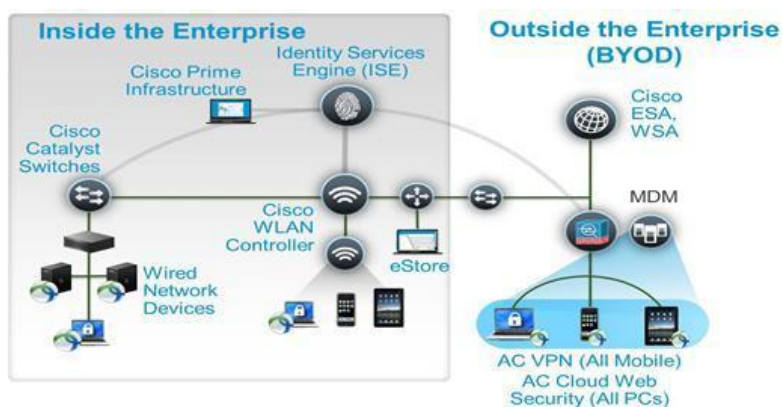


Punkty dostępne będą podłączone do przełącznika za pomocą przewodów Gigabit Ethernet 1000BASE-T. Okablowanie w serwerowni zostanie poprowadzone korytkami ściennymi na korytarz, a stamtąd do punktów dostępowych na I piętrze oraz na parter i II piętro. Zdecydowaliśmy się na zastosowanie tylko jednego przełącznika i podłączenie do niego oddzielnie każdego punktu (nie stosujemy oddzielnych przełączników dla pięter). Takie rozwiązanie wymaga większej ilości przewodów, jednak jest to nieporównywalnie tańsze w wykonaniu, a jednocześnie w pełni funkcjonalne.

Takie rozmieszczenie punktów zapewni dobrą moc sygnału w każdym miejscu w szkole, a poszczególne punkty dostępne zostaną skonfigurowane do pracy na innym kanale pasma, aby uniknąć ich wzajemnego zakłócania się.

9. Model dostępu do sieci i zabezpieczenia

Dzięki zastosowaniu Cisco ISE będzie możliwa kontrola dostępu do sieci oraz monitorowanie ruchu sieciowego dla każdego podłączonego urządzenia. Dzięki modułowi BYOD (bring your own device – przynieś swoje urządzenie) uczniowie, nauczyciele oraz inni pracownicy szkoły będą mieli zapewniony dostęp do sieci, a ich urządzenia są rejestrowane przez nich samych przy pomocy panelu logowania.



Rys. 9 - Przykładowy schemat implementacji ISE

Schemat działania

Administrator sieci tworzy konta dla użytkowników końcowych. Dane logowania zostają udostępnione użytkownikom i wykorzystują je do autoryzacji urządzeń połączonych z siecią. W tym miejscu można wykorzystać np. dane logowania do dziennika elektronicznego w szkole. Jest to model dostępowy podobny do uczelnianej sieci *eduroam*. Każdy użytkownik może dodać urządzenia zgodnie z limitem ustanowionym przez administratora.

Dzięki rozbudowanym opcjom monitorowany jest cały ruch wewnątrz sieci komputerowej, administrator jest informowany o nowych połączeniach, podejrzanych zachowaniach poszczególnych urządzeń i w razie potrzeby identyfikację właściciela podejrzanego urządzenia.

