Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

Katedra Inżynierii Oprogramowania

kierunek studiów: Informatyka

specjalność: Inżynieria Oprogramowania

Praca dyplomowa inżynierska

IMPLEMENTACJA APLIKACJI DO WSPÓŁTWORZENIA NOTATEK Z WYKORZYSTANIEM TECHNOLOGII PEER TO PEER

IMPLEMENTATION OF A COLLABORATIVE NOTE-TAKING APPLICATION USING PEER-TO-PEER TECHNOLOGY

Oskar Marcin Chybowski

nr albumu: **54941**

Opiekun:

dr inż. Mirosław Mościcki

Katedra Inżynierii Oprogramowania

Szczecin, 2026

Spis treści

Wstęp

Tu będzie dopiero treść :)

1 Zakres teoretyczny

1.1 Systemy współdzielenia dokumentów w czasie rzeczywistym

Budując rozwiązania związane z równoczesnym tworzeniem i modyfikacją tekstu przez więcej niż jednego użytkownika, musimy rozważyć wyzwania napotykane w aktualizacji tworzonego dokumentu, gdzie każdy klient posiada lokalną kopię i nanosi na nie własne zmiany, ale też w międzyczasie musimy nanieść zmiany od pozostałych klientów. W takim systemie mówimy wtedy o zbieżności danych[1] - czyli zapewnieniu tego samego stanu między każdym klientem. W przypadku edycji tekstu skupię się na ewentualnej zbieżności, która uwzględnia posiadanie rozbieżnych kopii tego samego źródła danych u każdego z klientów przez pewien czas. Dopiero gdy zostanie zakończona edycja tekstu, zmiany zostają propagowane i nanoszone do pozostałych klientów. Finalnie każdy klient po czasie posiada identyczną kopię dokumentu. Ze strony doświadczeń użytkowania jest to skuteczna strategia ze względu na możliwość zapewnienia płynności interfejsu graficznego oraz z pomocą złożonych mechanizmów umożliwia rozwiązywanie konfliktów między kopiami.

Wspomniany model nie jest bez wad. Największym problemem jest istnienie konfliktów, których rozwiązanie klienci muszą ustalić za pomocą dodatkowych strategii. Najeczęściej wykorzystywaną jest Last-Write-Wins (LWW). Rozstrzyga ona konflikty poprzez nanoszenie tylko tej zmiany, która jest uznawana jako ostatnia w kolejności zbioru konfliktujących operacji. Ustalanie kolejności nie jest jasno tutaj zdefiniowane. W systemach baz danych takich jak Cassandra[9] oraz SQL Server P2P[10] każdy zapis otrzymuje własny znacznik czasowy, na podstawie którego wybierany jest najmłodszy wpis i nim nadpisywane są zmiany w źródle danych. Zmiany ze starszymi znacznikami są porzucane. Zauważalną wadą LWW jest wysokie ryzyko utraty danych w czasie nanoszenia zmian, ponieważ wszystkie konfliktujące starsze zmiany nie są brane pod uwagę.

W przypadku tekstu jako typu danych, istnieje specjalny wariant ewentualnej zbieżności - silna ewentualna zbieżność. Ten model wykorzystuje specjalne struk-

tury danych, które zapewniają bezkonfliktowe nanoszenie zmian, a ich skuteczność opiera się na matematycznych dowodach[2].

Istnieje również model silnej zbieżności, gdzie każdy z klientów musi mieć tą samą kopię danych przez cały czas pracy systemu. Ze względu opóźnienia i potrzebę mechanizmu blokady klientów przed wprowadzaniem zmian, ten model został porzucony w dzisiejszych systemach, ponieważ wspomniane problemy skutkowały gorszą użytecznością w porównaniu do systemów wykorzystujących ewentualną zbieżność. Istnieją jednak prace, które wskazują na istnienie systemów opartych o model silnej zbieżności, które osiągają bardzo niskie czasy opóźnienia, co redukuje problem używalności takiego rozwiązania w rzeczywistych zastosowaniach.[11]

1.2 Algorytmy zapewniające silną ewentualną zbieżność

Podejście do rozwiązania problemu synchronizacji stanów między każdym klientem wymaga zaprojektowania algorytmu od podstaw skupionego na tym zagadnieniu. Przedstawię dwa najczęściej wykorzystywane algorytmy rozwiązujące opisany problem.

Operational Transformation (OT) polega na zamianie każdej wykonanej operacji na kodowalny obiekt, który może być propagowany i nanoszony na kopie w innych replikach. Większość znanych implementacji zakłada też, że istnieje scentralizowany serwer określający kolejność każdej operacji zgłaszanej przez wszystkich klientów i dystrybujący wspomniane zmiany do pozostałych replik. W przypadku wystąpienia konfliktu, operacje są sortowane przez serwer, a następnie każda z nich jest transformowana tak, by uwzględnić zmianę poprzedniej w kolejności operacji. Przykładowymi propozycjami algorytmów OT, których skuteczność nie została obalona dowodami, są: Jupiter[3], SOCT3/4[4] oraz TTF[5]. Jupiter oraz SOCT3/4 wymagają wcześniej wspomnianego scentralizowanego serwera. Google Docs opiera się na Operational Transformation[12]. Ze względu na złożność implementacji większość systemów nie korzysta dziś z tych algorytmów do synchronizacji danych, gdzie przykładem takiej decyzji jest Figma[13].

Następcą Operational Transformation są bezkonfliktowe replikowane typy danych (Conflict-free replicated data types - CRDT). Pozwalają one na nanoszenie zmian na własne kopie przez klientów, bez potrzeby uzgadniania tego z innymi klientami. Tak jak każdy algorytm ewentualnej zbieżności, pozwala na tymczasową rozbieżność między replikami, ale po otrzymaniu wszystkich zmian przez każdego klienta, dane zawsze pozostają zbieżne. Przykładowymi algorytmami są RGA[6], WOOT[7] oraz TreeDoc[8].

1.3 Architektura Peer-To-Peer w środowiskach mobilnych

Współcześnie smartfony i podobne urządzenia mobilne posiadają moduły wspierające różne standardy komunikacji bezprzewodowej. Najpopularniejszymi z nich są Bluetooth, Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi (IEEE 802.11) oraz GSM (Global System for Mobile Communications). Część z nich, np. Bluetooth, jest zaprojektowana tylko pod komunikację na niewielkie odległości (poniżej 100 metrów). Wi-Fi w nowoczesnych systemach jest rozszerzane o wsparcie protokołu Wi-Fi Direct, który umożliwia komunikację Peer-To-Peer z pomocą Wi-Fi, które najczęściej samo w sobie służy do komunikacji z innymi urządzeniami, ale wykorzystując do tego urządzenia infrastruktury sieciowej - bezprzewodowe punkty dostępu (wireless access points).

1.4 Architektura Peer-To-Peer w systemach iOS, iPadOS, macOS, tvOS.

Systemy operacyjne iOS, iPadOS, tvOS oraz macOS są rozwijane przez firmę Apple Incorporated i instalowane wyłącznie na urządzeniach przez nią produkowanych - iPhone'y, iPady, Apple TV, Macintoshe. Współcześnie wszystkie sprzedawane modele zawierają moduły oferujące Bluetooth i Wi-Fi. Dla programistów przygotowane są specjalne biblioteki do bezpośredniego wykorzystania tych technologii, jednak ich użycie wymaga specjalnych certyfikatów wraz z wyjaśnieniem ich wykorzystania, które jest weryfikowane w czasie przygotowania do dystrybucji oprogramowania wykoszytującego wspomniane technologie. Ze względu na wyraźną potrzebę zapewnienia bezpieczeństwa transportowanych danych, zalecanym przez Apple jest korzystanie nie z bezpośrednich narzędzi do komunikacji z wykorzystaniem Bluetooth czy Wi-Fi, ale z bibliotek, które oferują transport danych do pobliskich urządzeń. Są one abstrakcją na wcześniej wspomniane protokoły komunikacji bezprzewodowej jak i przewodowej, gdzie po stronie programisty pozostaje jedynie obsłużyć parowanie się z pobliskimi urządzeniami i przygotować kodowalne obiekty do transportu. Dziś możemy wyróżnić dwie takie biblioteki oferowane przez Apple - Multipeer Connectivity oraz Network.

Multipeer Connectivity to framework zapewniający komunikację oraz odkrywanie pobliskich urządzeń. Do komunikacji wykorzystuje protokoły komunikacji bezprzewodowej - w tym dostępne sieci Wi-Fi, Bluetooth oraz w przypadku Macintoshy oraz Apple TV - protokół komunikacji przewodowej - Ethernet. Interfejs dostarczany przez bibliotekę umożliwia transport danych w postaci niewielkich wiadomości, strumieniowania danych oraz transportu plików.

Architektura Multipeer Connectivity opiera się na sesjach - połączeniach między użytkownikami w pobliżu. Sesje są reprezentowane przez obiekty typu MCSession. Takie obiekty są tworzone przez programistę w dowolnym momencie oraz u nowo połączonego klienta od razu po dołączeniu do sesji do której został zaprosozny,

jednocześnie każda z kopii sesji zawiera informację o wszystkich połączonych klientach. Do odkrywania innych użytkowników używany jest protokół Bonjour.

Urządzenie ogłaszające u pobliskich urządzeń dostępną sesję jest nazywany odkrywcą. Jego rolę reprezentuje obiekt MCNearbyServiceBrowser. Możemy również wykorzystać obiekt MCBrowserViewController który zapewni interfejs graficzny, dzięki któremu użytkownik będzie mógł zaprosić klientów do swojej sesji. Urządzenie poszukujące dostępnych sesji jest nazywany nadawcą. Jego reprezentantem jest obiekt MCNearbyServiceAdvertiser.

Obiektem identyfikującym urządzenie miedzy sesjami jest MCPeerID, zawierający dane unikalne dla klienta w zakresie danej sesji.

W czasie odkrywania urządzeń w pobliżu, mamy jedynie dostęp do ograniczonej ilości informacji, które są dystrybuowane przez nadawców. Dopiero po wysłaniu zaproszenia przez odkrywcę, a następnie akceptacji przez nadawcę, możemy wykorzystać w pełni interfejs Multipeer Connectivity do komunikacji.

Network jest frameworkiem skupionym na ogólnej interakcji z połączeniami sieciowymi. Oprócz lokalnego dostępu do innych urządzeń, daje możliwość wykorzystania całej dostępnej infrastruktury sieciowej. Apple w przypadku tworzenia aplikacji w oparciu o połączenia peer to peer, zaleca łączenie Network z biblioteką DeviceDiscoveryUI, która zapewnia dodatkowy interfejs graficzny dla użytkownika aplikacji implementujący proces parowania. W ramach tego procesu Apple pozwala na wybór protokołu do komunikacji w czasie parowania. Mamy do wyboru Bonjour - starszy, należący do Apple protokół - oraz Wi-Fi Aware - otwarty, międzyplatformowy standard. DeviceDiscoveryUI jest nową biblioteką, dostępną od systemów operacyjnych wydanych w 2025 roku - iOS 26, iPadOS 26, macOS 26. Wyjątkiem jest wsparcie dla tvOS, tutaj Apple oferuje wsparcie od wersji 16, wydanej w 2022 roku. Wi-Fi Aware jest również dostępny dopiero od systemów wydanyc w 2025 roku. Network wraz z własnym protokołem ramkowania jest dostępny od wersji systemów operacyjnych wydanych w 2019 roku.

