



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky a ekologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh a realizace real-time komunikace pro senzorickou síť
s webovou řídicí aplikací

Design and Implementation of Real-time Communication for
Sensory Network with Website Based Control Application

Autor práce: Martin Zlámal
Vedoucí práce: Ing. Petr KRIST, Ph.D.

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ZLÁMAL**

Osobní číslo: **E13B0267P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Technická ekologie**

Název tématu: **Návrh a realizace real-time komunikace pro senzorickou síť s webovou řídicí aplikací**

Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte si a teoreticky zpracujte dostupné materiály k problematice real-time komunikací pro inteligentní senzorické sítě s přihlédnutím k webovým aplikacím. Seznamte se s hardwarovými prostředky senzorické sítě.
2. Na základě předchozího bodu zvolte vhodnou technologii a navrhnete strukturu programového řešení v závislosti na dostupném hardware.
3. Napište program obsluhující komunikační jednotky senzorické sítě a naprogramujte webovou aplikaci pro ovládání této sítě.
4. Rozeberte možnosti praktické aplikace této sítě a její možnosti rozšíření.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Krist, Ph.D.**


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Text abstraktu v češtině...

Klíčová slova

Abstract

Text abstraktu v angličtině...

Key Words

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Obsah

Seznam obrázků	vi
Seznam symbolů a zkratek	vii
1 Úvod	1
2 Real-time komunikace	2
2.1 Hardwarové prostředky senzorické sítě	3
2.2 Real-time ve webových aplikacích	4
2.3 TCP	5
2.4 UDP	6
3 Volba vhodné technologie	8
3.1 Prvky senzorické sítě	8
3.1.1 Procesor STM32F207IGH6	8
3.1.2 Procesor STM32F457IGH6	9
3.2 Real-time server	10
3.3 Databázový server	10
3.3.1 Redis klíče	11
3.3.2 Datová struktura string	11
3.3.3 Datová struktura hash	12
3.3.4 Datová struktura list	12
3.3.5 Datová struktura set a sorted set	12
3.3.6 Datová struktura bitmap	13
3.3.7 Datová struktura hyperloglog	13
3.3.8 Výkon Redisu	13
3.3.9 RESP protokol	15
3.4 Webová aplikace	16
4 Struktura programového řešení	17
4.1 Komunikace koncentrátor - server	18

4.2	Komunikace server - koncentrátor	19
4.3	Komunikace server - webová aplikace	19
5	Praktická aplikace	20
6	Rozšíření stávajícího řešení	24
7	Závěr	26

Seznam obrázků

2.1	Uspořádání TCP packetu	6
2.2	Uspořádání UDP datagramu	7
3.1	Použitá vývojová deska	9
4.1	Struktura programového řešení	18
5.1	Úvodní stránka aplikace - přehled připojených zařízení	20
5.2	Převodní funkce vstupních hodnot	22
5.3	Detailní pohled na připojené zařízení	23

Seznam symbolů a zkratek

AJAX	Asynchronous JavaScript and XML
AJAJ	Asynchronous JavaScript and JSON
BGA	Ball Grid Array
CAN	Controller Area Network
CPU	Central Processing Unit
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
EDA	Event-Driven Architecture
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IP	Internet Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
JSONP	JSON with padding
MAC	Media Access Control
MVC	Model View Controller
RAM	Random-Access Memory
RESP	Redis Serialization Protocol
RFC	Request for Comments
RTT	Round Trip Time
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UTP	Unshielded Twisted Pair
UFBGA	Ultra Fine BGA
XHR	XMLHttpRequest
XML	Extensible Markup Language

1

Úvod

Cílem této práce je navrhnout komunikaci pro senzorickou síť s přihlédnutím k tomu, že by tato síť měla být ovladatelná v reálném čase z webové řídicí aplikace. Toto je velmi zásadní požadavek pro budoucí realizaci, protože z hlediska elektronických systémů je real-time komunikaci možné realizovat pomocí protokolů k tomu určených, které vymezují přenos dat do přesně definovaných časových slotů (Ethernet Powerlink, Time-triggered CAN, FlexRay). U webových aplikací žádný takový prvek neexistuje a webová řídicí aplikace se tak stává limitujícím prvkem celé sítě. Existují však metody, které se real-time komunikaci resp. rychlé komunikaci, jak je real-time u webových aplikací všeobecně chápán, mohou velmi přiblížit. V roce 2011 bylo vydáno RFC 6455 [1], které zastřešuje nový protokol websocket, který umožňuje propojení serveru a klientské části aplikace socketem a je tak možné přenášet informace velmi vysokou rychlostí, což doposud nebylo prakticky téměř možné realizovat.

V následující části práce bude rozebrána problematika komunikace senzorické sítě s webovou řídicí aplikací, ze které vyplyne, že nejvhodnějším řešením je naprogramovat jednotlivé členy senzorické sítě co nejvíce nízkoúrovňově, následně je propojit s řídicím serverem, na kterém poběží Node.js real-time server (asynchronní single-thread) pro zpracovávání požadavků a zároveň zde poběží server pro webovou aplikaci, která bude využívat websocket protokolu a aby nástroje pro komunikaci s tímto serverem. Zároveň je tato senzorická síť uváděna na příkladu administrativní budovy resp. jakéhokoliv objektu kde se běžně pohybují lidé a využívají konvenční elektroinstalaci, tzn. například domácí objekty, popřípadě jiné objekty podobného charakteru kde má využití této sítě praktický přínos.

2

Real-time komunikace

Real-time komunikace představuje významný prvek v aplikacích, kde je zapotřebí přesných časových rámování přenášeného signálu. Real-time systém je buď hardwarový nebo softwarový systém, který by měl komunikovat s řídicím systémem v přesně stanovených časových periodách. Tato definice tedy neznamena, že by měl systém odpovídat, nebo posílat data okamžitě, ale že garantuje reakci systému v daném časovém intervalu a to buď reakcí na výzvu od řídicího signálu, nebo ve fixní časy (tedy v relativní nebo absolutní čas) [2]. Dále lze real-time komunikaci rozdělit na tzv. soft real-time a hard real-time. Rozdíl je pouze v samotném přístupu ke spolehlivosti přenosu informace. U soft real-time přístupu je možné připustit, že se informace po nějakém čase zahodí, jelikož je již nežádoucí. Jinými slovy, pokud informace nedorazí do přijímače v určitém čase, postrádá svojí informační hodnotu. Toto by měl však být pouze ojedinělý stav. U hard real-time toto není přípustné. Tento přístup se tak hodí pro aplikace vyžadující velmi vysokou spolehlivost a je tak méně častý.

Obecně lze však za real-time aplikaci uvažovat systém, který reaguje na požadavky bez zbytečného dopravního zpoždění, které je například u webových aplikací naprosto běžné a odezvy v přesně definovaných časových odezvách se nepoužívají zejména z důvodu rychlosti. Je totiž mnohem důležitější odeslat data ze serveru co nejrychleji, než je posílat podle časově definovaných oken. Předejít však dopravnímu zpoždění u webových aplikací není možné. Důvod je prostý. Webová aplikace musí být dostupná pro všechny uživatele na celém světě a z toho plyne, že každý uživatel je na jiném geografickém místě a čas potřebný k dostání informace ke koncovým uživatelům není stejný. Tento problém lze částečně vyřešit distribuovaným systémem, kdy se servery přibližují uživatelům, což prakticky dělají například streamovací portály jako je YouTube. Toto řešení má svá omezení a proto druhým způsobem, jak ušetřit čas při komunikaci s koncovým prvkem, je zjednodušit

komunikační protokol, nebo se omezit na co nejméně zbytečné režie a to i za tu cenu, že nedojde ke stoprocentnímu přenosu informace.