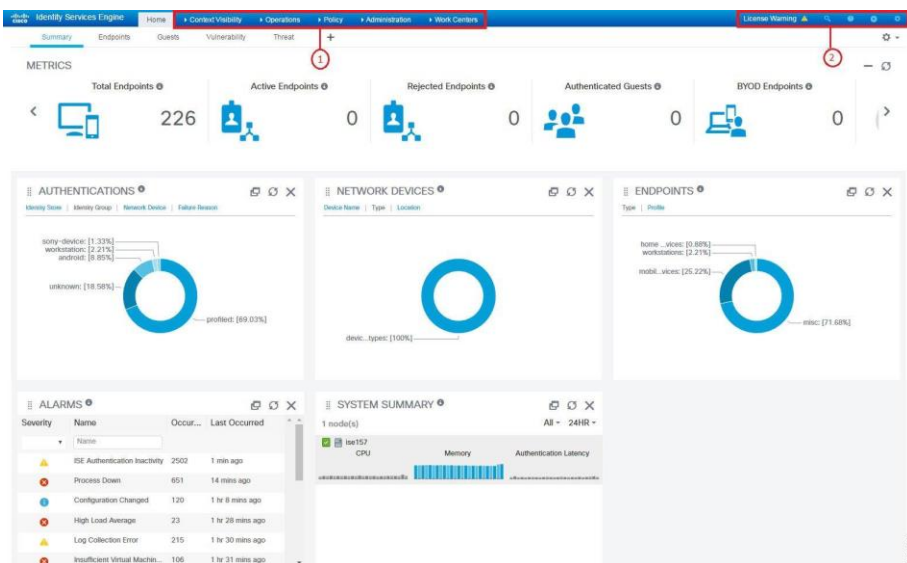
Table 1. VMware System Requirements

Requirement Type	Specifications
CPU	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation: <ul style="list-style-type: none"> • Clock Speed: 2.0 GHz or faster • Number of Cores: 2 CPU cores • Production: <ul style="list-style-type: none"> • Clock Speed: 2.0 GHz or faster • Number of Cores: 4 (Small) to 8 (Large) CPU cores <p>Cisco ISE supports Hyperthreading. You can install ISE on VMware hosts that have the Hyperthreading option enabled or disabled.</p> <p>Note Even though Hyperthreading might improve overall VM performance, it does not change the supported scaling limits per VM appliance. Additionally, you must still allocate CPU resources based on the required number of physical cores, not the number of logical processors.</p> <p>Note Refer to OVA Template Reservations table for CPU Reservations.</p>
Memory	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation: <ul style="list-style-type: none"> • Basic—4 GB (for evaluating guest access and basic access policy flows) • Advanced—16 GB (for evaluating advanced features such as pxGrid, internal CA, and SXP) • Production: <ul style="list-style-type: none"> • Small—16 GB • Large—32 GB <p>Note Refer to OVA Template Reservations table for Memory Reservations.</p>
Hard Disks	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation: <ul style="list-style-type: none"> • Minimum (only for lab testing; supports about 20 endpoints)—100 GB • Recommended—200 GB • Production: <ul style="list-style-type: none"> • 200 GB to 1.999 TB of disk storage (size depends on deployment and tasks). • We recommend that your VM host server uses hard disks with a minimum speed of 10,000 RPM.

Rys. 10 - Wymagania sprzętowe dla implementacji ISE

Po przeanalizowaniu wymagań sprzętowych, wybór padł na serwer DELL z serii T140. Jest dostępny w wielu wariantach, przykładowo wybieramy model z procesorem Inter Xeon E-2124, 8GB pamięci RAM i 1TB dysku twardego. Koszt takiej jednostki to około 2800 zł netto⁴. Serwer jest obsługiwany przez VMware ESXI 6.0 a Cisco ISE jest uruchomione jako jedna z maszyn wirtualnych. Dostęp do panelu administracyjnego poprzez VMware vSphere lub interfejs webowy.

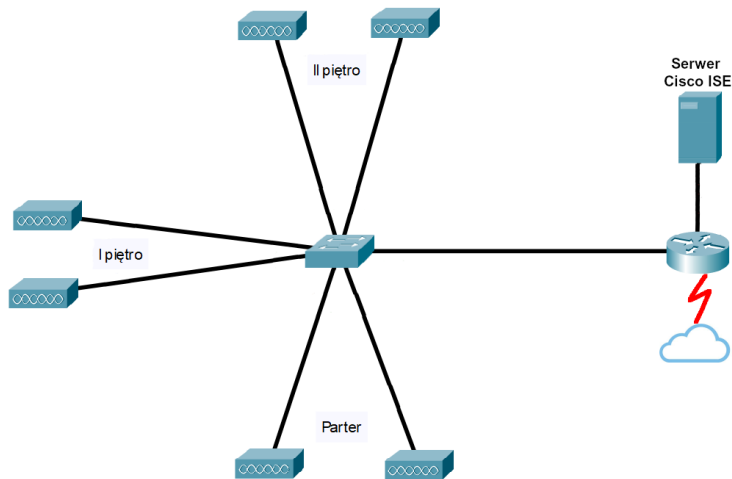
⁴ <https://dell24.pl/p/11014/>



Rys. 11 - Panel administracyjny Cisco ISE

Panel administracyjny wyświetla statystyki dotyczące sieci: Ilość urządzeń z grupowaniem na typy czy urządzenia natywnie należą do sieci czy zostały zatwierdzone przez użytkowników oraz rodzaje urządzeń. Wyświetlane są też najważniejsze wydarzenia w sieci jako logi oraz ogólne podsumowanie sieci.

