



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

Zakres teoretyczny	4
Systemy współdzielenia dokumentów w czasie rzeczywistym	4
Algorytmy zapewniające silną ewentualną zbieżność	5
Architektura Peer-To-Peer w środowiskach mobilnych	5
Architektura Peer-To-Peer w systemach iOS, iPadOS, macOS, tvOS	6
Istniejące rozwiązania i ich problemy	7
Wymagania systemowe	9
Wymagania funkcjonalne	9
Wymagania нефункционалне	9
Wydajność i skalowalność	9
Bezpieczeństwo i prywatność	9
Implementacja	10
Projekt architektury systemu	10
Model danych	10
Warstwa sieciowa i komunikacja P2P	10
Odkrywanie innych urządzeń	10
Transportowanie danych	10
Algorytm rozwiązywania konfliktów	10
Środowisko developerskie i stack technologiczny	10
Implementacja logiki P2P	10
Interfejs użytkownika	10
Napotkane wyzwania implementacyjne i rozwiązania	10
Ograniczenia środowisk iOS/macOS	10
Testowanie i weryfikacja	11
Metodologia testowania	11
Scenariusze testowe	11
Analiza wydajności i zużycia zasobów	11
Podsumowanie i kierunki rozwoju	12
Osiągnięte cele	12
Ocena spełnienia wymagań	12
Możliwości dalszej rozbudowy	12
Szyfrowanie end-to-end	12
Optymalizacja dużych dokumentów	12
Spis literatury	13
Artykuły	13
Źródła internetowe i inne	13

Zakres teoretyczny

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 użytkownika 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. Najczęściej 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 struktury 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 opóźnień, co redukuje problem używalności takiego rozwiązania w rzeczywistych zastosowaniach.[11]

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 dystrybuujący 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 złożoność 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].

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).

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 wykorzystującego 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 połączanego klienta od razu po dołączeniu do sesji do której został zaproszony, 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 między 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 wydanych w 2025 roku. Network wraz z własnym protokołem ramkowania jest dostępny od wersji systemów operacyjnych wydanych w 2019 roku.

W przypadku oparcia aplikacji komunikującej 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 przez dealokację. 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`.

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.

Wymagania systemowe

Wymagania funkcjonalne

Wymagania нефunkcjonalne

Wydajność i skalowalność

Bezpieczeństwo i prywatność

Implementacja

Projekt architektury systemu

Model danych

Warstwa sieciowa i komunikacja P2P

Odkrywanie innych urządzeń

Transportowanie danych

Algorytm rozwiązywania konfliktów

Środowisko developerskie i stack technologiczny

Implementacja logiki P2P

Interfejs użytkownika

Napotkane wyzwania implementacyjne i rozwiązania

Ograniczenia środowisk iOS/macOS

Testowanie i weryfikacja

Metodologia testowania

Scenariusze testowe

Analiza wydajności i zużycia zasobów

Podsumowanie i kierunki rozwoju

Osiągnięte cele

Ocena spełnienia wymagań

Możliwości dalszej rozbudowy

Szyfrowanie end-to-end

Optymalizacja dużych dokumentów

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/>.