2.1 Hardwarové prostředky senzorické sítě

Požadavky na hardwarové prostředky této sítě nejsou v současné chvíli, zadávající firmou této práce, nijak definovány. Je tedy možné síť navrhnout libovolným způsobem. Vzhledem ke komplikovanosti celé problematiky bude v rámci této práce popisována síť jako striktně metalická paketová. Veškeré informace však platí bez významnějších změn i pro bezdrátová připojení. Taková síť se tedy skládá v nejmenší konfiguraci pouze z koncového členu a serveru. S narůstajícím počtem koncových členů je zapotřebí síť patřičně rozšiřovat. Výhodou tohoto systému je fakt, že se daná síť nijak neliší od běžných metalických ethernetových sítí, tzn. že lze využít veškeré dostupné prostředky pro tvorbu této sítě a není zapotřebí vyvíjet zbytečně drahá nová zařízení.

Celá síť se tak skládá z klasického ethernetového vedení a rozbočovačů, přepínačů popř. směrovačů. Zbývá tedy vyřešit server a koncové členy. Zde však záleží na praktické aplikaci. Vezmeme-li však v úvahu nejobyčejnější systém, server pak může být prakticky jakýkoliv počítač, který dokáže zpracovat příchozí požadavky. Tzn. musí být dostatečně výkonný a pro lepší bezpečnost celého systému také redundantní (nebo alespoň některé kritické komponenty v něm). Redundanci komponent však dobře řeší klasické servery, kde jsou redundantní například zdroj, pevné disky, řadiče a dále duální paměti popř. procesory.

Samotné koncové prvky se pak sestávají z nízkoodběrových procesorů, které mají menší, pro danou aplikaci však dostatečný výkon. Zde opět záleží na daném účelu koncového zařízení. Pokud má sloužit jako koncentrátor, tedy zařízení sbírající data ze senzorů, potřebuje větší výkon než například termální čidlo. Obecně však platí, že zařízení musí být dostatečně výkonná, aby bylo možné využívat bezdrátového připojení, nebo Ethernetu. Výkon koncového prvku je tak dán samotným programem, který na tomto prvku poběží a dále potřebnou periferií pro připojení k serveru.

Tato síť je tedy v takovém stavu, kdy je zapojen server (nejlépe na nezávislém napájení) a senzory jsou zapojeny v ethernetové síti pomocí běžných síťových prvků. Důležité je však vyřešit co se stane, když vypadne napájení? V tomto okamžiku síť prakticky přestane fungovat. Toto se nijak neliší od např. běžné zapojení elektroinstalace. Sice by šlo zajistit napájení koncových prvků, protože server může být zapojen na více nezávislých zdrojích elektrické energie, to však nebude např. v rodinném domě běžné. Horší

případ nastane, když vypadne připojení k internetu. Zde by se nejednalo o problém, pokud by se server nacházel v řízeném objektu. Jediný efekt by byl ten, že by nebylo možné server ovládat vzdáleně. Horší situace ovšem nastane v okamžiku, kdy je server umístěn ve vzdálené serverovně. V takovém případě je pro tuto senzorickou síť potřeba vyřešit chování v případě poruchy (tzv. disaster solution). Samotné koncové členy musí vědět jak se chovat bez příchozího signálu. To většinou není problém, protože paradoxně není potřeba řešit jejich chování. To je nutné pouze v případě zabezpečení objektů. Starostí koncových členů totiž není např. vypnout světlo, pokud není systém připojen k internetu. V takovém objektu je však zapotřebí zařadit do sítě zařízení, které bude přijímat od serveru povely a obsluhovat síť. V případě přerušení spojení se serverem převeze toto zařízení kontrolu nad sítí a uvede objekt do dočasného módu, než se problém vyřeší, nebo než přijede servis. Bude tak možné i nadále ovládat alespoň na základní úrovni většinu zařízení.

2.2 Real-time ve webových aplikacích

Ve webových aplikacích žádný real-time jako takový v podstatě neexistuje. Existují však technologie, které umožňují rychlou komunikaci s webovým serverem, resp. rychlou výměnu dat, což vždy nemusí být jedno a to samé. Je totiž rozdíl mezi tím, jestli je nutné při každém požadavku sestavovat nové spojení se serverem, nebo je možné bez další režie rovnou vyměňovat data.

Jedním z typických zástupců je AJAX (popř. AJAJ). Jedná se jednostranný mechanismus, kdy se po periodické akci, nebo například při stisku tlačítka vyvolá javascriptová akce, která uzavře HTTP spojení se serverem a získá data v závislosti na požadavku. Následně překreslí část stránky obsahující nová data. Nedojde tak k obnovení celé stránky, ke kterému by došlo při běžném pohybu návštěvníka na stránce. Výhodou je, že není zapotřebí přenášet celou stránku. Nevýhodou však je možný nárůst HTTP požadavků na server a hlavně nutnost vyjednat se serverem spojení při každém požadavku, což je časově velmi náročné. Pro tuto aplikaci je proto použití AJAXu nevhodné.

Oproti tomu websocket [1] je protokol, který umožňuje otevřít socket mezi serverem a prohlížečem a pomocí rámců posílat obousměrně informace. Vyjednat spojení se serverem tak stačí pouze jednou při otevření webové stránky a následně je možné velmi rychle se stránkou komunikovat. Zároveň se periodicky kontroluje, jestli je stránka stále aktivní (tzv. heartbeat) a pokud ne, server spojení uzavře. Nespornou výhodou je také fakt, že websocket využívá principu event-driven, takže kromě periodické kontroly aktivního spojení je

možné posílat data pouze pokud je to nutné, což hodně ušetří na komunikaci mezi serverem a browserem. Websocket staví nad HTTP, takže mu dnešní prohlížeče rozumí, nicméně pro případ toho, že by webovou stránku otevřel uživatel ve starším prohlížeči, jsou většinou k dispozici doplňková řešení ve formě jiných technologií tak, aby stránka fungovala. V tomto případě se jedná zejména o XHR-polling a JSONP-polling.

2.3 TCP

Protokol TCP je jedním ze dvou transportních protokolů [3], které tento systém využívá. Stejně tak jako UDP je zde tento protokol rozbírán zejména z toho důvodu, že právě na TCP paketech a UDP datagramech je vystavěna komunikace mezi koncentrátory a serverem. Oproti UDP protokolu se jedná o poměrně komplikovanou a tedy i časově náročnou komunikaci. Posloupnost komunikace je následující, přičemž na adrese 192.168.0.20 se nachází server:

```
1 192.168.0.11 -> 192.168.0.20 : SYN
2 192.168.0.11 <- 192.168.0.20 : SYN, ACK
3 192.168.0.11 -> 192.168.0.20 : ACK
```