W przypadku oparcia aplikacji komunikujacej się peer to peer z innymi urządzeniami o Network, musimy przygotować własny protokół ramkowania `NWProtocolFramerImplementation`. W nim powinniśmy obsłużyć wszystkie wydarzenia związane z poprawnym zarządzaniem połączeniem - inicjację, powrót z uśpienia, zatrzymanie, proces czyszczenia prze dealokacją. Do nasłuchiwania na przychodzące połączenia wykorzystalibyśmy obiekt `NWListener`. Połączenie z innymi urządzeniem byłoby reprezentowane przez obiekt `NWConnection`, a jeśli chcielibyśmy zaimplementować własny proces odkrywania i negocjacji połączenia z pobliskimi urządzeniami, musielibyśmy dodatkowo wykorzystać obiekt `NWBrowser`.

1.5 Istniejące rozwiązania i ich problemy

Dwoma najpopularniejszymi aplikacjami do współtworzenia notatek w czasie rzeczywistym są Google Docs i Microsoft Word Online. Ich zakres funkcjonalności jest bardzo podobny - złożone formatowanie tekstu; możliwość dodawania załączników, tabel; historia wersji dokumentu; obecność publicznego API; wykorzystanie nowoczesnych standardów szyfrowania komunikacji; eksport dokumentu w postaci innego rodzaju pliku oraz wymagają konta do możliwości ich użycia. Google Docs korzysta ze swojego algorytmu Operational Transformation do synchronizacji zmian między użytkownikami, sposób przechowywania dokumentów nie jest jasny, nie wiemy w jakiej postaci są one przechowywane na serwerach Google, a dostęp do aplikacji jest darmowy. Microsoft Word Online nie udostępnia publicznie informacji o stosowanym podejściu do synchronizacji danych, dokumenty są przechowywane w postaci plików docx, a dostęp do aplikacji jest również darmowy.

Głównym problemem większości dzisiejszych narzędzi do tworzenia dokumentów jest uzależnienie od dostawcy. Każda z wymienionych aplikacji, jak i wiele innych dostępnych na rynku do skorzystania ze swoich usług wymaga założenia konta na platformie dostawcy, a w czasie współpracy wymagany jest ciągły dostęp do Internetu. W momencie gdy pracujemy nad jednym dokumentem z innymi użytkownikami w tym samym pomieszczeniu i nasze urządzenia są podłączone do tej samej sieci, opóźnienie w nanoszeniu zmian między użytkownikami zawsze uwzględnia dostęp do scentralizowanych serwerów. W momencie gdy zostaniemy odcięci od dostępu do Internetu, ale nadal będąc w tej samej sieci lokalnej, tracimy możliwość dalszej pracy. Szczególnie widać to w przypadku Google Docs, którego algorytm synchronizujący narzuca obecność serwera wybierającego kolejność nanoszenia zmian w dokumentach.

2 Wymagania systemowe

W poniższym rozdziale opiszę specyfikację wymagań dla projektowanej aplikacji do współtworzenia notatek w architekturze peer to peer. Celem jest określenie zakresu funkcjonalności oraz ograniczeń technologicznych, których będę się trzymać w ramach proponowanej implementacji. Wyodrębnię dwóch aktorów:

- Użytkownika - osoba zarządzająca notatkami przez interfejs graficzny zaimplementowany w ramach implementacji,
- Klient - instancja implementowanej aplikacji na urządzeniu fizycznym.

Same wymagania zostały podzielone odpowiednio na wymagania funkcjonalne i niefunkcjonalne.

2.1 Wymagania funkcjonalne

- System musi umożliwiać rozgłaszanie swojej obecności w sieci lokalnej, by móc zostać wykrytym przez innych klientów.
- System musi umożliwiać wyszukiwanie innych aktywnych klientów znajdujących się w zakresie lokalnego otoczenia oraz lokalnej sieci.
- System musi pozwalać na wysyłanie zaproszeń do połączenia się z wykrytymi klientami.
- System musi na bieżąco wyświetlać listę aktualnie połączonych klientów.
- System musi umożliwiać utworzenie nowej notatki tekstowej.
- System musi umożliwiać edycję treści istniejącej notatki.
- System musi umożliwiać trwałe usunięcie notatki.
- System musi automatycznie tworzyć unikalny identyfikator oraz znacznik czasowy dla nowych notatek.
- System musi pozwalać na zdefiniowanie tytułu notatki, będącego niezależnym parametrem od treści notatki.
- System musi enkodować strukturę danych notatki do formatu umożliwiającego przesył notatki do połączonych klientów.
- System musi dekodować otrzymane zakodowane dane o notatce i przekształcić je w natywny obiekt reprezentujący notatkę w systemie.
- System musi automatycznie rozsyłać zaktualizowaną treść notatki do wszystkich aktualnie połączonych klientów w jak najkrótszym czasie od wykrycia zmian.

- System musi nadpisać istniejącą notatkę nowo otrzymaną kopią, gdy obie posiadają ten sam identyfikator, ale otrzymana kopia zawiera nowszy znacznik czasowy.
- System musi zapisywać wszystkie notatki w trwałej pamięci urządzenia.
- System musi odświeżać interfejs z listą notatek w czasie rzeczywistym.

2.2 Wymagania niefunkcjonalne

- System musi wspierać urządzenia mobilne firmy Apple z zainstalowanymi systemami operacyjnymi iOS lub iPadOS w wersji 18.0 lub wyższej.
- Kod źródłowy powinien być napisany w języku Swift z wykorzystaniem deklaratywnego frameworka do budowy interfejsów graficznych - SwiftUI.
- Operacje zapisu do plików oraz procesy sieciowe muszą być wykonywane poza głównym wątkiem - wątkiem obsługującym interfejs graficzny aplikacji.
- Czas propagacji zmian w notatce do innego połączonego klienta nie powinien wynosić więcej niż 1 sekunda.
- System musi obsłużyć przypadek zerwania połączenia, bez uszkodzenia notatki oraz rzucania wyjątków uniemożliwiających dalsze funkcjonowanie systemu.
- System musi zapewnić szyfrowaną komunikację między klientami.
- Interfejs użytkownika musi być responsywny i dostosowywać się do różnych rozmiarów ekranów i ich orientacji w zakresie urządzeń tworzonych przez Apple.
- Wygląd aplikacji powinien spełniać oficjalne wytyczne projektowe Apple Human Interface Guideliens.
- System powinien automatycznie dostosowywać paletę kolorów interfejsu graficznego do aktualnie ustawionego motywu systemowego.

3 Implementacja

3.1 Projekt architektury systemu

Przygotowana implementacja bazuje na architekturze Model-View. Jest to podejście, gdzie cała logika biznesowa jest zawarta w modelach, które bezpośrednio są przekazywane do warstwy prezentacji (View). Na tej warstwie jest wykonywane odpowiednie formatowanie danych, gdzie też brane pod uwagę są preferencje zapisu i językowe użytkownika. Model-View to uproszczony wariant popularnej w aplikacjach mobilnych architektury Model-View-ViewModel (MVVM), gdzie ViewModel jest warstwą zajmującą się przekształcaniem modelów biznesowych na gotowe do prezentacji obiekty. Warstwa View wtedy zajmuje się przede wszystkim definiowaniem struktury interfejsu użytkownika oraz logiką związaną z dostępnością (wsparcie dla funkcjonalności czytników ekranów, skalowaniem interfejsu). Przygotowana implementacja nie zawiera złożonej logiki prezentacji ani rozbudowanego graficznego interfejsu użytkownika, więc w celu uproszczenia kodu zdecydowałem się na porzucenie użycia warstwy ViewModelu.

Warstwa prezentacji aplikacji opisująca początkowy interfejs użytkownika jest zaimplementowana w `AllNotesScreen`. Ekran jest widoczny dla użytkownika, gdy ustawił swoją nazwę użytkownika w sieci peer-to-peer. Składa się z listy podzielonej na dwie sekcje - notatek których użytkownik jest autorem, oraz notatek do których użytkownik został zaproszony. Nad listą znajduje się przycisk stworzenia nowej notatki. Naciśnięcie na którąkolwiek z istniejących notatek prowadzi do otwarcia jej zawartości. W zależności od tego, czy użytkownik jest właścicielem danej notatki czy współtwórcą, interfejsem do edycji tej notatki są odpowiednio obiekty `NoteEditorScreen` oraz `SharedNoteEditor`. Z ekranu `NoteEditorScreen` możemy przejść do `ManageMembersScreen`, który jest listą użytkowników zaproszonych i możliwych do zaproszenia do edytowania aktualnej notatki.

3.2 Model danych

Algorytm 3.1 przedstawia podstawowy obiekt reprezentujący notatkę w systemie plików - `Note`. Składa się on z URL (Universal Resource Locator), czyli ścieżki prowadzącej do pełnej zawartości notatki użytkownika, która jest przechowywana w pliku tekstowym o rozszerzeniu `txt`. Dodatkowo przechowujemy w tym obiekcie jeszcze `name`, które pełni funkcję ułatwionego dostępu do przyjaznej nazwy, jednocześnie będąc nazwą pliku w lokalnym systemie plików oraz przyjazną nazwą prezentowaną w liście notatek do których użytkownik został zaproszony. Obiekt implementuje protokół `Identifiable`, który gwarantuje możliwość identyfikacji obiektu w zbiorze zawierającym wiele jego instancji, np. w tablicy. Ta cecha jest wymagana i wykorzystywana przez SwiftUI, by móc rozróżniać rodzaje zmian na komponentach interfejsów graficznych zawierających wiele kopii takiego obiektu, np. `List` lub `ForEach`. Umożliwia to dokonanie decyzji co do sposobu animacji zmian na ekranie użytkownika, ponieważ framework będzie mógł rozróżnić usunięcie i wstawienie nowego obiektu, od zmiany parametrów tej samej instancji.

```
1  struct Note: Identifiable {
2    var id: URL { path }
3
4    let name: String
5    let path: URL
6  }
```

Algorytm 3.1: Definicja obiektu notatki

Algorytm 3.2 przedstawia `NoteMessage` - obiekt zawierający zawartość notatki, którą wysyłamy do użytkowników, którzy przyjęli zaproszenie do edycji notatki. Znajdziemy w niej pola `SenderID`, które jest identyfikatorem właściciela notatki oraz `content`, czyli właściwą zawartość notatki. Jest ona również używana do wysyłania każdej aktualizacji do wszystkich użytkowników. Obiekt implementuje protokół `Codable`, który jest uniwersalnym interfejsem kodowania danych. Daje to nam wbudowane wsparcie kodowowania do formatów JSON i XML. Mamy możliwość również pisania własnych koderów, które umożliwią zamianę obiektów implementujących `Codable` do wybranych przez nas, innych formatów danych.

```
1  struct NoteMessage: Codable {
2    let senderID: String
3    let content: String
4  }
```