10. Wybór urządzeń sieciowych i okablowania



Znając topologię sieci oraz wymagane parametry poszczególnych urządzeń, można wybrać konkretne modele. Postawiliśmy na urządzenia sieciowe marki Cisco ze względu na swoisty ekosystem tej firmy, oferujący szeroką gamę funkcjonalności urządzeń oraz wysoki poziom bezpieczeństwa. Ponadto wybór urządzeń Cisco jest ogromny, a większość z nich posiada możliwość rozbudowy o uniwersalne moduły.

Wybrany model punktu dostępowego był już wspomniany przy okazji obliczania bilansu energetycznego. Jest to model Cisco Catalyst 9130 AXI. Wymaga on dodatkowego zasilania przez PoE, czyli po kablu sieciowym, co wymaga również odpowiedniego przełącznika o mocy wystarczającej do zasilania wszystkich punktów dostępowych w sieci. Ze specyfikacji producenta możemy dowiedzieć się, że maksymalna moc pobierana przez urządzenie to maksymalnie 13,4 W, a nie wykorzystujemy pełnej mocy nadawania (używamy 50 mW zamiast 200 mW), zatem bezpiecznie można szacować pobór mocy przez jeden punkt na około 10W, ale zakładamy ewentualną rozbudowę sieci w przyszłości, więc wybierzemy

przełącznik o większej mocy. Poniżej znajduje się tabela ze specyfikacją wybranego modelu :

Specyfikacja podstawowa	
Opis produktu	AC rodzina 9100
Rodzaj urządzenia	Punkt dostępu bezprzewodowego
Rodzaj obudowy	Wewnętrzna
Wspierane kontrolery	Cisco 9800, 3504, 5520, 8840
802.11n	4x4 MIMO, MRC, Kanały 20- i 40-MHz, do 1.72 Gb/s, DFS
802.11ac	8x8 downlink MU-MIMO z 8 antenami, MRC, kanały 20- 40- 80- i 160-MHz, do 4.8 Gb/s, A-MPDU, A-MSDU, DFS
802.11ax	8x8 uplink/downlink MU-MIMO z 8 antenami, uplink/downlink OFDMA, TWT, BSS coloring, MRC, kanały 20- 40- 80- i 160-MHz, do 5.38 Gb/s DFS
Anteny	2.4 GHz wzmacnienia 4 dBi, antena dookólna, 5 GHz wzmacnienia 6 dBi, antena dookólna
Interfejs	1 x 100/1G/2.5G/5G Multigigabit (IEEE 802.3az), port konsolowy, USB 2.0 (4.5W)
Pamięć Flash	1 Gb
Pamięć RAM	2 Gb
Zasilanie	802.at (AIR-PWRINJ6)
Wymiary (szer. x dług. wys.)	22.6 x 22.6 x 4.8 cm
Waga	1.45 kg

Rys. 13 - Specyfikacja Cisco 9130AXI

Do funkcjonowania punktów dostępowych potrzebujemy również przełącznika. Dla pełnej kompatybilności znów wybór padł na markę Cisco. W tym przypadku uwagę zwróciliśmy głównie na to, czy dany model oferuje zasilanie PoE oraz z jaką maksymalną mocą. Wybór przełączników jest naprawdę ogromny, tak samo jak widełki cenowe. Jednym z tańszych, a zarazem spełniającym wymagania naszej sieci przełącznikiem może być Cisco SG110-24HP. Posiada 24 porty Gigabit Ethernet wyposażone w PoE o maksymalnej mocy 100W, czyli wystarczającej do zasilania wszystkich punktów dostępowych w naszej sieci. Nie posiada wentylatorów, dzięki czemu pracuje bezgłośnie i nie wywołuje niepotrzebnej cyrkulacji kurzu. Obudowa posiada wymiary umożliwiające montaż w uniwersalnej szafce sieciowej typu RACK.

W kwestii wyboru routera również posiadamy bardzo szeroką gamę dostępnych modeli o zróżnicowanych parametrach i cenach. Wybór tym razem również jest przykładowy, ponieważ znajdzie się wiele modeli, które mogłyby pracować w naszej sieci. Model Cisco RV340K9G5 spełnia założenia postawione przy projektowaniu sieci. Posiada 2 porty Gigabit Ethernet WAN oraz 4 porty Gigabit Ethernet LAN. Oprócz tego ma wszelkie potrzebne rozwiązania programowe, aby bezproblemowo pracować z naszą siecią. Dostępna jest również wersja WLAN, ale nie potrzebujemy dostępu bezprzewodowego na tym poziomie. Ewentualna obsługa urządzeń będzie odbywać się zdalnie przez protokół SSH. Oprócz tego również będzie on pasował do typowej szafy sieciowej.