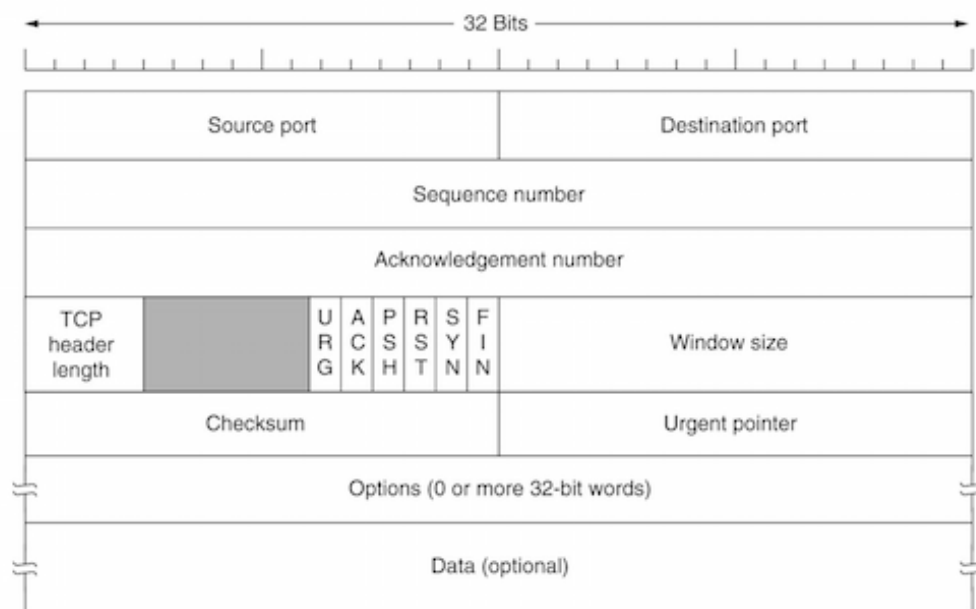
Spojení tedy probíhá zhruba následovně. Koncentrátor (192.168.0.11) otevírá TCP spojení vysláním požadavku na synchronizaci příznakem SYN. Server potvrzuje spojení pomocí příznaku ACK a vysílá také požadavek na synchronizaci (SYN). Koncentrátor toto spojení přijímá pomocí ACK příznaku, čímž je spojení ustanoveno. Tomuto procesu se říká třicestné zahájení spojení (anglicky three-way handshake) [3]. Umístění těchto příznaků v TCP paketu je znázorněno na obrázku 2.1. Samotné poslání jednoho paketu včetně dat a uzavření spojení pak vypadá následovně:

```
1 192.168.0.11 -> 192.168.0.20 : SYN
2 192.168.0.11 <- 192.168.0.20 : SYN, ACK
3 192.168.0.11 -> 192.168.0.20 : FIN, PSH, ACK    # přenos dat
4 192.168.0.11 <- 192.168.0.20 : ACK
5 192.168.0.11 <- 192.168.0.20 : FIN, ACK
6 192.168.0.11 -> 192.168.0.20 : ACK
```

Začátek spojení (třicestné zahájení) zůstává stejné, ale pro úsporu množství přenášených informací se hned při potvrzení spojení pomocí ACK posílají na server data (PSH) a zároveň se posílá požadavek na ukončení spojení (FIN). Následně server potvrzuje přijetí dat (ACK) a ihned také zasílá požadavek na ukončení spojení z jeho strany (FIN, ACK). Nakonec i koncentrátor potvrzuje

uzavření spojení (ACK). Je tedy zřejmé, že i po prvním FIN příznaku dochází k další komunikaci. Nutně tedy tento příznak neznamená úplný konec spojení, ale pouze konec z jedné strany. V tomto případě uzavírá spojení sám koncentrátor, není to však nutné. Spojení může stejným způsobem ukončit i server. V současné chvíli nejsou mezi serverem a koncentrátorem implementovány perzistentní sockety, tedy sockety, které se neuzavírají a přetrvávají do další komunikace (obdoba websocketu).

Nespornou výhodou TCP je fakt, že tento protokol zajišťuje to, že daný paket dorazí na cílovou adresu. To například u UDP neplatí. TCP se proto používá pro přenos kritických informací (například vypnutí/zapnutí světla). Jsou to operace, které se musí bezpodmínečně vykonat a jejich nevykonání by vedlo pro uživatele k velmi zvláštnímu chování sítě.

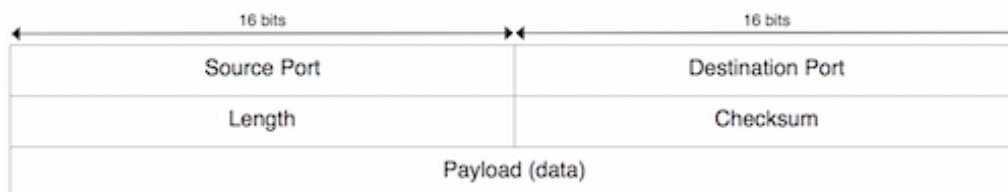


Obrázek 2.1: Uspořádání TCP packetu

2.4 UDP

UDP je oproti TCP protokol typu „fire and forget“, tedy informace se vyšle a v tu chvíli se zdrojové zařízení přestává o tuto informaci starat. Zdrojové zařízení pak neví, jestli informace dorazila na místo určení, nebo nikoliv. To má za následek určitou nespolehlivost přenosu informace, ale o mnohem

méně režie potřebné pro přenos. V porovnání s TCP přenáší UDP datagram mnohem méně informace v záhlaví:



Obrázek 2.2: Uspořádání UDP datagramu

Pro poslání informace potom stačí vyslat jeden tento datagram s daty a to je vše. Proto skutečnost, že neznáme výsledek přenosu vede k tomu, že musíme být smířeni s faktem, že se některé datagramy jednoduše ztratí např. vlivem kolize s jiným datagramem. Tento problém nastane až u větších sítí, ale při praktickém testování tohoto projektu se ukázalo, že může dojít ke ztrátě datagramů na levnějších komponentách sítě, v tomto případě mohl za ztráty switch. Tento nežádoucí stav může nastat buď vlivem malé paměti daného zařízení, nebo vysokou rychlostí posílání datagramů, což je hlavní příčina. Na levnějších zařízeních pak dochází k přenosu pouze nejrychlejšího náhodného datagramu. Celá síť se pak chová tak, že se datagramy posílají na náhodné prvky za tímto switchem, ale nikdy ne na více než jedno zařízení. Tento efekt byl pozorován na zařízeních ZyXEL ES-105A i TP-LINK TL-WR743ND. U switchu D-Link DFE-916DX k tomuto efektu nedošlo.

Tento přenos (vzhledem k charakteru UDP) je tedy vhodný pro přenos velkého množství informací s tím, že nám případné ztráty nevadí. Typickým zástupcem toho typu přenosu jsou například kontinuální čidla, která neustále snímají (například teplotu) a v krátkých časových intervalech posílají informace na server.