Algorytm 3.2: Definicja obiektu notatki wysyłanego między użytkownikami

Do reprezentacji zaproszeń stworzyłem obiekt `NoteInvitation` przedstawiony w algorytmie 3.3. Przechowuje on informacje potrzebne do obsługi całego procesu zaproszeń między użytkownikami systemu. Składa się z `invitatorID`, który jest wyspecjalizowanym obiektem frameworku `MultipeerConnectivity` i umożliwia

identyfikację użytkownika w czasie komunikacji peer to peer. `note` to obiekt reprezentujący notatkę, którą otrzymujemy w zaproszeniu. Składa się on z tytułu i treści, które były aktualne w momencie zapraszania użytkownika. Ostatnim i jednocześnie prywatnym parametrem jest `invitationHandler`, który jest typem funkcji przyjmującej wartość boolowską (prawda/fałsz). Jest on wykorzystywany do wstrzyknięcia logiki akceptacji notatki, która wymaga kilku operacji w logice klasy obsługującej przyjmowanie zaproszeń. Dzięki takiemu podejściu tworzymy luźną zależność do skomplikowanego obiektu na dalszych etapach systemu. `NoteInvitation` zawiera również metody `accept()` oraz `decline()`, które odpowiadają za wykonanie akcji zaproszenia, które pod spodem odpowiednio używają parametru `invitationHandler`, który można wykonać tylko raz, ze względu na specyfikę `Multipeer Connectivity`, a następnie usuwamy go z pamięci.

```
struct NoteInvitation: Identifiable {
  struct NoteContent: Codable {
    let title: String
    let noteSnapshot: String
  }

  var id: MCPeerID { invitatorID }
  var noteName: String { note.title }
  let invitatorID: MCPeerID
  let note: NoteContent
  private var invitationHandler: ((Bool) -> Void)?

  init(
    invitatorID: MCPeerID,
    note: NoteContent,
    invitationHandler: ((Bool) -> Void)? = nil
  ) {
    self.invitatorID = invitatorID
    self.note = note
    self.invitationHandler = invitationHandler
  }

  mutating func accept() {
    invitationHandler?(true)
    invitationHandler = nil
  }

  mutating func decline() {
    invitationHandler?(false)
    invitationHandler = nil
  }
}
```

Algorytm 3.3: Definicja obiektu reprezentującego zaproszenie do edycji notatki

Ostatnim obiektem jest struktura `Peer` przedstawiona w algorytmie 3.4, która jest opisem aktualnego stanu połączenia wykrytego innej instancji systemu w pobliżu użytkownika. Składa się z wartości enumerowanej opisującej stan połączeniao raz identyfikatorem użytkownika w sieci peer to peer. Implementuja ona protokół

`Idenfitiable`, by móc zostać poprawnie użyta do rysowania listy dostępnych klientów w pobliżu użytkownika.

```
struct Peer: Identifiable {
  enum ConnectionState {
    case available
    case joined
    case rejected
    case invitationPending
  }

  var id: String { mcPeer.displayName }
  let mcPeer: MCPeerID
  var state: ConnectionState
}
```

Algorytm 3.4: Definicja obiektu reprezentującego widocznego klienta

3.3 Warstwa sieciowa i komunikacja P2P

Całość komunikacji między urządzeniami odbywa się z wykorzystaniem frameworka Multipeer Connectivity. Klient twórcy notatki pełni rolę serwera, a pozostali użytkownicy, po uprzednim zaproszeniu, mogą dołączyć do edycji notatki, wysyłać swoje zmiany jak i odbierać zmiany, które dystrybuuje serwer.

3.4 Odkrywanie innych urządzeń

Obiekt reprezentujący serwer został nazwany `NoteEditingSessionServer`, który dziedziczy właściowści po klasie `NSObject`, która jest uniwersalną implementacją wielu zachowań, które są wymagane od frameworków udostępnianych przez Apple, które zostały napisane w języku Objective-C. Jego konstruktor, przedstawiony w algorytmie 3.5, w przyjmowanych argumentach oczekuje tylko obiektu `OwnPeer`, który będzie wykorzystywany do identyfikacji instancji aplikacji u innych klientów. Sama implementacja konstruktora tworzy nową sesję `MCSession`; obiekt `MCNearbyServiceBrowser`, który odpowiada za wykrywanie pobliskich klientów. Finalnie przypisuje referencję do samego siebie jako parametr `delegate` dla utworzonych `MCSession` i `MCNearbyServiceBrowser`. Pozwala nam to zaimplementować metody, które będą wykorzystywane wewnątrz tych obiektów do komunikacji z innymi użytkownikami. Protokoły delegujące dla wspomnianych obiektów nazywają się odpowiednio `MCSessionDelegate` oraz `MCNearbyServiceBrowserDelegate`. Moja implementacja tych protokołów zostanie przedstawiona w dalszej części pracy.

```
init(peer: OwnPeer) {
  ownPeer = peer
  browser = .init(peer: peer.peer, serviceType: "peered")
  session = .init(peer: peer.peer, securityIdentity: nil,
encryptionPreference: .required)
  super.init() // wykonuje pozostałą część
  browser.delegate = self //
  session.delegate = self
}
```

Algorytm 3.5: Implementacja konstruktora obiektu NoteEditingSessionServer

W momencie, gdy autor notatki otworzy ekran edycji, wykonuje się metoda `startServer()`, która wywołuje metodę `startBrowsingForPeers()` obiektu `MCNearbyServiceBrowser`. Opuszczenie ekranu edycji wywołuje metodę `stopServer()`, która wywołuje analogiczną metodę `stopBrowsingForPeers()` oraz zatrzymuje sesję poprzez wywołanie metody `disconnect()` obiektu `MCSession`. Obie metody zostały przedstawione w algorytmie 3.6.

```
func startServer() {
  browser.startBrowsingForPeers()
}

func stopServer() {
  browser.stopBrowsingForPeers()
  session.disconnect()
}
```

Algorytm 3.6: Implementacja metod odpowiedzialnych za nasłuchiwanie na dostępnych klientów

Obiekt `browser` w momencie wykrycia nowego użytkownika w pobliżu, wywołuje naszą metodę o nazwie `browser()`, która przyjmuje wszystkie potrzebne informacje o znalezionym użytkowniku. Implementacja mojego systemu, jak zostało to przedstawione w algorytmie 3.7, następnie upewnia się czy odkryty użytkownik nie jest jednocześnie autorem notatki, co jest znanym błędem w Multipeer Connectivity. Następnie po udanej weryfikacji dodajemy nowy obiekt dostępnego użytkownika do tablicy na podstawie której jest budowany interfejs z listą dostępnych użytkowników.

```
func browser(
    _ browser: MCNearbyServiceBrowser,
    foundPeer peerID: MCPeerID,
    withDiscoveryInfo info: [String: String]?
  ) {
    guard !visiblePeers.contains(where: { $0.mcPeer ==
peerID }) && peerID.displayName != ownPeer.peer.displayName
else { return }
    DispatchQueue.main.async {
      self.visiblePeers.append(Peer(mcPeer: peerID,
state: .available))
    }
  }
```

Algorytm 3.7: Implementacja metody browser wywoływanej w przypadku wykrycia innego klienta

W sytuacji gdy użytkownik straci połączenie z połączonym klientem, następuje usunięcie jego identyfikatora z listy, poprzez wywołanie metody o takiej samej nazwie, ale z parametrami wskazującymi na scenariusz zgubienia klienta, tak jak zostało to zapisane w algorytmie 3.8.

```
func browser(_ browser: MCNearbyServiceBrowser, lostPeer
peerID: MCPeerID) {
  DispatchQueue.main.async {
    guard let peerIdx = self.visiblePeers.firstIndex(where:
{ $0.mcPeer == peerID }) else { return }
    self.visiblePeers.remove(at: peerIdx)
  }
}
```

Algorytm 3.8: Implementacja metody browser wywoływanej gdy aplikacja utraci połączenie z wykrytym klientem

Każda modyfikacja obiektów klasy w tym wypadku musi zostać wywołana na tym samym wątku, ponieważ Multipeer Connectivity nie gwarantuje, że kod będzie się wykonał zawsze na tym samym wątku. Wybrałem wątek główny, ze względu na bezpośrednie użycie właściwości klasy wewnątrz obiektów odpowiedzialnych za budowę interfejsu użytkownika.

Algorytm 3.9 przedstawia część systemu, gdzie o stanie połączenia z innymi klientami system jest informowany przez wykonanie metody `session` z parametrami zawierającymi informację o stanie, który jest reprezentowany przez typ enumeracji, obiekt sesji oraz identyfikator klienta, których ten stan połączenia dotyczy. Na podstawie tych argumentów, aplikacja aktualizuje tablicę `visiblePeers`.

```
func session(
    _ session: MCSession,
    peer peerID: MCPeerID,
    didChange state: MCSessionState
) {
  DispatchQueue.main.async {
    guard let idx = self.visiblePeers.firstIndex(where:
{ $0.mcPeer == peerID }) else { return }
    switch state {
    case .connected:
      self.visiblePeers[idx].state = .joined
    case .notConnected:
      let currentState = self.visiblePeers[idx].state
      if currentState == .invitationPending || currentState
== .joined {
        self.visiblePeers[idx].state = .rejected
      }
    default:
      break
    }
  }
}
```

Algorytm 3.9: Implementacja metody session wywoływanej w przypadku zmiany stanu połączenia z konkretnym klientem

Przechodząc do implementacji klienta, całość jest reprezentowana przez obiekt `NoteEditingSessionClient`. Jego konstruktor, obecny w algorytmie 3.10, przyjmuje tylko identyfikator użytkownika, który jest typem `MCPeerID`, a implementacja obejmuje również stworzenie instancji `MCSession` do wykorzystania w trakcie połączenia z serwerem oraz instancji `MCNearbyServiceAdvertiser`, która propaguje informacje o kliencie do wszystkich innych klientów w pobliżu. Do obu obiektów przypisujemy obiekt delegujący, który będzie właśnie utworzoną instancją `NoteEditingSessionClient`. Dla `MCNearbyServiceAdvertiser` obiekt delegującego musi implementować protokół `MCNearbyServiceAdvertiserDelegate`.

```
init(peer: MCPeerID) {
  ownPeer = peer
  session = MCSession(
    peer: peer,
    securityIdentity: nil,
    encryptionPreference: .required
  )
  advertiser = MCNearbyServiceAdvertiser(
    peer: peer,
    discoveryInfo: [:],
    serviceType: "peered"
  )
  super.init()
  advertiser.delegate = self
  session.delegate = self
}
```