Okablowanie w naszej sieci nie jest skomplikowane ani nie zakładamy występowania większych zakłóceń elektromagnetycznych, więc zdecydowaliśmy się na użycie okablowania nieekranowanego UTP w kategorii 6 – specyfikacja tego rodzaju połączenia odpowiada naszej sieci, ponieważ szósta kategoria okablowania sieciowego zapewnia nam wysokie przepustowości łącza (do 1Gb/s na odległości do 100m lub 10Gb/s do 55m). Oprócz tego przyda nam się komplet końcówek RJ-45. Z szacunkowych obliczeń wynika, że 200 metrów przewodu powinno wystarczyć na okablowanie całej topologii, do tego potrzebujemy końcówki RJ-45 w ilości 18 szt (12 dla połączeń switch-AP, 2 dla switch-router, 2 dla router-serwer oraz 2 dla podłączenia routera do sieci WAN).

11. Szacunkowe koszty wykonania sieci

Podane w tabeli wartości są przybliżone, a ich szacowanie oparte o średnie ceny netto danego produktu w stanie 'nowy' w serwisie Allegro.pl lub Ceneo.pl. Pozwoli to uniknąć wysokich marży naliczanych przez specjalistyczne sklepy. W rzeczywistości, jeśli rozpatrujemy naszą szkołę jako placówkę publiczną, musiałby zostać ogłoszony przetarg na dostarczenie sprzętu i ówczesne ceny mogłyby odbiegać od szacowanych. Kosztów 'robocizny' nie wliczamy, ponieważ są trudne do oszacowania i zależne od wielu czynników.

Produkt	Cena jedn.	Ilość	Suma
Cisco Catalyst 9130 AXI	5208,00	6 szt.	31248,00
Cisco SG110-24HP	1129,31	1 szt.	1129,31
Cisco RV340K9G5	674,64	1 szt.	674,64
Serwer DELL T140	2847,97	1 szt.	2847,97
Skrętka miedziana UTP kat. 6	1,50	200 m	300,00
Wtyk RJ-45	0,50	18 szt.	9,00
Szafka sieciowa RACK 19' x 400mm	280,00	1 szt.	280,00
Listwa na kable	5,00	125 m	625,00
			37113,92

12. Podsumowanie

Wykonana przez nas symulacja budowy sieci szkolnej pokazuje, jak złożonym procesem jest inżynieria sieciowa – a to, co zrobiliśmy, to i tak tylko część pracy, ponieważ cała infrastruktura musiałaby zostać jeszcze zaprogramowana, odpowiednio zabezpieczona i regularnie serwisowana w poszukiwaniu usterek i luk zabezpieczeń. Jednak jakby nie patrzeć – projekt sieci od strony propagacyjnej jest podstawą do kolejnych etapów projektowania. Bez niego nie wiemy ile urządzeń, w jakiej ilości i w jakim ułożeniu będziemy potrzebować. Dopiero po stosownych rachunkach jesteśmy w stanie określić przybliżoną topologię sieci.

Trzeba pamiętać, że rzeczywistość niestety rzadko pokrywa się z suchymi obliczeniami i trzeba brać na to poprawkę i odpowiednio „pesymistycznie” dobierać parametry do obliczeń tak, aby zawsze pozostawał nam nawet minimalny zapas energetyczny. Mamy też do czynienia z wieloma czynnikami, które pozornie mogą się wydawać pomijalne na etapie projektowania – przykładowo aktualne okablowanie prądowe, duże metalowe powierzchnie, urządzenia generujące zakłócenia itp., dlatego warto empirycznie sprawdzić właściwości propagacyjne konkretnego wnętrza w poszukiwaniu miejsc, gdzie mogą występować problemy z sygnałem.

Bibliografia:

- Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej – Ryszard J. Katulski
- Analiza i porównanie modeli propagacyjnych dla środowiska wewnątrzbudynkowego – Łukasz Jasiński
- Ocena wybranych empirycznych modeli propagacyjnych do projektowania sieci WLAN wewnątrz budynków – Piotr Gajewski, Stanisław Wszelak