3

Volba vhodné technologie

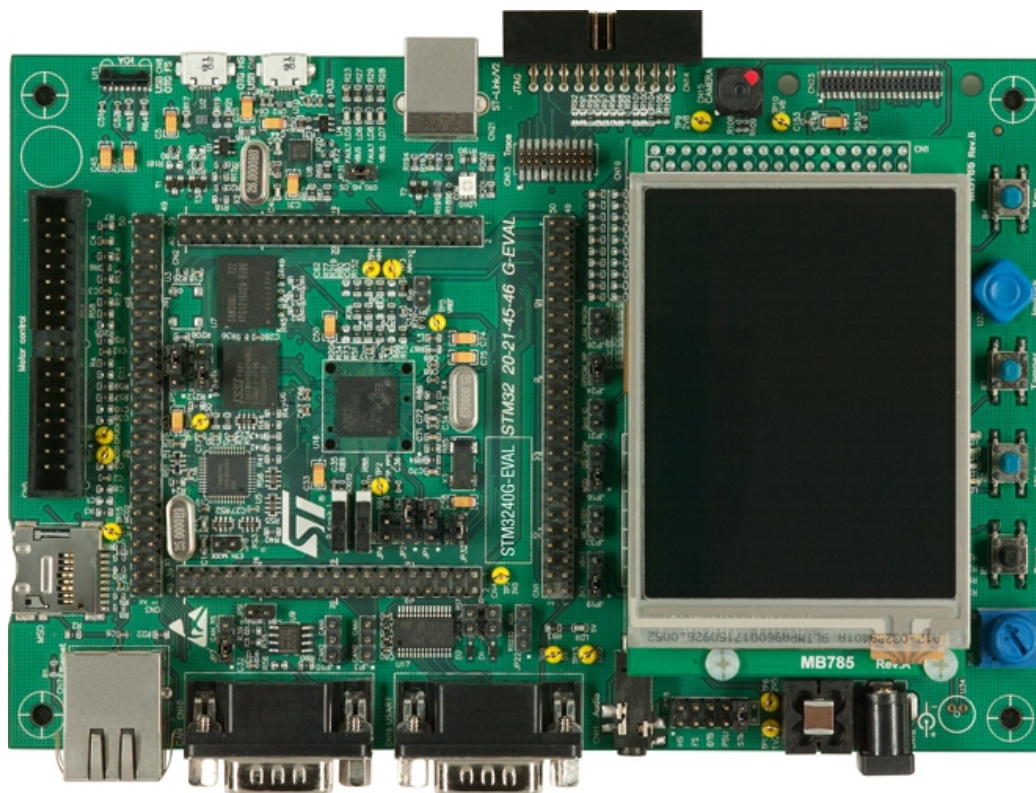
Pro tuto síť nejsou v tuto chvíli stanoveny zadávající firmou žádné konkrétní požadavky na hardware. Proto je možné vybrat z hlediska softwarového řešení jakoukoliv platformu. Z hardwarového hlediska je doporučeno používat evaluační desky od STMicroelectronics. V následující části budu popisovat jednotlivé použité technologie a důvod jejich volby.

3.1 Prvky senzorické sítě

Prvky senzorické sítě jsou testovány na vývojových deskách s mikrokontroléry STM32F207IGH6 a STM32F457IGH6 s využitím oficiálních Cube knihoven [4]. Jedná se o 32-bit mikrokontroléry pro obecné použití. Pro oba mikrokontroléry dále platí, že mají 176 pinů s velikostí flash paměti 1024 KB v provedení pouzdra UFBGA pro běžné rozsahy teplot od -40 do 85 °C.

3.1.1 Procesor STM32F207IGH6

- Jádru ARM 32-bit Cortex™-M3 CPU (120 MHz max)
- 128 KB SRAM
- LCD interface
- 12×16 -bit timer, 2×32 -bit timer - až 120 MHz
- 15 komunikačních rozhraní
- $2 \times$ USB, 10/100 Ethernet
- 8 až 14-bit interface pro kameru
- CRC jednotka



Obrázek 3.1: Použitá vývojová deska

3.1.2 Procesor STM32F457IGH6

- Jádru ARM 32-bit Cortex™-M4 CPU (168 MHz max)
- 192 KB SRAM
- LCD interface
- 12×16 -bit timer, 2×32 -bit timer - až 168 MHz
- 15 komunikačních rozhraní
- $2 \times$ USB, 10/100 Ethernet
- 8 až 14-bit interface pro kameru
- CRC jednotka

Veškeré vývojové desky s mikrokontroléry jsou připojeny pomocí klasických síťových prvků a UTP kabelů do serveru.

3.2 Real-time server

Jako real-time server, který obsluhuje celou síť i webovou aplikaci je zvolen Node.js [5]. Jedná se o platformu postavenou nad V8 JavaScript Engine od společnosti Google. V8 je engine napsaný v C++, který využívá například prohlížeč Google Chrome jako jádro pro velmi rychlé zpracování javascriptu. Díky tomu je možné využívat téměř všech vlastností javascriptu, zejména pak single-thread asynchronní chování (non-blocking I/O model) a EDA architektury. Jedná se o velmi podobný engine jako je v prohlížeči Google Chrome s tím rozdílem, že Node.js neobsahuje možnost práce s oknem programu, nebo s dokumentem jako takovým, protože zde žádný není. Oproti tomu umožňuje přistupovat k process objektu, který zase není dostupný v prohlížečích. Následující ukázka ukazuje jednoduchý webový server napsaný právě s pomocí Node.js:

```
1  var http = require('http');
2  var PORT = 8000;
3
4  var server = http.createServer(function(request, response) {
5      response.writeHead(200, {'content-type': 'text/html'});
6      response.write("<h1>hello</h1>\n");
7      setTimeout(function() {
8          response.end("<p>world</p>\n");
9      }, 2000);
10 });
11
12 server.listen(PORT, function() {
13     console.log('Server is listening on port ' + PORT);
14 });
```

Tento server je zároveň vysoce škálovatelný a to hlavně do šíře. Je tak možné vytvořit velký počet vzájemně komunikujících uzlů (node), které spolu komunikují. Tyto uzly jsou však striktně odděleny (i na úrovni paměti) a nemohou se tak přímo ovlivňovat. Tento model je vhodný pro velmi vytížené aplikace, protože je možné potřebný výkon rozložit na velké množství méně výkonných strojů.

3.3 Databázový server

Na pozici databázového serveru byl zvolen Redis [6]. Redis je key-value databáze. Od nejrozšířenějších relačních databází se liší například tím, že je

násobně výkonnější a neobsahuje relace. Významným prvkem této databáze je právě vztah klíče a hodnoty, kdy hodnotu je možné ukládat do sedmi datových struktur (string, hash, list, set, sorted set, bitmap, hyperloglog). Velkou rychlost Redisu zajišťuje zejména to, že pracuje s RAM pamětí serveru. Přijaté hodnoty si nejdříve ukládá právě do paměti a následně je podle konfigurace ukládá na disk. Příklad výchozí konfigurace:

```
# save <seconds> <changes>
save 900 1
save 300 10
save 60 10000
```

Vždy musí být splněna časová podmínka i množství změn za tento čas. Takové nastavení pak tedy udává, že se po 900 vteřinách (15 minut) uloží změny na disk, pokud byla provedena změna alespoň jednoho klíče, nebo po 300 vteřinách při změně alespoň deseti klíčů, resp. po minutě, došlo-li ke změně alespoň 10 000 klíčů. Již z této konfigurace je zřejmé, že se u Redisu očekává velké vytížení a tato databáze je na to připravena.

3.3.1 Redis klíče

Redis klíče mohou být velké až 512 MB a jsou binary safe, tzn. že platný je jak běžný text, tak prázdný text, ale také binární data, nebo obsahy souborů (do maximální velikosti klíče). Samotným klíčům lze pak také nastavovat životnost (pomocí příkazu `EXPIRE`). Klíče potom vyprší po nastaveném čase.

3.3.2 Datová struktura string

Datová struktura string je nejzákladnější způsob jak je možné uložit data do databáze. Princip je velmi jednoduchý. Každému klíči se přiřadí textová hodnota. V této práci je datová struktura string používána k ukládání a inkrementování celkového počtu přijatých nebo odeslaných zpráv. Ukázka použití počítadla:

```
> SET counter 1
OK
> INCR counter
(integer) 2
> INCRBY counter 50
(integer) 102
> INCRBYFLOAT counter 3.0e3
"3102"
```

Časová náročnost těchto operací je $O(1)$ ¹.

3.3.3 Datová struktura hash

Hash je velmi podobný stringu s tím rozdílem, že je možné ukládat k jednomu klíči více hodnot. Časová složitost je pak $O(1)$ pro jeden prvek resp. $O(N)$ kde N je počet ukládaných nebo vybíraných prvků. V této práci je datová struktura hash použita právě pro ukládání informací o koncovém zařízení. Konkrétně se o koncových zařízeních uchovává IP adresa, porty TCP a UDP komunikace, čas posledního ohlášení, status aktivity a počet přenesených zpráv.