Algorytm 3.10: Implementacja konstruktora obiektu NoteEditingSessionClient

Instancja `NoteEditingSessionClient` jest tworzona już przy pierwszym uruchomieniu aplikacji. Po utworzeniu przez użytkownika przyjaznej nazwy, która będzie używana do identyfikacji, w tle wywoływana jest metoda `startBrowsingForNotes()`, która wywołuje `startAdvertisingPeer()` obiektu `advertiser`. Przed rozpoczęciem nasłuchiwania aplikacja wywołuje również `stopBrowsingForNotes()`, by zatrzymać nasłuchiwanie, jeśli wcześniej było ono rozpoczęte, oraz zatrzymuje działanie obiektu `MCSession`, by zamknąć ewentualnie istniejącą sesję edycji notatki. Obie metody zostały przedstawione w algorytmie 3.11.

```
1  func startBrowsingForNotes() {
2    advertiser.startAdvertisingPeer()
3  }
4
5  func stopBrowsingForNotes() {
6    advertiser.stopAdvertisingPeer()
7    session.disconnect()
8  }
```

Algorytm 3.11: Implementacja metod odpowiedzialnych za nasłuchiwanie na dostępne sesje edycji notatek

Algorytm 3.12 przedstawia jedyną metodę wymaganą przez protokół `MCNearbyServiceAdvertiserDelegate` - nazywa się `advertiser()` i w argumentach przyjmuje informację o otrzymanym zaproszeniu i metadanych jakie to zaproszenie zawierało. Aplikacja próbuje zdekodować migawkę notatki, a następnie konstruuje obiekt `NoteInvitation` i umieszcza go w tablicy `invitations`. Umieszczenie w tablicy trzeba wykonać na głównym wątku, ponieważ, analogicznie jak w wypadku implementacji `MCNearbyServiceBrowserDelegate`, nie mamy gwarancji na jakim wątku będzie wykonywała się ta metoda.

```
func advertiser(
    _ advertiser: MCNearbyServiceAdvertiser,
    didReceiveInvitationFromPeer peerID: MCPeerID,
    withContext context: Data?,
    invitationHandler: @escaping (Bool, MCSession?) -> Void
) {
  guard
    let context,
    let noteContent = try? JSONDecoder().decode(NoteInvitation.NoteContent.self, from: context)
  else { return }

  DispatchQueue.main.async {
    self.invitations.append(
      .init(
        invitatorID: peerID,
        note: noteContent,
        invitationHandler: { [weak self, invitationHandler] accepted in
          guard let self else { return }
          invitationHandler(accepted, self.session)
          DispatchQueue.main.async {
            self.invitations.removeAll { $0.id == peerID }
          }
        }
      )
    )
  }
}
```

Algorytm 3.12: Implementacja metody advertiser wywoływanej podczas otrzymania zaproszenia do sesji

3.5 Transportowanie danych

W wysyłanym zaproszeniu wysyłamy w metadanych migawkę notatki zawierającą jej tytuł oraz ostatnio dostępną treść. Migawka jest kodowana w formacie JSON bazując na strukturze `NoteContent`. Przykładowym poprawnym zapisem JSON tej struktury jest przykład w algorytmie 3.13.

```
{
  "title": "My new note",
  "noteSnapshot": "Lorem Ipsum."
}
```

Algorytm 3.13: Reprezentacja obiektu NoteContent w zapisie JSON

Po stronie klienta, każda zmiana jest ogłaszana serwerowi poprzez wywołanie metody `send()` obiektu `NoteEditingSessionClient`, zapisaną w algorytmie 3.14, która przyjmuje identyfikator użytkownika do które ma wiadomość trafić oraz całą zawartość notatki. Jej implementacja zamienia notatkę wraz z identyfikatorem w typ `NoteMessage`, następnie koduje ją do formatu JSON, finalnie próbuje ją wysłać do określonego użytkownika.

```
func send(note: String, to peer: MCPeerID) {
    let message = NoteMessage(senderID: ownPeer.displayName,
content: note)
    guard let data = try? JSONEncoder().encode(message) else
{ return }
    try? session.send(data, toPeers: [peer], with: .reliable)
  }
```

Algorytm 3.14: Implementacja metody send wysyłającej kopię notatki do serwera

Przykładowy zapis instancji obiektu `NoteMessage` wygląda tak jak w algorytmie 3.15:

```
{
  "senderID": "User2",
  "content": "Lorem Ipsum Test"
}
```

Algorytm 3.15: Reprezentacja obiektu NoteMessage w zapisie JSON

Po tym jak serwer odbierze wysłaną wiadomość, wywoływana jest metoda `session`, widoczna w algorytmie 3.16, która w argumentach przekazuje zakodowane dane, sesję serwera oraz identyfikator użytkownika, który wysłał załączone dane. Po udanym zdekodowaniu danych, wybieramy wszystkich użytkowników, którzy dołączyli do sesji edycji notatki i wysyłamy do nich kopię otrzymanej wiadomości, a serwer dodatkowo wysyła identyczną kopię do warstwy prezentacji.

```
func session(_ session: MCSession, didReceive data: Data,
fromPeer peerID: MCPeerID) {
  guard let message = try?
JSONDecoder().decode(NoteMessage.self, from: data) else
{ return }
    let otherPeers = session.connectedPeers.filter { $0 !=
peerID }

    if !otherPeers.isEmpty {
      try? session.send(data, toPeers: otherPeers,
with: .reliable)
    }

    DispatchQueue.main.async {
      self.noteChangesEmitter.send(message)
    }
  }
```

Algorytm 3.16: Implementacja metody session do otrzymywania danych od innych klientów

3.6 Algorytm rozwiązywania konfliktów

Rozwiązywanie konfliktów jest dokonywane na podstawie strategii Last Writer Wins, gdzie ostatnio otrzymana wiadomość nadpisuje zawartość pozostałych

kopii. W przypadku nanoszenia zmian na interfejs użytkownika, wykorzystałem natywną obsługę zmiany tekstu przez systemowy kompoent `TextEditor`, który w większości wypadków potrafi sobie poradzić czy prostych podmianach zawartości tekstu.

Zrezygnowałem z implementacji struktur danych CRDT ze względu na bardzo wysoki koszt implementacji, ponieważ oprócz samych struktur, musiałbym napisać własną implementację obsługi podmiany tekstu i aktualizacji kursora w edytorze tekstowym, co znacznie wykracza poza zakres tej pracy.

3.7 Środowisko developerskie i stack technologiczny

Uruchomienie projektu wymaga posiadania komputera Macintosh z systemem operacyjnym macOS w wersji 26.0 (Tahoe) oraz środowisko programistyczne Xcode w wersji 26.0. Do uruchomienia aplikacji potrzebne jest założenie konta Apple ID i zaakceptowania warunków użytkowania konta deweloperskiego, dzięki któremu można wygenerować certyfikat, którego potrzebuje Xcode do zbudowania aplikacji.

Aplikacja wykorzystuje framework SwiftUI do budowania warstwy prezentacji. Jest to deklaratywny, wieloplatformowy framework między innymi dostarczający mechanizmy, które zostały wykorzystane w ramach tej pracy:

- automatycznego odświeżania interfejsu na podstawie nasłuchiwania na zmiany modelów danych
- automatycznego zapisu prymitywnych danych na dysku
- wstrzykiwania zależności wgłąb hierarchii interfejsu
- zaawansowanych wzorców stosowanych w tworzeniu dobrych doświadczeń użytkownika - np. wysuwalne panele (bottom sheets).

Kluczowym frameworkiem w budowaniu tej aplikacji jest Multipeer Connectivity, który zapewniał ułatwioną konfigurację całej komunikacji między pobliskimi użytkownikami. Pomocniczymi bibliotekami są `Foundation` oraz `Combine`.

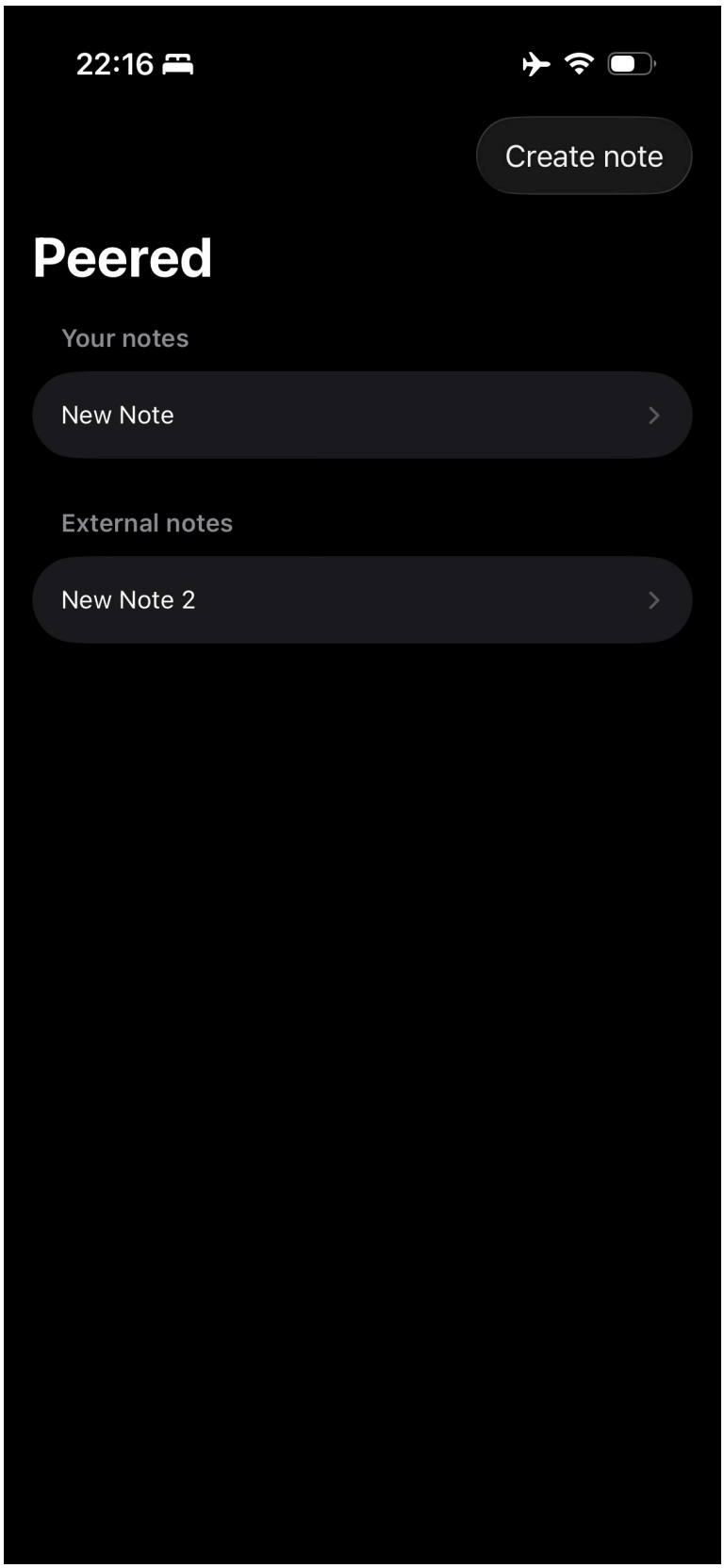
`Foundation` daje dostęp do złożonych, ale bardzo często wykorzystywanych typów i funkcji w Swifcie - `URL`, `FileManager`, `JSONDecoder`, `JSONEncoder`.

`Combine` jest biblioteką dodającą programowanie reaktywne do Swifta, ale również jako pierwsza zapewniła mechanizmy komunikowania zmian w modelach danych do widoków implementowanych w SwiftUI. Moja praca wykorzystywała przede wszystkim obiekty `PassthroughSubjects`, które służyły za obiekty emitujące każde nowo otrzymane dane od innych użytkowników.

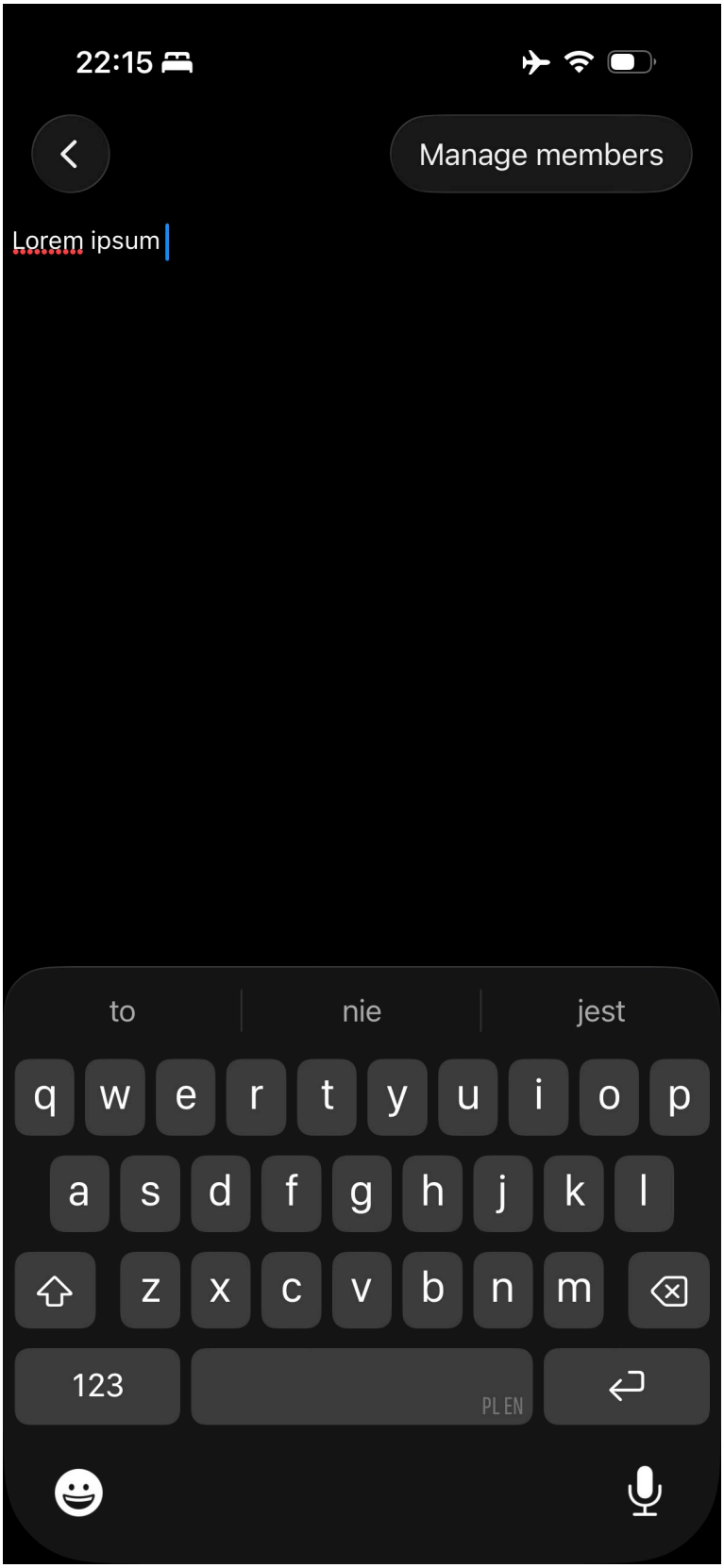
3.8 Interfejs użytkownika

Aplikacja po uruchomieniu przez użytkownika który już ustawił swoją nazwę, pokazuje ekran główny, zaprezentowany na rysunku 3.1, który pogrubioną czcionką o dużym rozmiarze pokazuje nazwę aplikacji - „Peered". Na prawo do góry od napisu znajdziemy przycisk „Create note", który po naciśnięciu dodaje nową notatkę do listy „Your notes". Główną zawartością ekranu jest lista notatek podzielona na dwie sekcje - „Your notes" zawierająca notatki przechowywane w pamięci trwałej urządzenia, oraz „External notes" - notatki które aktualnie udostępnia inny klient w pobliżu urządzenia użytkownika. Po naciśnięciu na wiersz z nazwą notatki z sekcji „Your notes", przejdziemy do ekranu edycji własnej notatki przedstawionego na rysunku 3.2. Ten ekran, oprócz edytora tekstu, na samej górze posiada przycisk „Manage members", który pokazuje ekran zarządzania użytkownikami notatki, widoczny na rysunku 3.3. Możemy na nim zobaczyć listę widocznych użytkowników w pobliżu oraz możliwą akcję do wykonania. Jeśli użytkownik jest widoczny, ale nie został zaproszony, możemy zobaczyć przycisk „Invite". W pozostałych wypadkach widzimy teksty zależne od stanu połączenia - użytkownik, który dołączył będzie miał „Joined". Oczekujący na akceptację będą mieli „Invitation pending", a pozostali „Rejected". Po naciśnięciu na wiersz z nazwą notatki z sekcji „External notes", przejdziemy do ekranu edycji notatki innego użytkownika, gdzie na ekranie będziemy mieli wyłącznie dostęp do edytora tekstu, co można zobaczyć na rysunku 3.4. Jeśli użytkownik nie ustawił jeszcze swojej nazwy w aplikacji, od razu po uruchomieniu aplikacji pokazuje się ekran nadania nazwy użytkownika, widoczny na rysunku 3.5.

Jeśli aplikacja została dopiero zainstalowana, system pokaże też monit użytkownikowi z pytaniem, czy chce aby aplikacja otrzymała dostęp do sieci lokalnej, co zostało przedstawione na rysunku 3.6. Jest to obowiązkowa zgoda dla użytkownika, bez której aplikacja nie będzie w stanie komunikować się z innymi urządzeniami.