3.3.4 Datová struktura list

List je v Redisu implementovaný jako spojový seznam. Tato implementace umožňuje vkládat nová data na začátek, nebo na konec spojového seznamu v konstantním čase nezávisle na počtu prvků v seznamu. Časová složitost je tedy opět $O(1)$. U operací kdy se vkládá prvek dovnitř seznamu je složitost $O(N)$, kdy N je počet prvků, přes které je nutné iterovat, než se dostaneme k požadovanému umístění. V nejlepším případě může být tedy i zde časová složitost $O(1)$. List je v tomto projektu použitý pro ukládání historie příchozích dat z koncentrátorů následovně:

```
> LPUSH device_uid:data <data>
> LTRIM device_uid:data 0 999
```

Výhodné na tomto přístupu je to, že je složitost obou příkazů $O(1)$. Je to dáno tím, že LPUSH umísťuje data do seznamu zleva což není nijak časově náročné a dále složitost LTRIM funkce je dána počtem prvků, které se touto funkcí odstraní, což je jeden starý. S minimální režii je tak uchováváno posledních 1000 hodnot.

3.3.5 Datová struktura set a sorted set

Sety jsou neseřazené kolekce unikátních stringů. Zde je nutné zdůraznit, že hodnoty zde skutečně nejsou seřazené a vracený výsledek tak může měnit pořadí. Výhodné je, že je možné do této množiny ukládat data se složitostí

¹Označení $O(f(x))$ značí asymptotickou složitost algoritmu. Složitosti algoritmů rozdělujeme do různých tříd ($1 < \log(n) < n < n \cdot \log(n) < n^k < k^n < k! < n^n$), které určují jak je daný algoritmus rychlý. Zápisy je pak možné číst tak, že algoritmus je stejně rychlý, nebo rychlejší, než $f(x)$.

$O(N)$, kde N je počet prvků. To samé platí i pro čtení. Tato struktura se hodí pro ukládání relací čímž je možné simulovat relační vztahy mezi objekty. V tomto projektu je proto set používán pro ukládání všech známých zařízení k síti a dále pro ukládání vazeb mezi jednotlivými koncentrátory.

Sorted set je obdoba setu s tím rozdílem, že prvky jsou v množině seřazeny podle zvoleného skóre. Tato struktura není v projektu nikde použita a je zde uvedena pouze pro úplnost.

3.3.6 Datová struktura bitmap

Bitmapy umožňují ukládat binární data do databáze. Tento způsob práce s daty je pouze obdobou práce se stringy. Vzhledem k tomu, že se jedná o práci s nejmenší jednotkou informace, je tato struktura velmi úsporná co se týče velikosti a velmi se hodí pro ukládání velkého množství pravdivých resp. nepravdivých informací. Bitmapy jsou limitovány na velikost 512 MB stejně jako klíče. To jinými slovy znamená, že je v jednom klíči možné uchovat informace až o 2^{32} stavech ($2^{32} = 4\,294\,967\,296\,b = 536\,870\,912\,B = 524\,288\,kB = 512\,MB$).

Tato struktura není v projektu nikde použita a je zde uvedena pouze pro úplnost.

3.3.7 Datová struktura hyperloglog

Posledním a relativně novým datovým typem je hyperloglog. Jedná se o statistickou datovou strukturu, která se používá zejména pro rychlé určení kvantity unikátních dat s chybou méně než 1%. Tato struktura předchází paměťové náročnosti při počítání množství unikátních dat. V běžném případě je totiž nutné pamatovat si tyto data, aby bylo možné při dalším vstupu unikátní hodnotu započítat, nebo ji ignorovat, protože je již započítána. Redis při své implementaci používá konstantní množství paměti, konkrétně 12 kB v nejhorším případě.

Tato struktura není v projektu nikde použita a je zde uvedena pouze pro úplnost.

3.3.8 Výkon Redisu

Redis díky svému přístupu k paměti a omezenému počtu zapisování na disk je velmi rychlá databáze. Dále je připravena na škálování do šíře, takže je možné připojit další servery jako databázové uzly [7]. Níže je uvedený reálný výsledek benchmarku [8] na Linuxovém stroji Debian s $2 \times$ CPU po 2 GHz, 2 GB RAM. Test je proveden pro různé datové struktury a jejich příkazy

vždy pro 50 souběžných připojení a 100 000 požadavků s délkou SET/GET hodnoty 256 B. V tomto prvním testu jsou vždy příkazy posílány postupně a postupně také vybavovány.

```
1 $ redis-benchmark -q -n 100000 -d 256
2 PING_INLINE: 212314.23 requests per second
3 PING_BULK: 211416.50 requests per second
4 SET: 131752.31 requests per second
5 GET: 199600.80 requests per second
6 INCR: 213219.61 requests per second
7 LPUSH: 213219.61 requests per second
8 LPOP: 204918.03 requests per second
9 SADD: 214592.28 requests per second
10 SPOP: 212765.95 requests per second
11 LPUSH (needed to benchmark LRANGE): 213675.22 requests per
   ↪ second
12 LRANGE_100 (first 100 elements): 45269.35 requests per second
13 LRANGE_300 (first 300 elements): 15586.04 requests per second
14 LRANGE_500 (first 450 elements): 9325.75 requests per second
15 LRANGE_600 (first 600 elements): 6472.49 requests per second
16 MSET (10 keys): 131578.95 requests per second
```

Je zřejmé, že již při základní konfiguraci dosahuje Redis vysokých výkonů. Nevýhodou této konfigurace, resp. přístupu k práci s Redisem, je skutečnost, že nový požadavek je vždy poslán až po zpracování databází a vrácení odpovědi. Redis totiž funguje pomocí TCP, takže klient odesílá požadavek a přijímá od serveru odpověď. Tato smyčka může být velmi krátká, zejména pak pokud je redis umístěn na stejném serveru jako klient. V každém případě však vzniká časová prodleva mezi tím, kdy putují pakety od klienta k serveru a zpět. Tento čas se nazývá RTT a i čas potřebný pro lokální smyčku na serveru může být v součtu velký při velkém počtu požadavků. Tento problém se dá částečně vyřešit tzv. pipeliningem. Pak je možné posílat více zřetězených požadavků v jednom dotazu. Následující příklad ukazuje stejný benchmark jako dříve, ale se zapnutým pipeliningem. Vždy se zřetězí 16 příkazů do jednoho požadavku:

```
1 $ redis-benchmark -q -n 100000 -d 256 -P 16
2 PING_INLINE: 1612903.25 requests per second
3 PING_BULK: 2127659.75 requests per second
4 SET: 1086956.50 requests per second
5 GET: 1351351.38 requests per second
```



```

6 INCR: 1219512.12 requests per second
7 LPUSH: 934579.44 requests per second
8 LPOP: 1030927.81 requests per second
9 SADD: 1265822.75 requests per second
10 SPOP: 1562499.88 requests per second
11 LPUSH (needed to benchmark LRANGE): 990099.00 requests per
   ↪ second
12 LRANGE_100 (first 100 elements): 35186.49 requests per second
13 LRANGE_300 (first 300 elements): 8521.52 requests per second
14 LRANGE_500 (first 450 elements): 5236.70 requests per second
15 LRANGE_600 (first 600 elements): 3888.48 requests per second
16 MSET (10 keys): 207468.88 requests per second

```

3.3.9 RESP protokol

Redis databáze komunikuje interně přes TCP v RESP (Redis Serialization Protocol) formátu. RESP používá celkem 5 typů dat. Vždy platí, že první byte je byte určující o jaký formát se jedná:

- + simple string (jednoduchý řetězec)
- - error (chybový stav)
- : integer (celé číslo)
- \$ bulk string (binary safe řetězec)
- * array (pole)

Následuje samotný obsah, nebo dodatečné informace, například o délce a vše je ukončeno pomocí CRLF (`\r\n`). Postupně tedy přenášené informace mohou vypadat například takto:

- +PONG\r\n
- -Error 123\r\n
- :54986\r\n
- \$4\r\nPING\r\n (první část určuje délku bulk stringu, NULL je pak \$-1\r\n)
- *2\r\n\$3\r\nGET\r\n\$3\r\nkey\r\n (první je délka pole, následuje kombinace předchozích)

Redis server potom přijímá podle řetězců obsahující jednotlivé instrukce. Tento protokol je velmi důležitý, protože i koncentrátory posílají data (přes TCP i UDP) v RESP formátu, je tak možné data posílat přímo do databáze. Tato vlastnost však není využívána, protože je vhodné, aby byl jako prostředník server a například zjišťoval aktivitu koncentrátorů. Každopádně tato možnost zde je a pokud by bylo zapotřebí ukládat data tou nejrychlejší cestou, přímý přístup do databáze je tímto možný a funkční.

3.4 Webová aplikace

Webový server je možné spustit na již běžícím Node.js serveru. Pro webovou aplikaci byl zvolen framework Sails.js [9]. Sails je MVC webový framework, který staví právě nad Node.js, ale ulehčuje práci při stavbě webových aplikací. Výhodou tohoto přístupu je to, že je možné na jednom serveru zapnout jak server zpracující požadavky z koncentrátorů, tak server obsluhující požadavky klientů z webového prohlížeče. Sails má navíc vestavěnou podporu pro protokol websocket, který je potřebný pro rychlou komunikaci serveru právě s prohlížečem.

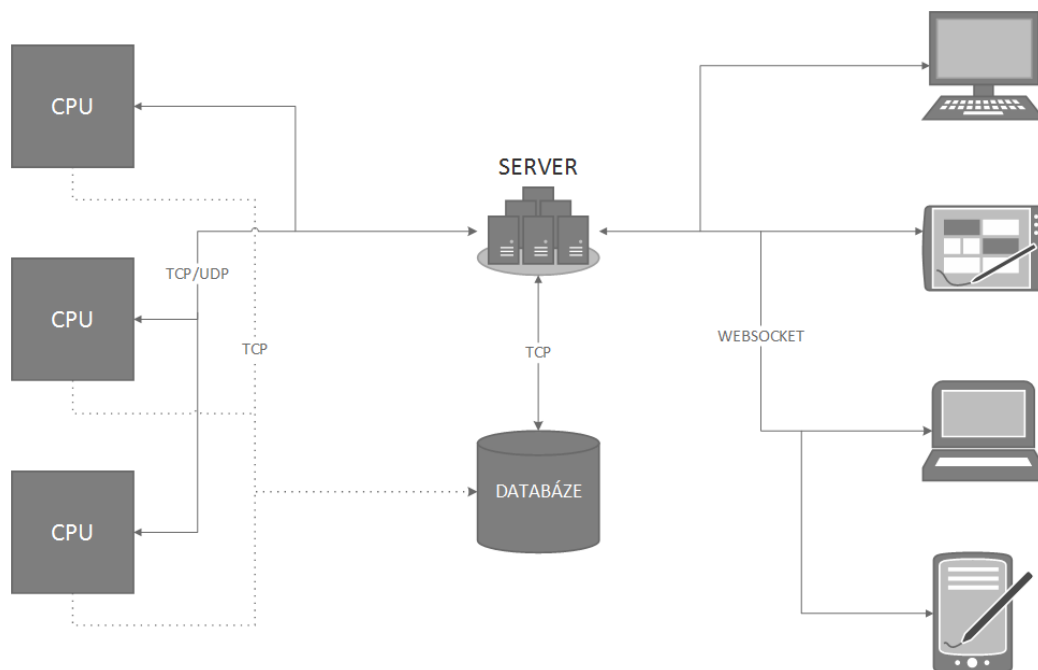
Volba tohoto frameworku je pouze na osobních preferencích. Žádný z existujících frameworků neobsahuje další výhody, které by jej stavěly do jednoznačné výhody. Navíc z hlediska sítě je potřebný hlavně Node.js a webová aplikace je možná postavit také pouze na Node.js. Ačkoliv tedy tato aplikace tvoří velkou část kódů, není pro samotné fungování projektu klíčová.

4

Struktura programového řešení

Struktura celého programového řešení je znázorněna na obrázku 4.1. Celý projekt funguje následovně. Jednotlivé mikrokontroléry, resp. koncentrátoři snímají potřebné veličiny, nebo čekají na impuls od uživatele sítě popř. serveru. Mohou tedy aktivně odesílat snímané informace, nebo reagovat na přijatý signál ze serveru. Tyto koncentrátoři komunikují s real-time serverem pomocí protokolů TCP nebo UDP podle toho, jaký druh komunikace je pro daný účel potřeba. Server veškeré přijaté hodnoty ukládá do databáze a zároveň při každé příchozí akci prohlásí zařízení za aktivní. Udrží tak neustále jeho status. Kromě toho, že server do databáze hodnoty ukládá, tak si také drží jednotlivé relace mezi koncentrátoři resp. koncovými členy a odesílá data zpět. Tvoří tak jednotlivá propojení koncentrátorů, která je možné dynamicky měnit. Toto je asi největší výhoda tohoto řešení. Zároveň mají koncentrátoři možnost zapisovat do databáze přímo. Je to dáno tím, že i se serverem komunikují v RESP formátu. Tato funkce není využívána, protože by bylo zapotřebí zapsat tvar databáze do každého koncentrátoru, což by bylo velmi omezující pro další rozšiřitelnost projektu. Nicméně tato možnost zde je a je možné ji využít pro rychlejší ukládání do databáze.

Na serveru dále běží webový server, který poskytuje webovou stránku, kde je možné celou síť ovládat. Každý uživatel sítě se pak může připojit pomocí svého zařízení (mobilní telefon, tablet, notebook, počítač, atd.) a síť ovládat. Je zřejmé, že je nutné umožnit pohodlné ovládání sítě, zároveň však musí být zamezena možnost změny konfigurace neautorizované osobě. Toto omezení je možné udělat na straně webové aplikace pomocí řízení uživatelských práv. Fakticky se jedná o změny relací v síti a o změnu parametrů jednotlivých koncových členů. Server se pak postará o distribuci dat v síti podle zvolené konfigurace.