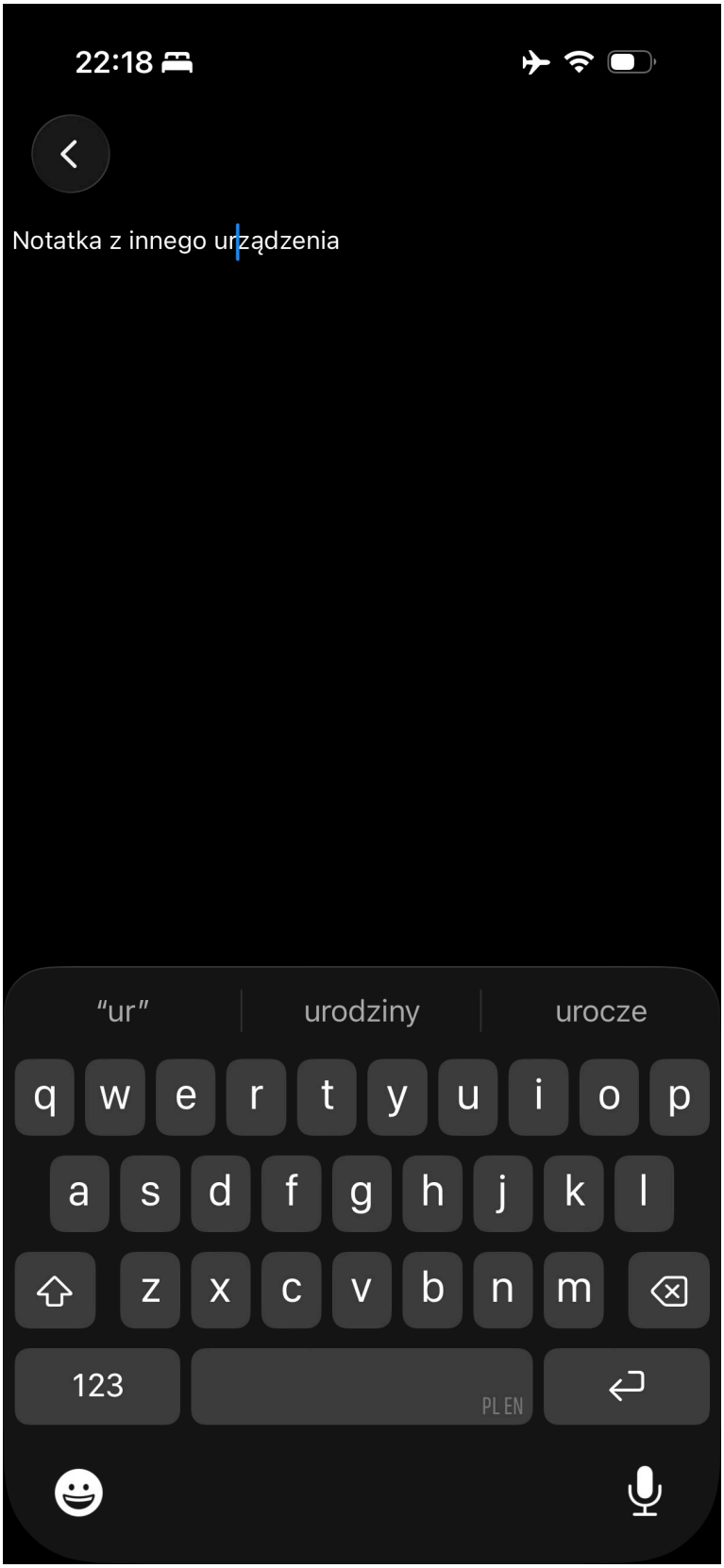


Rysunek 3.1: Ekran główny aplikacji

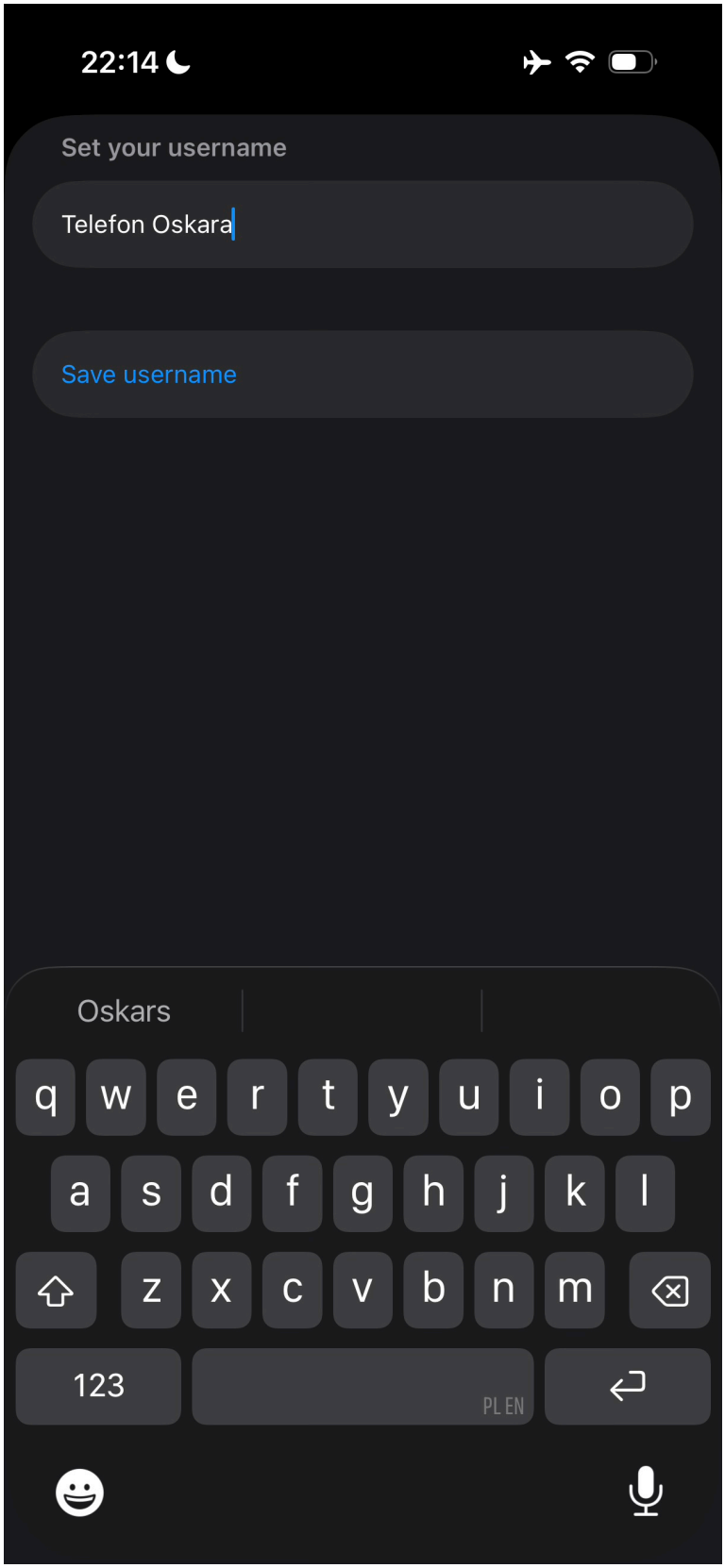


Rysunek 3.2: Ekran edycji własnej notatki

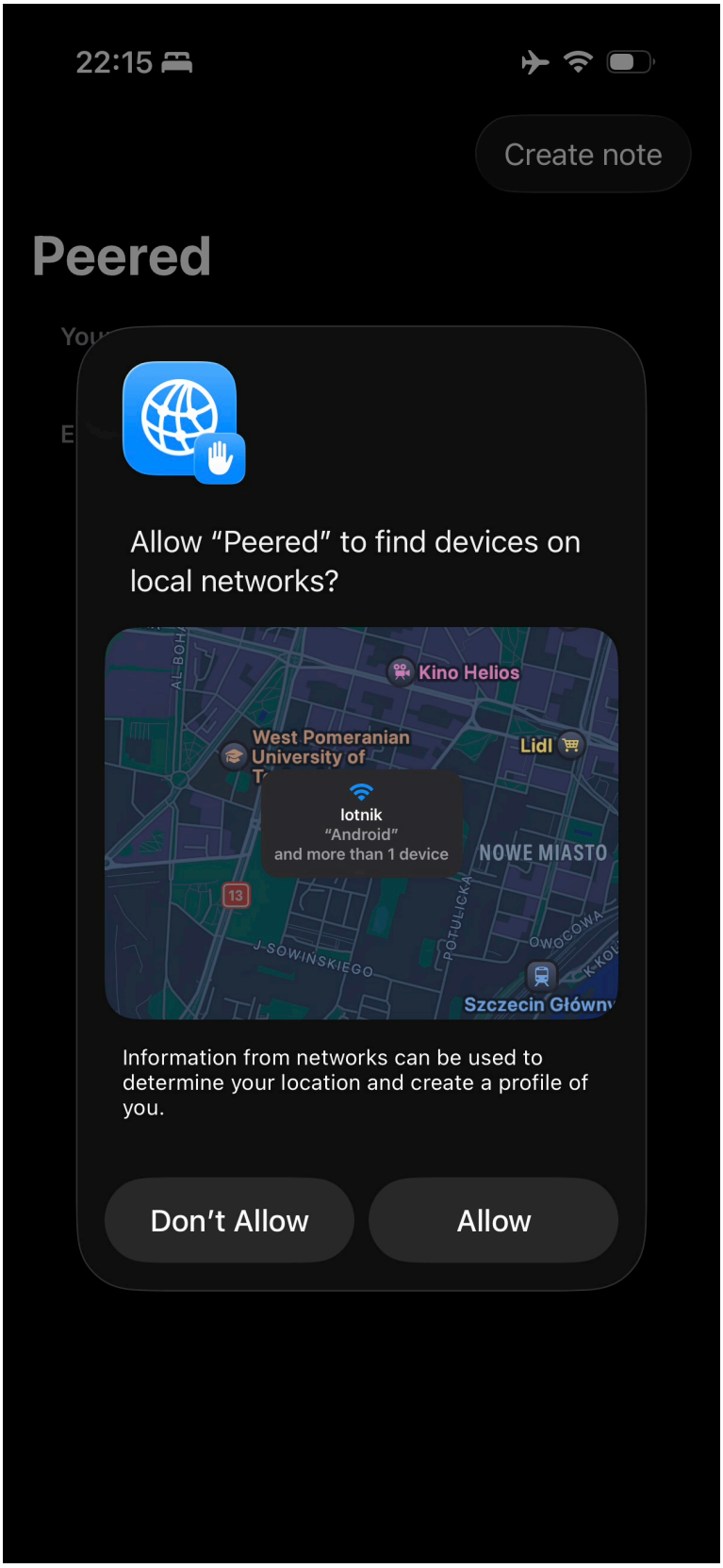
Rysunek 3.3: Ekran zarządzania użytkownikami notatki



Rysunek 3.4: Ekran edycji notatki innego użytkownika



Rysunek 3.5: Ekran nadania nazwy użytkownika



Rysunek 3.6: Monit z prośbą o dostęp do sieci lokalnej

3.9 Napotkane wyzwania implementacyjne i rozwiązania

W czasie implementacji opisywanej aplikacji natknąłem się na problemy, które były związane z poszczególnymi częściami synchronizacji tekstu. Pierwszym z nich jest zachowanie frameworka Multipeer Connectivity, gdzie nasłuchiwanie na dostępnych użytkowników za pomocą `MCNearbyServiceBrowser` wykrywa także samego siebie jako jednego z dostępnych klientów. Skutkowało to wysyłaniem zmian przez urządzenie do samego siebie oraz otrzymywanie zduplikowanych kopii notatek z innych urządzeń. By temu zapobiec, w metodzie obsługującej wykrywanie dostępnych użytkowników - widocznej w algorytmie 3.7 - zaimplementowałem filtr, który ignoruje użytkowników o takiej samej nazwie użytkownika.

Następnym problemem związanym z Multipeer Connectivity jest jego ogólna niestabilność. W sytuacjach, gdzie połączenie staje się niestabilne - oddalenie się od siebie użytkowników, gdy do komunikacji jest wykorzystywany Bluetooth; przełączanie się między sieciami Wi-Fi - otrzymywane zdarzenia nie są deterministyczne. Czasem aplikacja otrzymywała na przemian informacje o rozłączeniu i ponownym połączeniu się z zaproszonymi klientami, czasem nigdy nie otrzymywała informacji o tym, że klient się rozłączył. Podobne problemy zostały zauważone w momencie wyjścia z aplikacji - wielokrotnie aplikacja traciła połączenie z innymi klientami, ale metody, które powinny zostać z tego powodu wywołane, czasami nie były wykonywane.

Ostatnim, najcięższym problemem jest aktualizacja pozycji kursora w edytorze tekstu. W momencie nanoszenia zmian należy rozważyć, czy został wstawiony lub usunięty tekst z części notatki, która znajduje się na wcześniejszej pozycji względem kursora każdego z użytkowników. Jeśli tak, to poprawnym zachowaniem byłoby przeniesienie odpowiednio kursora tak, by żaden z klientów nie spotkał się z sytuacją, gdzie kursor zmienia swoje położenie bez wyraźnej akcji użytkownika. Jest to problematyczne w aktualnej implementacji z dwóch powodów. Pierwszym problemem jest algorytm nanoszenia zmian - ze względu na to, że sposób w jaki ten proces wykonujemy polega na całkowitej podmianie istniejącego tekstu na nowy, powinno się przed jego wykonaniem ustalić wcześniej wspomniane istnienie zmian tekstu na pozycji wcześniejszej od kursora użytkownika. Przez to, że nie wykorzystywane są tutaj struktury CRDT, które mają bardzo dokładne informacje o nanoszonych zmianach, musimy polegać na ręcznej analizie obu ciągów tekstowych. Takie przeliczanie jest też problematyczne w przypadku obsługi wszystkich wspieranych przez system alfabetów. Następnym problemem jest niestabilny interfejs do manipulacji pozycją kursora w edytorze tekstu dostarczanym przez SwiftUI. Proces aktualizacji polega najpierw na wyliczeniu punktu przesunięcia kursora, następnie zamianę tekstu w edytorze na zaktualizowaną wersję i finalnie podmianę pozycji kursora. Testy manualne aplikacji wykazały, że kolejność nanoszenia dwóch

ostatnich zmian an interfejs graficzny użytkownika przez SwiftUI jest niedeterministyczne. Zdarzały się sytuacje, gdzie pozycja kursora była aktualizowana przed naniesieniem nowej wersji tekstu. Bardzo często to się zdarzało w przypadku, gdy zawartość tekstowa była wielkości przynajmniej 1000 znaków. Najstabilniejszym rozwiązaniem, które nie wymagało implementacji struktur CRDT oraz implementacji kursora od zera z wykorzystaniem starszego frameworka - UIKit - okazało się pozostawienie domyślnego zachowania podczas zewnętrznej aktualizacji tekstu w edytorze. Niestety nadal można zaobserwować błędy z tym związane, ale nie są one tak częste jak w przypadku, gdy tym kursorem aplikacja próbowała dodatkowo manipulować obok istniejącego mechanizmu dostarczanego przez SwiftUI, którego nie da się wyłączyć.

3.10 Ograniczenia środowisk iOS/iPadOS

Ze względu na to, że aplikacja została napisana w pełni z wykorzystaniem natywnych technologii - Swift, SwiftUI, Combine, Multipeer Connectivity - projekt aplikacji jest niemożliwy do zbudowania bez posiadania komputera z najnowszą wersją systemu macOS oraz środowiska programistycznego Xcode. Kolejnym problemem jest obowiązek posiadania konta Apple Developer, który wymaga wyrażenia zgody na regulamin użytkowania oprogramowania dostarczanego przez firmę Apple do rozwoju aplikacji na systemy operacyjne iOS i iPadOS. Wszystkie wspomniane wymogi sprawiają, że kontrybucja do kodu źródłowego aplikacji jak i jej kompilacja we własnym zakresie jest bardzo utrudniona.

Następnym problemem jest interfejs frameworku Multipeer Connectivity. Opiera się on na przekazywaniu obustronnie specjalnych obiektów oraz narzuca konkretne sposoby wymiany danych między instancjami aplikacji. Sprawia to, że implementacja, bez tworzenia dodatkowych warstw abstrakcji, nie jest możliwa do rozszerzenia o wsparcie innych systemów operacyjnych. Rozważaną alternatywą było użycie frameworku Network, który opiera się na przesyłaniu ramek TCP, ale to znacznie zwiększało złożoność całej implementacji.

4 Testowanie i weryfikacja

W celu zapewnienia poprawności działania zaimplementowanej aplikacji oraz weryfikacji spełnienia przyjętych wymagań funkcjonalnych i niefunkcjonalnych, przeprowadziłem testy obejmujące warstwę logiki biznesowej, kodowania danych oraz interakcje między urządzeniami. Poniższy rozdział opisuje przyjętą metodologię testowania, zaimplementowane testy jednostkowe, scenariusze testowe przeprowadzone w środowisku rzeczywistym oraz analizę wydajności i zużycia zasobów systemowych.

4.1 Metodologia testowania

1. Testy jednostkowe - weryfikacja izolowanych komponentów logiki biznesowej z wykorzystaniem zastępczych implementacji zależności. Do ich implementacji wykorzystano framework Swift Testing, dostępny od wersji Xcode 16 oraz systemów operacyjnych z rodziny iOS/iPadOS 18. Framework ten oferuje nowoczesną składnię opartą na atrybutach, wbudowane wsparcie dla testów parametrycznych.
2. Testy integracyjne i scenariuszowe - ręczna weryfikacja poprawności komunikacji peer-to-peer, odkrywania urządzeń oraz synchronizacji notatek w rzeczywistym środowisku sieciowym (Wi-Fi oraz Bluetooth).
3. Testy wydajnościowe - pomiar czasów propagacji zmian, zużycia pamięci operacyjnej oraz obciążenia procesora w trakcie działania aplikacji.

Testy jednostkowe zostały wykonane w izolacji od systemu plików oraz frameworka Multipeer Connectivity poprzez wstrzyknięcie abstrakcji `StorageProvider`. Dzięki temu możliwa była szybka i powtarzalna weryfikacja logiki przechowywania notatek bez konieczności przygotowywania fizycznego katalogu na dysku.

4.2 Testy jednostkowe

Podstawowym przetestowanym komponentem jest klasa `NotesStorage`, odpowiedzialna za zarządzanie cyklem życia notatek w lokalnym systemie plików. Do testów przygotowałem zastępczą implementację `InMemoryStorageProvider` (algorytm 4.1), która symuluje zachowanie systemu plików w pamięci operacyjnej.

Implementacja ta przechowuje pliki w słowniku, udostępniając zawartość katalogu oraz tworzenia plików zgodnie z protokołem `StorageProvider`.

```
final class InMemoryStorageProvider: StorageProvider {
    private(set) var files: [String: Data] = [:]

    func contentsOfDirectory(atPath path: String) throws ->
[String] {
        return files.keys.compactMap { filePath -> String? in
            guard filePath.hasPrefix(path) else { return nil }
            let remainder =
String(filePath.dropFirst(path.count))
            let stripped = remainder.hasPrefix("/") ?
String(remainder.dropFirst()) : remainder
            guard !stripped.isEmpty, !stripped.contains("/")
else { return nil }
            return stripped
        }
    }

    @discardableResult
    func createFile(
        atPath path: String,
        contents data: Data?,
        attributes attr: [FileAttributeKey: Any]?
    ) -> Bool {
        files[path] = data ?? Data()
        return true
    }
}
```

Algorytm 4.1: Implementacja zastępczego StorageProvider dla testów jednostkowych

Na bazie powyższego kodu zbudowałem pięć przypadków testowych klasy `NotesStorageTests` (algorytm 4.2). Pierwszy z nich weryfikuje, że przy pustym katalogu metoda `loadNotes()` zwraca pustą tablicę. Kolejne dwa testy sprawdzają poprawność tworzenia pliku oraz odczytu istniejącej notatki. Ostatni test sprawdza, czy dwukrotne wywołanie metody tworzącej notatkę o tej samej nazwie generuje dwa odrębne obiekty.

```
@Suite
struct NotesStorageTests {
    private func makeStorage(root: URL = URL(filePath: "/test")) -> (NotesStorage, InMemoryStorageProvider) {
        let provider = InMemoryStorageProvider()
        let storage = NotesStorage(storageProvider: provider, rootDirectory: root)
        return (storage, provider)
    }

    @Test
    func loadNotesReturnsEmptyArrayWhenNoFiles() {
        let (storage, _) = makeStorage()
        let notes = storage.loadNotes()
        #expect(notes.isEmpty)
    }

    @Test
    func createNoteCreatesFile() {
        let root = URL(filePath: "test")
        let (storage, provider) = makeStorage(root: root)
        storage.createNote(name: "My note")
        #expect(!provider.files.isEmpty)
    }

    @Test
    func loadNotesReturnCreatedNote() {
        let root = URL(filePath: "/test")
        let (storage, provider) = makeStorage(root: root)
        let filePath = root.appendingPathComponent("Note").path
        provider.createFile(atPath: filePath, contents: Data(), attributes: nil)
        let notes = storage.loadNotes()
        #expect(notes.count == 1)
        #expect(notes.first?.name == "Note")
    }

    @Test
    func createNoteDeduplicatesNames() {
        let root = URL(filePath: "/test")
        let (storage, provider) = makeStorage(root: root)
        let existingPath = root.appendingPathComponent("Note").path
        provider.createFile(atPath: existingPath, contents: Data(), attributes: nil)
        storage.createNote(name: "Note")
        #expect(provider.files.count == 2)
        let paths = provider.files.keys
        #expect(paths.contains(where: { $0.contains("Note 1") }))
    }

    @Test
    func createNoteTwiceCreatesTwoFiles() {
        let root = URL(filePath: "/test")
        let (storage, _) = makeStorage(root: root)
        storage.createNote(name: "Note")
        storage.createNote(name: "Note")
```

Algorytm 4.2: Testy jednostkowe dla NotesStorage

4.2.1 Weryfikacja kodowania danych sieciowych

Komunikacja między urządzeniami wymaga poprawnej serializacji i deserializacji obiektów domenowych do formatu JSON. W ramach testów jednostkowych zweryfikowano dwie kluczowe struktury: `NoteMessage` oraz `NoteInvitation.NoteContent`.

`NoteMessageCodableTests` (algorytm 4.3) zawiera trzy przypadki testowe. Pierwszy sprawdza, czy obiekt jest poprawnie kodowany do formatu JSON z zachowaniem oczekiwanych nazw kluczy (`senderID`, `content`). Drugi weryfikuje poprawność dekodowania z ciągu znaków JSON. Trzeci test polega na zakodowaniu obiektu, potem zdekodowaniu i porównaniu go z obiektem oryginalnym.

```
1  @Suite
2  struct NoteMessageCodableTests {
3      @Test
4      func encodesToJSON() throws {
5          let message = NoteMessage(senderID: "host", content:
   "Content")
6          let data = try JSONEncoder().encode(message)
7          let json = try #require(try?
   JSONSerialization.jsonObject(with: data) as? [String: String])
8          #expect(json["senderID"] == "host")
9          #expect(json["content"] == "Content")
10     }
11
12     @Test
13     func decodesFromJSON() throws {
14         let json =
   #"{"senderID":"host","content":"contentt"}"#
15         let data = try #require(json.data(using: .utf8))
16         let message = try
   JSONDecoder().decode(NoteMessage.self, from: data)
17         #expect(message.senderID == "host")
18         #expect(message.content == "contentt")
19     }
20
21     @Test("encode → decode")
22     func coding() throws {
23         let original = NoteMessage(senderID: "host", content:
   "coding test")
24         let data = try JSONEncoder().encode(original)
25         let decoded = try
   JSONDecoder().decode(NoteMessage.self, from: data)
26         #expect(decoded.senderID == original.senderID)
27         #expect(decoded.content == original.content)
28     }
29 }
```

Algorytm 4.3: Testy kodowania i dekodowania NoteMessage

Analogiczny zbiór testów został przygotowany dla struktury `NoteInvitation.NoteContent` (algorytm 4.4), która reprezentuje migawkę notatki przesyłaną w zaproszeniu do sesji.

```
@Suite
struct NoteContentCodableTests {
    @Test("encode → decode")
    func coding() throws {
        let original = NoteInvitation.NoteContent(title: "My note", noteSnapshot: "Note Sample Snapshot")
        let data = try JSONEncoder().encode(original)
        let decoded = try JSONDecoder().decode(NoteInvitation.NoteContent.self, from: data)
        #expect(decoded.title == original.title)
        #expect(decoded.noteSnapshot == original.noteSnapshot)
    }

    @Test
    func containsExpectedKeys() throws {
        let content = NoteInvitation.NoteContent(title: "Titlee", noteSnapshot: "Snapshott")
        let data = try JSONEncoder().encode(content)
        let json = try #require(try? JSONSerialization.jsonObject(with: data) as? [String: String])
        #expect(json["title"] == "Titlee")
        #expect(json["noteSnapshot"] == "Snapshott")
    }
}
```

Algorytm 4.4: Testy kodowania i dekodowania NoteContent

`NoteInvitationTests` (algorytm 4.5) obejmuje siedem przypadków testowych. Dwa pierwsze weryfikują, czy metody `accept()` oraz `decline()` przekazują odpowiednio wartości logiczne `true` i `false` do handlera. Kolejne dwa testy sprawdzają czy wielokrotne wywołanie tej samej metody nie powoduje powtórnego wywołania handlera. Piąty test gwarantuje, że po zaakceptowaniu zaproszenia próba jego odrzucenia jest ignorowana. Ostatnie dwa testy weryfikują poprawność obliczanych właściwości: `noteName` zwraca tytuł notatki, a `id` jest tożsame z identyfikatorem nadawcy (`MCPeerID`).

```
@Suite
struct NoteInvitationTests {
    @Test
    func acceptCallsHandlerWithTrue() {
        var received: Bool? = nil
        var invitation = NoteInvitation { received = $0 }
        invitation.accept()
        #expect(received == true)
    }

    @Test
    func declineCallsHandlerWithFalse() {
        var received: Bool? = nil
        var invitation = NoteInvitation { received = $0 }
        invitation.decline()
        #expect(received == false)
    }

    @Test
    func acceptIsIdempotent() {
        var callCount = 0
        var invitation = NoteInvitation { _ in callCount += 1 }
        invitation.accept()
        invitation.accept()
        #expect(callCount == 1)
    }

    @Test
    func declineIsIdempotent() {
        var callCount = 0
        var invitation = NoteInvitation { _ in callCount += 1 }
        invitation.decline()
        invitation.decline()
        #expect(callCount == 1)
    }

    @Test
    func declineAfterAcceptIsNoOp() {
        var callCount = 0
        var invitation = NoteInvitation { _ in callCount += 1 }
        invitation.accept()
        invitation.decline()
        #expect(callCount == 1)
    }

    @Test
    func noteNameReturnsTitle() {
        let invitation = NoteInvitation { _ in }
        #expect(invitation.noteName == "Shared note")
    }

    @Test
    func idIsInvitatorPeerID() {
        let peerID = MCPeerID(displayName: "host")
        let invitation = NoteInvitation(
            invitatorID: peerID,
            note:  init(title: "T", noteSnapshot: "S")
```

Algorytm 4.5: Testy jednostkowe NoteInvitation

4.3 Scenariusze testowe

Ze względu na złożoność oraz niedeterministyczny charakter frameworka Multipeer Connectivity, część funkcjonalności aplikacji wymagała ręcznej weryfikacji w rzeczywistym środowisku. Testy scenariuszowe przeprowadzono na dwóch fizycznych urządzeniach: iPhone 16 Pro (iOS 26) oraz iPad Air 2020 (iPadOS 26), połączonych wspólną siecią Wi-Fi oraz z włączonym modułem Bluetooth. Odległość między urządzeniami wynosiła około 2 metry.

Scenariusz 1: Odkrywanie urządzeń w sieci lokalnej.

Celem była weryfikacja wymagania funkcjonalnego dotyczącego rozgłaszania obecności oraz wykrywania innych klientów. Użytkownik A (serwer) otworzył ekran edycji notatki, natomiast użytkownik B (klient) pozostawał na ekranie głównym. Oczekiwanym rezultatem było pojawienie się identyfikatora użytkownika B na liście dostępnych klientów w ekranie zarządzania członkami. Test zakończył się sukcesem - urządzenie B zostało wykryte w ciągu mniej niż 2 sekund.

Scenariusz 2: Wysyłanie i akceptacja zaproszenia.

Użytkownik A wysłał zaproszenie do edycji notatki użytkownikowi B. Na urządzeniu B pojawiło się powiadomienie o zaproszeniu z prawidłowym tytułem notatki. Po akceptacji notatka pojawiła się w sekcji „External notes” na urządzeniu B, a użytkownik A otrzymał informację o dołączeniu klienta do sesji poprzez zmianę status obok nazwy na „Joined”.

Scenariusz 3: Synchronizacja treści notatki w czasie rzeczywistym.

Użytkownik A dokonywał zmian w treści notatki, podczas gdy użytkownik B miał otwartą tę samą notatkę w trybie edycji. Zmiany wprowadzane przez użytkownika A pojawiały się na urządzeniu użytkownika B z opóźnieniem nieprzekraczającym 1s.

4.4 Analiza wydajności i zużycia zasobów

Weryfikacja wymagań niefunkcjonalnych została uzupełniona o pomiary wydajnościowe przeprowadzone przy użyciu narzędzi Instruments dostarczanych wraz z Xcode.

Średnie zużycie pamięci RAM przy uruchomionej aplikacji, bez aktywnej sesji edycji, wynosiło 20 MB. Podczas aktywnej sesji peer-to-peer z dwoma połączonymi klientami zużycie wzrastało do 30 MB. Wzrost ten jest spowodowany głównie utrzymywaniem obiektów związanych z sesją `MCSession` oraz obsługą komponentu

edycji tekstu `TextEditor`. Nie zaobserwowano wycieków pamięci w trakcie użytkowania.

Obciążenie procesora w stanie spoczynku wynosiło 0-1%, gdzie przedział maksymalny wynosi 0-600%, ze względu na obecność 6 rdzenii, których zużycie, w zakresie 0-100%, się sumuje. Podczas intensywnej edycji tekstu z jednoczesną synchronizacją obciążenie wzrastało do 30-40% na urządzeniu iPhone 16 Pro. Głównym źródłem obciążenia była obsługa edycji tekstu oraz wysyłanie danych przez framework Multipeer Connectivity.

Podsumowując - przeprowadzone testy jednostkowe, scenariuszowe oraz wydajnościowe potwierdzają, że zaimplementowana aplikacja spełnia przyjęte wymagania funkcjonalne i niefunkcjonalne. Architektura oparta na protokole `StorageProvider` umożliwiła efektywne testowanie logiki przechowywania, natomiast manualne scenariusze wykazały stabilność komunikacji P2P w typowych warunkach użytkowania.

5 Podsumowanie i kierunki rozwoju

W tym rozdziale opiszę i ocenię zakres wymagań jaki udało się spełnić w ramach opisanej implementacji, a na końcu wymienię propozycje usprawnień implementacji. Propozycje składają się ze zmian zbyt złożonych bym mógł je podjąć przed zakończeniem tej pracy inżynierskiej.

5.1 Osiągnięte cele

Przygotowana implementacja spełnia wszystkie podstawowe wymagania jakie zostały nakreślone w tej pracy - została stworzona aplikacja mobilna na systemy operacyjne iOS i iPadOS, która, wykorzystując wbudowany framework Multipeer Connectivity, umożliwia współtworzenie notatek wśród użytkowników, którzy znajdują się w zasięgu określonych sieci bezprzewodowych. Istnieje możliwość zapraszania pobliskich użytkowników, dołączania do innych sesji, podstawowej edycja tekstu, trwałego przechowywania własnych notatek w pamięci urządzeniach. Do osiągnięcia tego nie potrzeba centralnego serwera obsługującego ruch klientów, ponieważ klienci między sobą negocjowali nanoszenie zmian. Dzięki braku potrzeby centralnego serwera, nie ma też konieczności, aby urządzenia klienckie miały dostęp do Internetu. Do współpracy wystarczy działający moduł Bluetooth lub Wi-Fi. Synchronizacja znajduje się w założonym limicie czasowym, bez zaobserwowanych większych niż założone opóźnień. Finalnie zostały przeprowadzone testy jednostkowe jak i manualne, które zweryfikowały poprawność implementacji.

5.2 Możliwości dalszej rozbudowy

O ile przedstawiony program spełnia określone wymagania, tak istnieje duże pole do znacznych optymalizacji skutkujących lepszymi doświadczeniami użytkownika, stabilnością systemu, większą niezależnością od konkretnego systemu operacyjnego.

Największą zmianą jest przejście z frameworka Multipeer Connectivity na Network. W tym wypadku będzie trzeba zaimplementować własny protokół oparty na

TCP, ale taka implementacja będzie mogła być użyta również na innych platformach, nie tylko tych, które udostępnia firma Apple. Otrzymamy dzięki tej zmianie również większą stabilność, ponieważ Network nie wykonuje tak dużo zadań jak Multipeer Connectivity, które ukrywa duże ilości problemów za niewidoczną dla programisty abstrakcją. Do tego Network otrzymuje znacznie częściej aktualizacje oraz jest lepiej zintegrowany z językiem programowania Swift.

Kolejną dużą zmianą jest zastosowanie innego komponentu do edycji tekstu niż `TextEditor` dostępny w frameworku SwiftUI. Lepszym wyborem byłby `UITextView` dostępny w frameworku UIKit, który daje programiście znacznie większą kontrolę nad zachowaniami - zaznaczaniem, wstawianiem, usuwaniem tekstu. Dzięki temu można osiągnąć znacznie stabilniejsze zachowanie kursora w trakcie równoczesnej edycji tej samej notatki przez wielu użytkowników na raz, które byłoby zbliżone do aktualnie popularnych rozwiązań zcentralizowanych.

Ostatnią propozycją większej zmiany jest zastosowanie bezkonfliktowych struktur danych (CRDT), które pozwoliłyby na wysyłanie znacznie mniejszej ilości danych między użytkownikami w tej samej sesji. Pozwoliłoby to na znacznie wydajniejszą pod kątem zużycia zasobów komunikację oraz szybszą w przypadku bardzo dużych notatek.

Mniejszymi elementami możliwymi do rozbudowy jest lepsza obsługa błędów - często się zdarza że klient, który utracił połączenie jest traktowany tak samo jak klient który odrzucił zaproszenie do edycji notatki. Dodatkowo aktualnie użytkownik nie jest w stanie usunąć zaproszonego do edycji użytkownika. Kolejną wartościową funkcjonalnością byłaby możliwość wyświetlania jako klient innych użytkowników notatki. Ostatnią z funkcjonalności, choć niemałą, byłoby dodanie możliwości formatowania tekstu oraz umieszczenia zawartości innej niż tekst.

Spis literatury

Artykuły

[1] Werner Vogels. „Eventually consistent”. W: 52.1 (2009-01), s. 40–44.

[2] Victor B. F. Gomes, Martin Kleppmann, Dominic P. Mulligan i Alastair R. Beresford. „Verifying strong eventual consistency in distributed systems”. W: 1.OOPSLA (2017-10).

[3] David A. Nichols, Pavel Curtis, Michael Dixon i John Lamping. „High-latency, low-bandwidth windowing in the Jupiter collaboration system”. W: (1995), s. 111–120.

[4] Nicolas Vidot, Michelle Cart, Jean Ferrié i Maher Suleiman. „Copies convergence in a distributed real-time collaborative environment”. W: (2000), s. 171–180.

[5] Gérald Oster, Pascal Molli, Pascal Urso i Abdessamad Imine. „Tombstone Transformation Functions for Ensuring Consistency in Collaborative Editing Systems”. W: (2006), s. 1–10.

[6] Hyun-Gul Roh, Myeongjae Jeon, Jin-Soo Kim i Joonwon Lee. „Replicated abstract data types: Building blocks for collaborative applications”. W: 71.3 (2011), s. 354–368.

[7] Gérald Oster, Pascal Urso, Pascal Molli i Abdessamad Imine. „Data consistency for P2P collaborative editing”. W: (2006), s. 259–268.

[8] Nuno Preguica, Joan Manuel Marques, Marc Shapiro i Mihai Letia. „A Commutative Replicated Data Type for Cooperative Editing”. W: (2009), s. 395–403.

Źródła internetowe i inne

[9] Apache. *Data versioning - Apache Cassandra Documentation*. URL: `https://cassandra.apache.org/doc/latest/cassandra/architecture/dynamo.html#data-versioning`.

[10] Microsoft. *Peer To Peer Transactional Replication - Microsoft SQL Server documentation*. URL: `https://learn.microsoft.com/en-us/sql/relational-databases/replication/transactional/peer-to-peer-transactional-replication?view=sql-server-ver17`.

[11] Weixin Yu i Kaylee Xie. *A Paxos-Based Strongly Consistent Live Document Editor*. URL: `https://www.scs.stanford.edu/26wi-cs244c/proj/live_document_editor.pdf`.

[12] John Day-Richter. *What's Different About New Google Docs*. URL: `https://drive.googleblog.com/2010/09/whats-different-about-new-google-docs.html`.

[13] Evan Wallace. *How Figma's Multiplayer Technology Works*. URL: `https://www.figma.com/blog/how-figmas-multiplayer-technology-works/`.