Obrázek 4.1: Struktura programového řešení

4.1 Komunikace koncentrátor - server

Systémový firmware pro koncentrátory jsou napsány v programovacím jazyce C s využitím oficiálních Cube knihoven od STMicroelectronics. Jsou tady napsány nízkoúrovňově, ale se zachováním přijatelného programového prostředí. Koncentrátor má několik základních funkcí. Předně je jeho úkolem připojit se na pevně stanovenou IP adresu v síti. Ta je momentálně stanovena na 192.168.0.20:50000. Koncentrátor se pak periodicky s frekvencí 1 Hz ohlašuje přes TCP serveru. Tato frekvence je zvolena libovolně s ohledem na rozumné vytížení sítě těmito jinak zbytečnými informačními pakety. Síť se tak zbytečně nevytěžuje a zároveň dochází k rychlému zaregistrování výpadku koncentrátoru. 1 Hz je navíc krajní případ, protože jakákoliv příchozí informace se zároveň považuje za ohlášení. Data jsou v RESP formátu:

```
*2\r\n$4\r\nPING\r\n$11\r\nTEMP_000001\r\n
```

První část zprávy je samotný příkaz (PING) následovaný unikátním identifikátorem zařízení. Následuje krátká vzorová ukázka funkčního kódu pro odesílání notifikací o aktivitě.

```

1  struct tcp_pcb *client_pcb;
2  struct ip_addr IPAddr;
3
4  client_pcb = tcp_new();
5  if (client_pcb != NULL) {
6      IP4_ADDR( &IPAddr, IP_ADDR0, IP_ADDR1, IP_ADDR2, IP_ADDR3 );
7      tcp_bind(client_pcb, &IPAddr, DEST_PORT);
8      IP4_ADDR( &DestIPAddr, DEST_IP_ADDR0, DEST_IP_ADDR1,
9               ↪ DEST_IP_ADDR2, DEST_IP_ADDR3 );
10     tcp_connect(client_pcb, &DestIPAddr, DEST_PORT,
11                ↪ tcp_ping_callback);
12 } else { //can not create tcp pcb
13     memp_free(MEMP_TCP_PCB, echoclient_pcb);
14 }

```

Po připojení se zavolá funkce `tcp_ping_callback`, která již může odeslat data v požadovaném formátu.

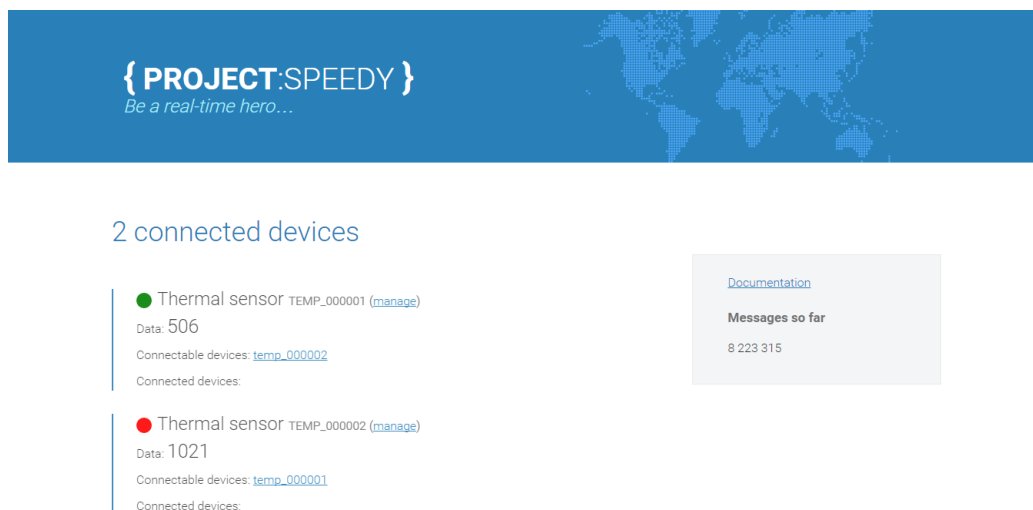
4.2 Komunikace server - koncentrátor

4.3 Komunikace server - webová aplikace

5

Praktická aplikace

Vzhled a ovládání celé aplikace je velmi jednoduché a intuitivní. Na úvodní stránce je přehled všech zařízení zapojených do sítě včetně jejich stavu. Vedle názvu zařízení je vidět, jestli je online, či nikoliv. Pod názvem je vidět aktuální přijatá informace v číselné podobě. Následuje seznam připojených a připojitelných zařízení. Jedním kliknutím je možné propojit jakékoliv koncentrátory. V tu chvíli začne server přeposílat příchozí data na všechna připojená zařízení. Počet připojitelných zařízení není nijak omezen. Toto je velká výhoda celého projektu. Není totiž vázán na fyzická spojení a příchozí data je tak možné poslat všem v síti bez dalších technických komplikací.



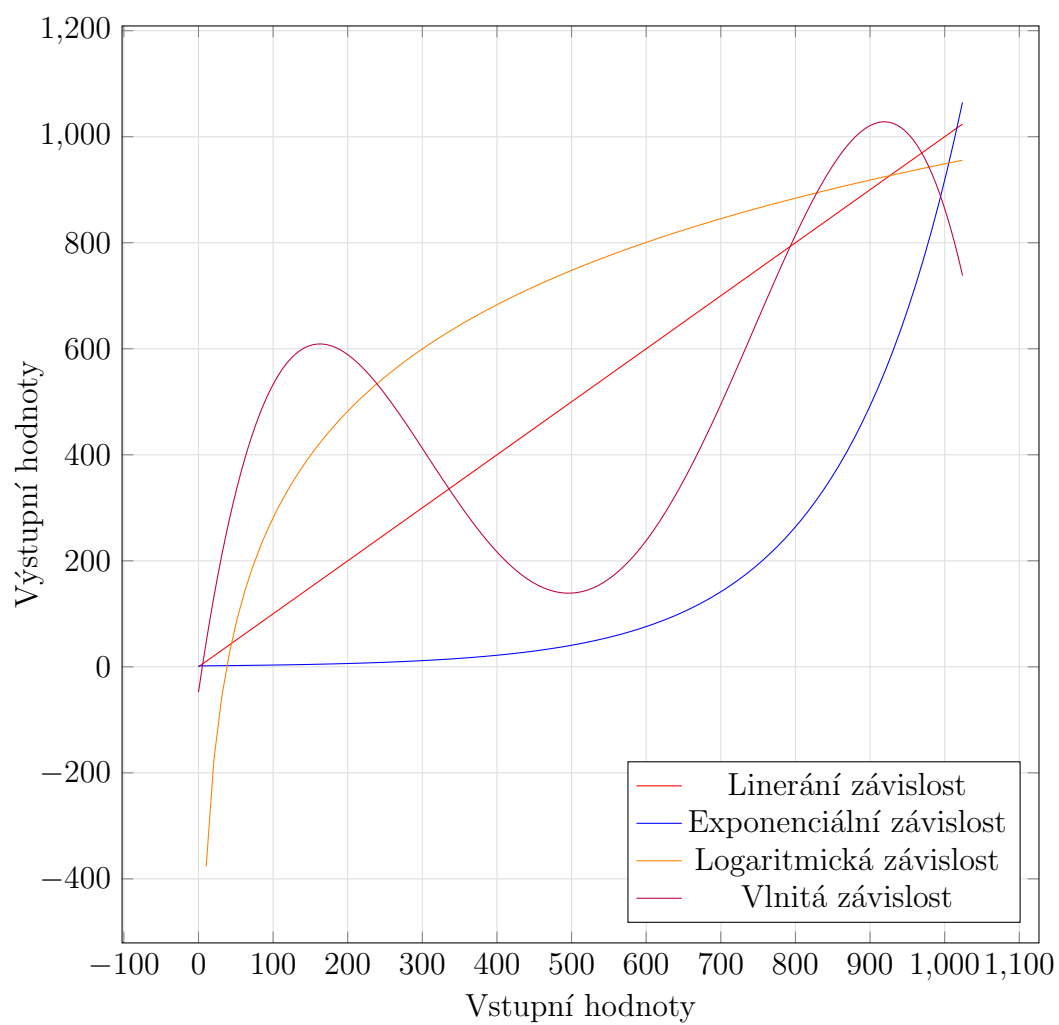
Obrázek 5.1: Úvodní stránka aplikace - přehled připojených zařízení

Detail konkrétního zařízení poskytuje podobný pohled, navíc však ukazuje dodatečné informace jako jsou například IP adresy, nebo čas posledního ohlášení. Kromě samotné vizualizace historie příchozích dat je možné nastavit charakter dat odchozích. To znamená, že když bude připojeno další zařízení, nebudou se data rovnou přeposílat, ale najde se příslušná hodnota podle zvolené funkce a tato hodnota se pošle. Ve výchozím stavu se vše chová lineárně, tzn. jaká informace přijde, taková se přeposílá. Je však možné zvolit exponenciální viz rovnice 5.1, logaritmický 5.2, nebo vlnitý charakter 5.3. Poslední variantou je boolean závislost, kdy do hodnoty 512 včetně je výstupem 0, jinak maximální hodnota.

$$y_{exp} = 1.80753 \cdot 1.00625^x \quad (5.1)$$

$$y_{log} = -1053.96 + 289.931 \cdot \ln(x) \quad (5.2)$$

$$y_{vlna} = -3.23206 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 + 0.000068 \cdot x^3 - 0.044362 \cdot x^2 + \\ + 9.59513 \cdot x - 47.9076 \quad (5.3)$$



Obrázek 5.2: Převodní funkce vstupních hodnot

{ PROJECT: SPEEDY }

Be a real-time hero...

● TEMP_000001 Thermal sensor

Data: 531

TCP IP: 192.168.0.11:50000

UDP IP: 192.168.0.11:49153

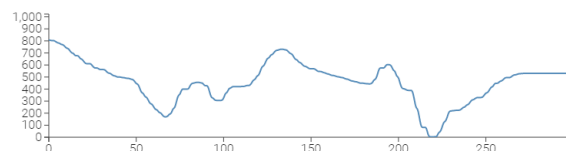
Message count: 4 758 725

Last ping: Tue Apr 28 2015 15:59:19 GMT+0200 (Střední Evropa (letní čas))

Connectable devices: [temp_000002](#)

Connected devices:

Function:



What would you like to do?

- [Release from connections](#)
Nobody will be able to send data to this device.
- [Drop all connections](#)
This device will not be able to send data to another devices.

Obrázek 5.3: Detailní pohled na připojené zařízení

6

Rozšíření stávajícího řešení

Stávající řešení je plně funkční a splňuje veškeré požadavky v zadání. Jedná se však pouze o základ na kterém lze stavět systém, který by bylo možné použít v reálných budovách. Prvně je totiž zapotřebí tuto síť zabezpečit. To se týká zejména okamžiku, kdy by síť začala komunikovat přes WiFi (nebo jinou bezdrátovou technologii), ale platí to stejně i pro metalické vedení. Nesmí být možné, aby mohl kdokoli ovlivňovat chování sítě, pokud k tomu není oprávněn.

Dalším důležitým prvkem je implementace IPv6. V současné chvíli je totiž nepsaným předpokladem, že budou koncentrátoři připojeni v privátní síti a využívají IPv4. Pokud by však měla síť fungovat i na veřejné síti, vzroste počet potřebných IP adres a již v tuto chvíli je jich nedostatek. Oproti tomu je IPv6 adres je 2^{128} [10], což je více než dostatek. V tomto projektu je použit LwIP stack, který IPv6 podporuje. Tato vlastnost není implementována, protože není potřeba. Pokud by se však projekt rozrostl do větších rozměrů, bylo by jej vhodné směřovat do stavu tzv. „fog computing“. To znamená, že se z původně převážně centralizovaného systému začne stávat silně distribuovaný a původně centralizovaná část sítě bude sloužit pouze pro analýzy a statistiky. Veškeré zpracování dat se bude odehrávat na krajích sítě. Tím se vyřeší například problém s latencí. Zde by již bylo krátkozraké uvažovat překlad IP adres v rámci intranetové sítě, protože jednotlivými koncovými členy sítě mohou být jakákoliv připojitelná zařízení, tedy například automobily, mobilní senzory atd. Překlad IP adres je tedy jednou z možností, ale otázku je, jestli to při tak velkém počtu adres má smysl.

Vzhledem k tomu, že je v současné chvíli celá síť závislá na centrálním serveru, nelze následující požadavek jednoduše implementovat. Bylo by však vhodné, aby se server začal postupně přesouvat na samotné koncentrátoře, až by jej vůbec nebylo potřeba. To by znamenalo server úplně horizontálně rozškálovat, což v současnou chvíli není možné. Jednak proto, že by se to

z hlediska Node.js nedělalo dobře, jednak také proto, že koncentrátoři mají poměrně malý výkon. Malý výkon v tom smyslu, že pro rozumné spuštění Node.js, nebo konkurenčního io.js je nutné Linuxové prostředí. Nicméně reálně fungující projekt využívající OpenWrt Linux [11] s io.js je například Tessel 2 (CortexTM-M3 CPU - 180 MHz) [12]. Tento krok by přiblížil celý projekt k naprosto autonomní síti, kde by se velmi jednoduše řešil například výpadek jednoho z koncentrátorů. Přestala by totiž fungovat pouze malá část sítě. Navíc by bylo možné částečně se zbavit metalických vodičů a vytvářet tzv. mesh síť, což by ostatně bylo žádoucí. Každý koncentrátor by se mohl bez větší námahy připojit na všechny koncentrátoři, které jsou poblíž.

Dále je zajímavou myšlenkou implementovat real-time přenos i na komunikaci mezi koncentrátoři a serverem např. Ethernet Powerlink. Zde je však otázka, jestli je tato implementace žádoucí, protože real-time přenos v tomto slova smyslu je právě časově vázaný a svým charakterem tak zpomaluje (i když zpřesňuje) přenos dat. V současné chvíli také není implementováno přijímání adres z DHCP serveru, kvůli jednoduchosti. Na funkcionalitě se nic nemění, je však možné pohodlně vyvíjet, bez nutnosti dalšího prvku v síti.

V neposlední řadě bude také nutné vybavit síť velkým počtem různorodých prvků jako jsou různé vypínače, snímače a akční členy, protože dobrou síť dělá mimo jiného také počet možností, které lze se sítí dělat.

7

Závěr

Literatura

- [1] *I. Fette, Google Inc., A. Melnikov, Isode Ltd.: The WebSocket Protocol* <https://tools.ietf.org/html/rfc6455>
- [2] *University of Telecommunications, Leipzig, Sebastian Lammermann: Ethernet as a Real-Time Technology* http://www.lammermann.eu/wb/media/documents/real-time_ethernet.pdf
- [3] *Barrie Sosinsky: Mistrovství – počítačové sítě*
- [4] *STMicroelectronics: Getting started with STM32CubeF2 firmware package for STM32F2xx series* http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00111485.pdf
- [5] **Node.js:** <http://nodejs.org/>
- [6] **Redis.io:** <http://redis.io/>
- [7] *Redis.io: Redis cluster tutorial:* <http://redis.io/topics/cluster-tutorial>
- [8] *Redis.io: How fast is Redis* <http://redis.io/topics/benchmarks>
- [9] **Sails.js:** <http://sailsjs.org/>
- [10] *RIPE NCC Understanding IP Addressing* <https://www.ripe.net/internet-coordination/press-centre/understanding-ip-addressing>
- [11] *OpenWrt Linux distribution for embedded devices* <https://openwrt.org/>
- [12] **Tessel 2:** <https://tessel.io/>

- [13] *STMicroelectronics: Description of STM32F4xx HAL drivers* http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00105879.pdf
- [14] *STMicroelectronics: Reference manual - STM32F405xx/07xx, STM32F415xx/17xx, STM32F42xxx and STM32F43xxx advanced ARM®-based 32-bit MCUs* http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf