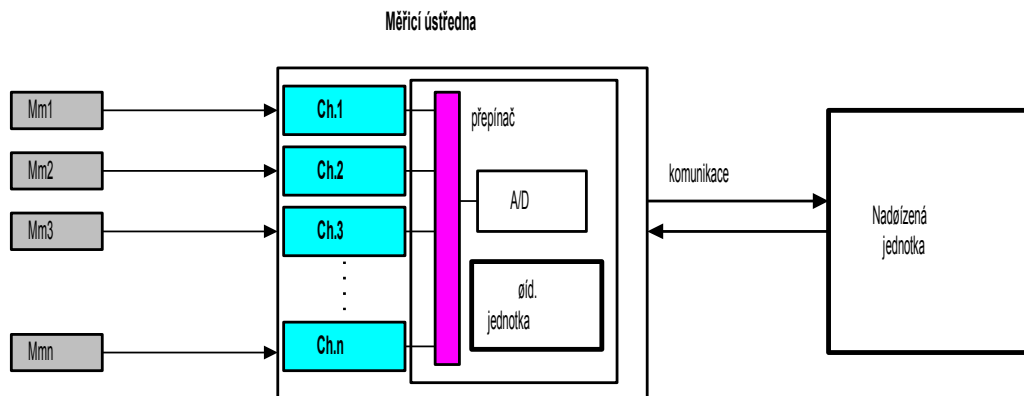


# Měřicí ústředna

Pro sběr dat ze snímačů se používají systémy sběru dat, které se někdy také označují jako *měřicí ústředny*. Jádrem měřicí je řídicí jednotka s procesorovou, který čte data z jednotlivých vstupních kanálů. Pojmem vstupní kanál je zde míněno připojení vstupního elektrického analogového signálu - např. ze senzoru, který se po příslušné úpravě úrovně digitalizuje. Měřicí ústředna může mít lokální zpracování výsledků měření z jednotlivých kanálů i zobrazení na zabudované zobrazovací jednotce, případně též záznam dat na zabudované paměťové medium.



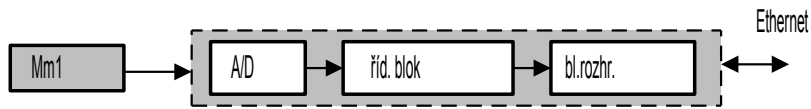
Obrázek 1. Blokové schéma měřicí ústředny

Blokové schéma měřicí ústředny je zachyceno na obr. Obrázek 1. Měřené analogové signály jsou přiváděny z měřicích míst **Mm1** až **Mmn** na vstupy jednotlivých kanálů **Ch1** až **Chn** měřicí ústředny. Připojení jednotlivých kanálů na vstup analogově/ číslicového převodníku A/D je prostřednictvím analogového přepínače. V ústředně může být jeden, případně i více převodníků A/D, avšak počet převodníků je podstatně nižší, než počet vstupních kanálů. Výhodou centralizované měřicí ústředny je, že se jednoduše zajistí synchronizace současného odběru vzorků ve vybraných kanálech s využitím převodníku A/D. Počet těchto kanálů je však omezen. Měřicí ústředna může být připojena k nadřazené jednotce prostřednictvím některého rozhraní, např. Ethernet, USB, RS-485, atd.

Uspořádání dle obr. xxx1 odpovídá centralizovanému měření, kdy se měřené signály v analogové formě musejí přivést až na vstupy jednotlivých kanálů měřicí ústředny. V případě rozlehlého objektu, na němž by se měření provádělo, by to představovalo vedení signálů dlouhými vodiči, což může být problém z hlediska rušení.

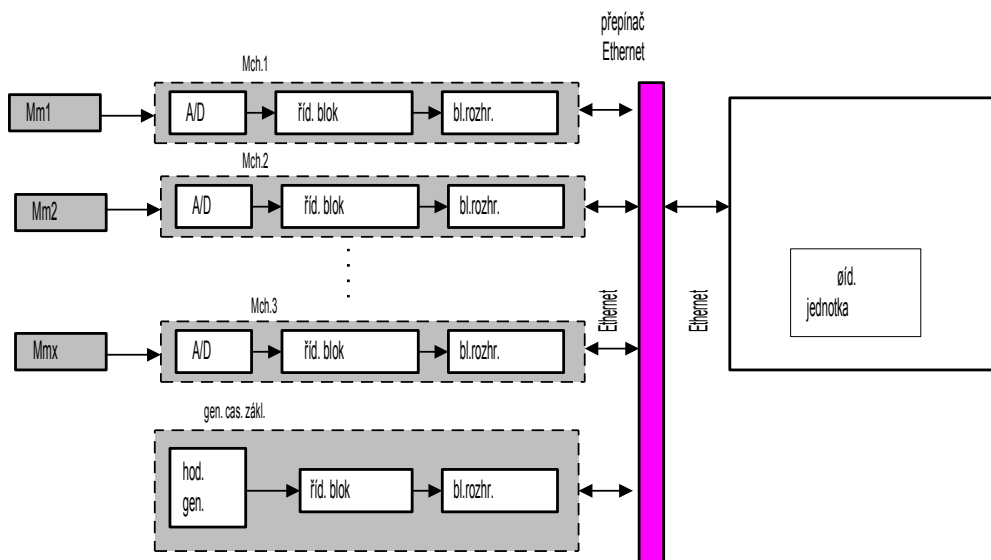
## Měřicí ústředna s protokolem IEEE 1588

Problém připojení měřicích míst řeší měřicí ústředna s protokolem IEEE 1588 navržená v rámci tohoto projektu. Jednotlivé měřicí kanály (*Mch.x*) ústředny dle obr. Obrázek 2 jsou koncipovány tak, že každý z nich obsahuje vstupní blok, blok převodu A/D, řídicí blok a blok pro rozhraní Ethernet. Jedné se tak o kompaktní měřicí kanál, který může být navázán přímo na senzor nebo příslušné měřicí místo (*Mmx*) a není třeba přenášet elektrický měřící signál dlouhým kabelem. Pro co nejkompaktnější konstrukci je použito řešení s procesorem STM32F407, který zastává funkci řídicího bloku, funkci převodu A/D i funkci řízení komunikace s rozhraním Ethernet. Pro spolupráci s rozhraním Ethernet je doplněn precizní fyzickou vrstvou (PHY), která se také využívá v procesu synchronizace.



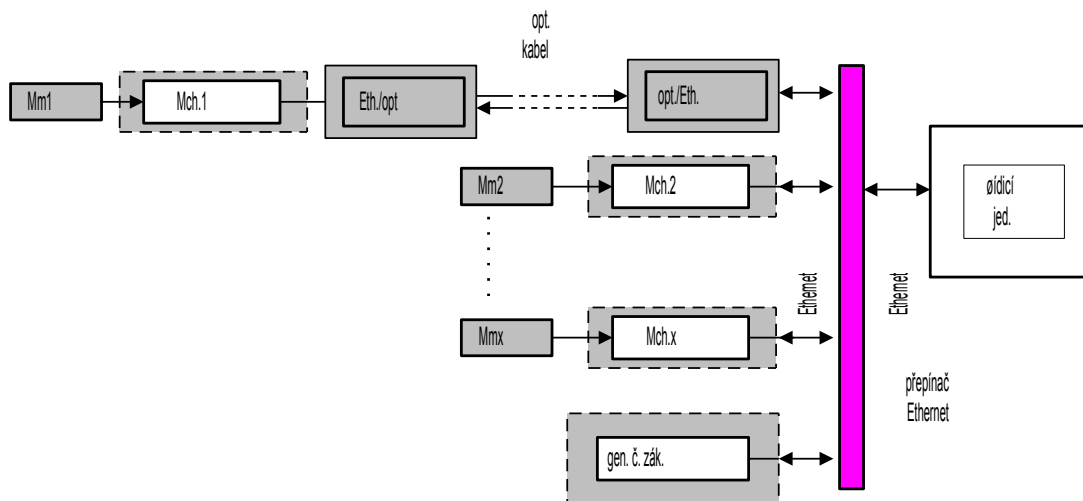
Obrázek 2. Blokové schéma měřicího kanálu ústředny

Zjednodušené blokové schéma měřicí ústředny s protokolem IEEE1588 je na obr. Obrázek 3. Obsahuje měřicí kanály *Mch.x*, které jsou napojeny přímo na měřicí místa *Mmx*. Ovládání měřicích kanálů a přenos naměřených dat se děje prostřednictvím rozhraní Ethernet. Vzájemné propojení jednotlivých kanálů i jejich připojení na řídicí jednotku je přes přepínač Ethernet. Ten umožňuje nejen přenos zpráv mezi kanálem a řídicí jednotkou, ale i komunikaci mezi jednotlivými kanály a generátorem časové základny.



Obrázek 3. Blokové uspořádání měřicí ústředny s IEEE1588

Každý měřicí kanál obsahuje svůj lokální krystalový generátor časové základny. Při požadavku synchronního mnohokanálového měření však bez dalšího nelze tyto časové základny přímo využít, protože nemá dostatečnou stabilitu. To se řeší tak, že v systému je referenční generátor časové základny, pomocí něž se jednotlivé generátory řešené s využitím PHY synchronizují. Pro proces synchronizace se využívá přenosu synchronizačních zpráv dle protokolu PTP IEEE 1588.



Obrázek 4. Měřicí ústředna s připojením kanálu pomocí optického kabelu

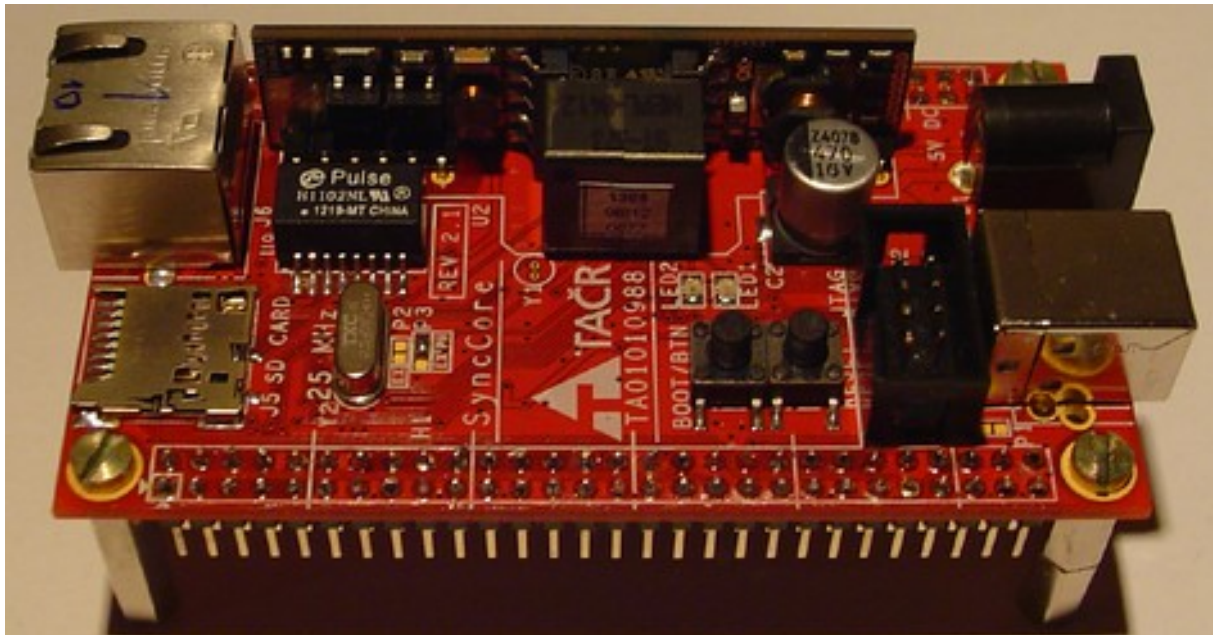
V měřicí ústředně mohou být jednotlivé měřicí kanály umístěny bezprostředně vedle sebe, avšak v případě potřeby je možno měřicí kanály i umístit odděleně s připojením na vzdálenost odpovídajícímu použitému standardu Ethernet, prakticky cca 100 metrů. Pokud by ani tato vzdálenost nepostačovala, např. při měření na rozsáhlém objektu, je možno použít prodloužení použitím optické linky. Ta se vytvoří vložením dvou shodných bloků obousměrných převodníků metalického Ethernetu na optický zpět propojených příslušným optickým kabelem. Tak lze dosáhnout zvětšení vzdálenosti měřicích modulů i na stovky metrů. Použití tohoto prodloužení však sníží přesnost synchronizace protokolem PTP řádově o mikrosekundy.

### Moduly měřicí ústředny

Jednotlivé moduly distribuované měřicí ústředny (modul 1 až modul k) měří napětí na vstupech A/D převodníků (CH 1 až CH n) a naměřená data posílají dále prostřednictvím přepínače (switch) po rozhraní Ethernet do nadřazené řídicí jednotky.

Nadřazená jednotka řídí veškeré moduly, sbírá z nich naměřená data a ukládá je do přehledně organizovaného CSV souboru, který může být následně dále zpracován.

Jednotlivé moduly měřicí ústředny jsou v této konkrétní realizaci složeny z desky plošných spojů o rozměrech 86x49 mm, které jsou osazeny mikrokontrolérem ARM z rodiny STM32. Na fotografii můžeme na levé straně vidět stříbrný konektor rozhraní Ethernet, pod nímž je umístěn konektor pro SD kartu, která může sloužit například k ukládání konfigurace pro modul a umožňuje tak například změnu parametrů modulu pouhou výměnou paměťové karty, tedy bez zásahu do programu mikrokontroléru.



Obrázek 5. Jeden z modulů měřicí ústředny

Pro jednoduchost nasazení měřicí ústředny se používá napájení měřicích kanálů po kabelu Ethernet. V každém měřicím kanálu je osazen příslušný modul Power over Ethernet (PoE), který zajišťuje napájení modulu a současně i jeho galvanické oddělení. Díky tomu jsou jednotlivé měřicí moduly vůči sobě galvanicky odděleny. Což ve výsledku znamená, že stačí k modulu vést pouze jeden UTP kabel, který následně přenáší jak data tak napájení pro modul.

Napájecí PoE modul byl zakoupen jako již hotový polotovár a je osazen čipem AS1135 od společnosti Akros Silicon, který je plně kompatibilní se standardem PoE napájení definovaným normou IEEE 802.3at-2009.

Specializovaný integrovaný obvod je pro PoE napájení nezbytný, jelikož výše zmíněný standard definuje sadu zpráv a příkazů, které si nejprve musí vyměnit přepínač (zdroj PoE napájení) a řídicí elektronika napájecího modulu (spotřebiče), než je zapnuto napájení pro dané zařízení. Pokud úspěšně proběhne tato komunikace, může dané zařízení odebírat až 625mA, což je více než dvojnásobek maximální spotřeby zde popisovaných modulů synchronní distribuované ústředny.

Aby bylo možno jednotlivé moduly napájet z rozhraní Ethernet, je třeba použít přepínač (switch), který dokáže poskytovat PoE napájení pro jednotlivá zařízení k němu připojená. Zástupcem takových zařízení je přepínač zobrazený na obr. Obrázek 6, což je běžně dostupný přepínač TL-SF1008P od společnosti TP-LINK.



Obrázek 6. Použitý Ethernetový switch s podporou Power over Ethernet

### Synchronizace s použitím „obyčejného“ Ethernetového switche

Kvalita synchronizace jednotlivých kanálů závisí na tom, zda synchronizační zprávy přenášené mezi bloky pře přepínače Ethernet mají konstantní zpoždění a současně, zda toto zpoždění je shodné i pro oba směry přenosu synchronizační zprávy. To mohou zajistit specializované přepínače s podporou PTP IEEE-1588, které jsou však velmi nákladné (cena asi 30 až 40-ti násobná oproti jednoduchým standardním přepínačům) a v sítích se standardně nepoužívají. Cílem projektu je navrhnout ekonomické řešení, kde bude možno použít nenáročný přepínač. V měřicí ústředně se proto používají standardní přepínače Ethernet.

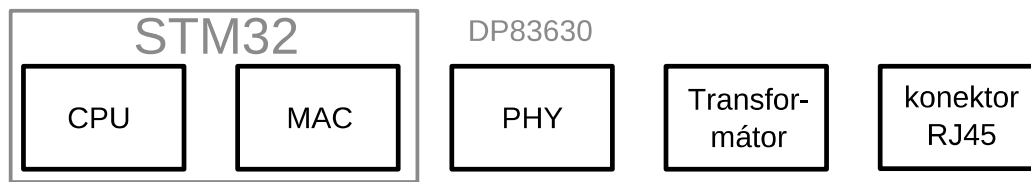
Při experimentech se však projevilo, že tyto přepínače mění zpoždění přenosu synchronizačních zpráv v závislosti na tom stupni vytížení přenosem zpráv. Zjednodušeně řečeno, pokud je malý, nebo minimální provoz, má zpoždění přenosu synchronizační zprávy malou fluktuaci v řádu jednotek mikrosekund. Při větším přenosu se situace značně zhoršuje a to až do několika desítek mikrosekund. Proto byl navržen nový způsob přenosu synchronizačních zpráv a dat v tzv. časovém multiplexu, který odděluje časové okno, kdy se přenášejí pouze synchronizační zprávy s relativně malým tokem informace, který přepínač „ nezahltí“ a další časová okna, ve kterých se přenášejí změřená data z kanálů.

### Sběr a odesílání naměřených dat modulem měřicí ústředny

Každý z vnitřních A/D převodníků může vzorkovat s maximální frekvencí 2,4 MSa/s nicméně použitý mikrokontrolér umožňuje taktéž zřetěžit všechny tři dostupné převodníky a díky společným kanálům mohou měřit všechny tři na jednom pinu MCU (není potřeba jejich vstupy spojovat externě). Toto zřetěžení a interní spojení vstupů A/D převodníků umožňuje vzorkovat maximální rychlostí 7.2MSa při maximálním rozlišení 12 bitů.

Zde použitý mikrokontrolér obsahuje pouze MAC vrstvu, která se stará o správné adresování, řízení přístupu ke komunikačnímu kanálu a případnou detekci kolizí v případě, že v jeden okamžik začne vysílat více stanic. MAC vrstva ovšem není schopna sama vysílat data po síti Ethernet. K tomu potřebuje PHY - fyzickou vrstvu Ethernetu, což je integrovaný obvod obsahující standardizované

komunikační rozhraní RMII (případně MII) pro komunikaci s MAC vrstvou, řídicí a kontrolní obvody a výstupní budiče pro pulsní transformátor, za nímž je zapojen Ethernetový konektor. Celou situaci ilustruje obr. Obrázek 7



Obrázek 7. Blokový diagram propojení mikrokontroléru a Ethernetu

CPU spolu s MAC je obsažena na samotném čipu MCU z rodiny STM32. K MCU je pomocí RMII rozhraní připojena Ethernetová fyzická vrstva (PHY), která je v tomto případě řešena čipem DP83630 od společnosti Texas Instruments. Následuje pulsní transformátor galvanicky oddělující modul od sítě Ethernet a standardní Ethernetový konektor.

Výše zmiňovaná Ethernetová fyzická vrstva je vhodná pro použití v systémech, které využívají protokol PTP, jelikož ji výrobce vybavil několika funkcemi, které práci s PTP protokolem značně zjednodušují a především umožňují dosahovat nižších odchylek od referenčního času. První a nejdůležitější funkcí je přiřazování časových značek k paketům již na HW úrovni samotné Ethernetové fyzické vrstvy, takže časová značka opravdu odpovídá době, kdy byl paket odeslán a nikoli době, kdy byla v mikrokontroléru zavolána funkce pro odeslání dat po Ethernetu.

Další velkou výhodou zde popisované fyzické vrstvy je fakt, že disponuje přesným vlastním digitálně říditelným oscilátorem s malým jitterem, jehož odchylka od nominální frekvence je navíc neustále kompenzována dle údajů poskytnutých PTP protokolem.

Výstup oscilátoru fyzické vrstvy je dostupný na jednom z jejích pinů, ze kterého je možné přivést hodinový takt do mikrokontroléru. Tímto lze ušetřit jeden krystal či krystalový oscilátor, který by jinak byl nezbytný k běhu MCU.

Poslední velmi dobře využitelnou vlastností použité fyzické vrstvy je přítomnost dvanácti GPIO pinů, které je možno nakonfigurovat tak, aby v zadaný čas přešly z log. 0 do log. 1 a tím pádem mohou být použity pro vyvolání přerušování v mikrokontroléru.

### Operační systém modulu

Základním stavebním kamenem, nad kterým je vystavěna architektura celého programu pro MCU, je FreeRTOS. Jedná se o real-time operační systém určený do malých zařízení s omezeným množstvím paměti a výpočetního výkonu. Jedná se o operační systém v plném slova smyslu, jelikož spravuje veškeré systémové prostředky a přerozděluje je právě běžícím procesům dle jejich priorit.

FreeRTOS se dá rozdělit na kód závislý na použitém HW a na vyšší SW vrstvy, které jsou již na HW nezávislé. Z pohledu vývojáře je kritická především implementace první části, tj. kódu závislého na daném mikrokontroléru. Zde se dá s výhodou využít již hotové implementace od výrobce MCU, společnosti ST Microelectronics. Takto připravený kód je pouze nutné upravit pro hladké zkompileování ve výše popisovaných vývojových prostředcích s ohledem na specifika kompilátoru GCC.

Driver Ethernetového rozhraní sestává ze dvou částí, z nichž první se stará o řízení MAC vrstvy mikrokontroléru a druhá řídí fyzickou vrstvou PHY realizovanou obvodem DP83630. Základem programu řídicího modulu jsou čtyři následující procesy.

- SCPI server
- proces plnění naměřená data do odesílacích zásobníků
- proces odesílající naměřená data ze zásobníků
- proces plánující následující časy odesílání dat

### **Řízení distribuovaného systému**

Řídícím prvkem měřicí ústředny SCPI server, který má za úkol poskytovat jednoduché a unifikované rozhraní pro ovládání distribuovaného systému prostřednictvím rozhraní Ethernet.

Díky ovládání pomocí SCPI příkazů je práce s modulem distribuovaného systému velice podobná práci např. s digitálním multimetrem připojeným přes GPIB rozhraní. V následujícím seznamu můžeme nalézt základní SCPI příkazy, které slouží k ovládání distribuovaného systému.

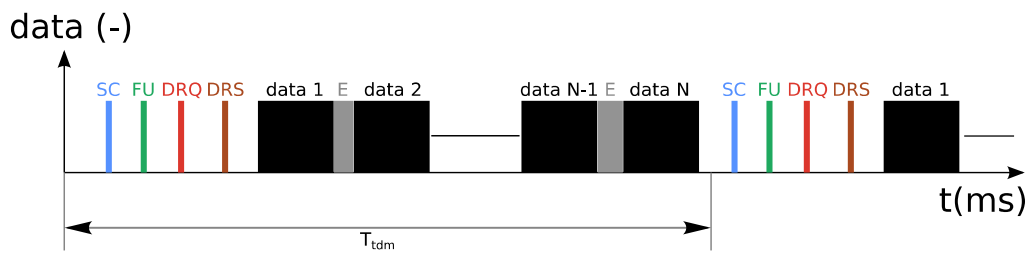
- DIST:RUN 1 - spuštění měření a odesílání dat
- DIST:RUN 0 - ukončení měření a odesílání dat
- DIST:RUN? - dotaz na stav měření (spuštěno/zastaveno)
- DIST:TIME? - dotaz na čas začátku měření
- DIST:SYNC - příkaz vykonávající synchronizaci měřících vláken mimo stanovenou synchronizační periodu

### **Plnění naměřených dat do zásobníků**

Vzhledem k potřebě měřit velké objemy dat bylo nutné vytvořit způsob, jakým se budou aktuálně naměřená data ukládat v paměti mikrokontroléru. Použitý mikrokontrolér disponuje pouze 192 kB paměti SRAM, která je navíc ještě z velké části obsazena operačním systémem a daty z ostatních běžících procesů. Proto zde bylo s výhodou využito Direct Memory Access (DMA) kontroléru, který je součástí mikrokontroléru. Ten umožňuje tzv. double-buffering, což je periodické ukládání vzorků do dvou nezávislých zásobníků (bufferů), mezi kterými je přepínáno vždy po naplnění jednoho z nich. Díky tomuto můžeme v určitém okamžiku přečíst jeden ze zásobníků (ten, do kterého se právě nezapíše) a máme jistotu, že data v něm obsažená nebudou v průběhu čtení přepisována. Toto umožňuje kontinuální měření a odesílání dat, o které se stará následující proces. Pokud máme v zásobníku naměřená data, je potřeba je odeslat do PC. Vzhledem k tomu, že začátek odměru je pro všechny moduly stejný, je pro ně stejný také okamžik, kdy mají naměřené zásobníky a potřebovaly by data odeslat po síti Ethernet. Pokud by toto však dělaly všechny moduly současně, docházelo by k mnohačetným kolizím na síti, které by vyústily ve ztrátu dat.

### **Časový multiplex**

Aby nedocházelo ke kolizím při odesílání dat a zároveň aby bylo možné provádět synchronizaci ve chvíli kdy je minimální traffic, je nutné rozdělit kapacitu přenosového media (sítě Ethernet) mezi jednotlivé moduly předem definovaným způsobem. Toto rozdělení musí respektovat časové nároky každého modulu na odeslání daného objemu naměřených dat.



Obrázek 8. Časový multiplex

Způsob řešení ilustruje obr. Obrázek 8. Zde je vidět, že kromě naměřených dat z jednotlivých modulů (data 1 až data N) je potřeba přenášet také synchronizační pakety protokolu PTP (barevné sloupce SC, FU, DRQ, DRS).

Vzhledem k tomu, že celý distribuovaný měřicí systém je postaven na synchronizaci času pomocí PTP, je potřeba umožnit volný průchod těchto synchronizačních zpráv tak, aby nekolidovaly s odesílanými daty z jiných modulů. Na toto navržený časový multiplex bere zřetel a žádný z modulů nezačne odesílat data, dokud neproběhla výměna synchronizačních zpráv v aktuální synchronizační periodě PTP protokolu, která má této konkrétní aplikaci standardní periodu jedné sekundy.

Perioda časového multiplexu je v obrázku označena  $T_{tdm}$  a tato perioda určuje po jaké době začne znovu ten samý modul odesílat nově naměřená data. Hodnotu periody je potřeba zvolit tak, aby v jejím rámci bylo možné přenést veškerá naměřená data do PC a vyměnit si synchronizační zprávy protokolu PTP.

Pro další omezení možnosti kolizí dat na síti způsobených například mírně zpožděným začátkem odesílání dat jednoho z modulů (toto zpoždění může být způsobeno např. čekáním na mutex, který v danou chvíli vlastní jiný proces), je zavedeno tzv. chybové okno. Toto okno je na obr. Obrázek 8 naznačeno šedým obdélníkem s popiskem E a vymezuje časovou oblast, ve které by žádný z modulů neměl vysílat data, pokud začal vysílat data včas. Pokud by však došlo ke zpožděnému odesílání, tak data odeslaná po konci časového rámce modulu (tj. již odeslaná v chybovém okně), dorazí v pořádku do PC, jelikož v chybovém okně vysílá pouze onen "zpožděný" modul a jím odeslaná data nemohou kolidovat s daty od ostatních modulů.

### Plánování běhu jednotlivých procesů

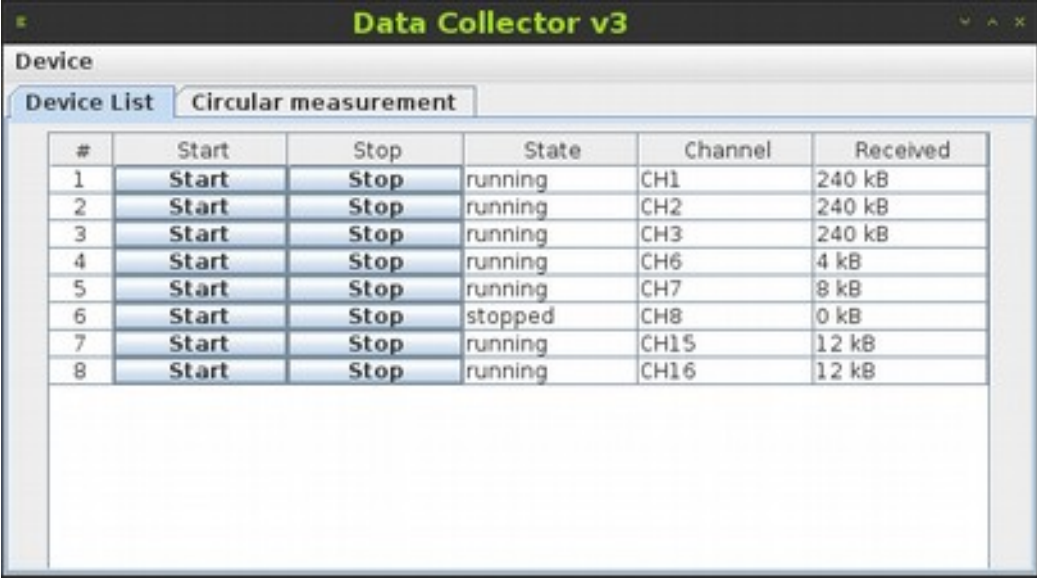
Funkce posledního procesu distribuované měřicí ústředny je poměrně jednoduchá. Jedním z úkolů je zjišťovat aktuální stav měřicího a odesílacího procesu (popsáno výše) a blokovat/odblokovávat jejich běh pomocí mutexů v závislosti na aktuálních potřebách systému.

Druhým úkolem tohoto procesu je plánovat následující časy spouštění měřicího a odesílacího procesu v rámci vymezeného časového okna pro daný modul. Tento proces, na rozdíl od předchozích dvou, spotřebuje pouze zanedbatelné množství paměti a výpočetního výkonu, jelikož kromě výpočtu následujícího časového okna pouze dohlíží na správný běh měření a odesílání dat.



## Ovládací program pro PC

Veškeré moduly synchronní distribuované měřicí ústředny jsou řízeny z nadřazeného PC, které taktéž sbírá naměřené soubory dat z jednotlivých modulů. Za tímto účelem vznikla ovládací aplikace pro PC, jejíž ukázka je na obr. 9



The screenshot shows the 'Data Collector v3' application window. It has a title bar with the text 'Data Collector v3'. Below the title bar is a menu bar with 'Device' highlighted. Under the 'Device' menu, there are two sub-menus: 'Device List' and 'Circular measurement'. The 'Device List' sub-menu is active, displaying a table with the following data:

| # | Start | Stop | State   | Channel | Received |
|---|-------|------|---------|---------|----------|
| 1 | Start | Stop | running | CH1     | 240 kB   |
| 2 | Start | Stop | running | CH2     | 240 kB   |
| 3 | Start | Stop | running | CH3     | 240 kB   |
| 4 | Start | Stop | running | CH6     | 4 kB     |
| 5 | Start | Stop | running | CH7     | 8 kB     |
| 6 | Start | Stop | stopped | CH8     | 0 kB     |
| 7 | Start | Stop | running | CH15    | 12 kB    |
| 8 | Start | Stop | running | CH16    | 12 kB    |

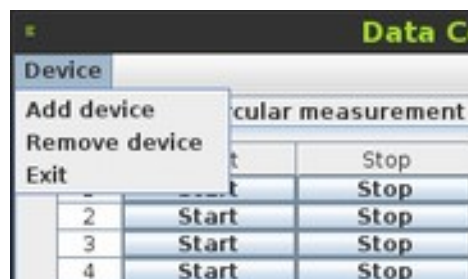
Obrázek 9. Ukázka ovládacího programu

Aplikace byla napsána v jazyce JAVA a k jejímu vytvoření bylo použito vývojové prostředí NetBeans. Program je multiplatformní a ke svému běhu vyžaduje běžné PC s 32-bitovým nebo 64-bitovým operačním systémem GNU/Linux, Windows, Mac OS X nebo Solaris.

Program je možné spustit dvěma způsoby. Buď použijeme připravený spouštěcí skript 'runDataCollector' (resp. 'runDataCollector.bat' pro Windows), nebo můžeme spustit samostatný archiv s aplikací v adresáři, kde se nachází, pomocí příkazu:

```
java -jar DataCollector\_v3.jar
```

Po spuštění programu je nejprve nutné přidat alespoň jeden měřicí modul, aby mohl obsluhý program sbírat data. Přidání se provede pomocí menu *Device* -> *Add device*, které je možné vidět na obr. 10



Obrázek 10. Zpráva modulů v menu programu

Pokud klikneme na *Add device*, objeví se dialogové okno (viz obr. X), které se dotáže na konkrétní IP adresu přidávaného modulu.

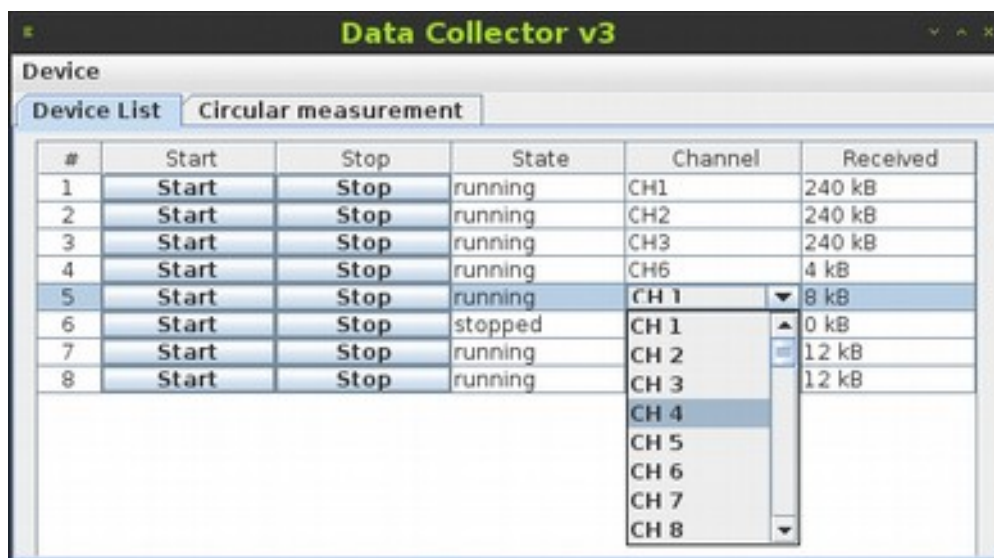


Obrázek 11. Dialogové okno pro zadání IP adresy

V případě, že zadáme správnou IP adresu a PC se dokáže s modulem spojit (je připojeno ke stejné síti), tak se přidávaný modul objeví jako poslední řádka v tabulce.

V praxi bude často potřeba od sebe odlišit měřící kanály pomocí jednoznačných jmen zadaných před začátkem měření. K tomu slouží sloupec s názvem *Channel*, který po kliknutí zobrazí seznam možných názvů měřících kanálů, které nesou název *CH N*, kde *N* leží v intervalu 1 až 253 (maximální počet připojených modulů je 253). Celou situaci ilustruje obr. 12.

Uživatel si tedy může definovat, jak se bude jmenovat sloupec naměřených dat ve výstupním CSV souboru, bez ohledu na IP adresu modulu či pořadí, v jakém byl přidán do aplikace.



Obrázek 12. Aplikace pro sběr dat a konfiguraci modulů měřící ústředny

Pokud máme přidáný alespoň jeden modul v aplikaci a nastaveno jméno měřícího kanálu, můžeme odstartovat synchronní měření pomocí tlačítka *Start*.

Toto tlačítko pošle modulu zprávu o tom, že může začít měřit a odesílat data, ale samotný start měření nastává až s příchodem synchronizačního pulsu, který je veden z Pulse Per Second (PPS) vývodu fyzické vrstvy.

Díky tomu, že PPS pulsy jsou generovány na základě času korigovaného PTP protokolem, je maximální časový rozdíl mezi příchodem náběžné hrany PPS pulsu (která startuje měření) na jednotlivých

modulech maximálně v řádu stovek nanosekund, což poskytuje synchronní soubor dat z modulů, kde maximální odchylka času odměru se od referenčního času liší nanejvýš o 1 mikrosekundu.

Naměřená data se zapisují do CSV souboru. Pro každý modul se vytváří separátní soubor jeho název je stejný jako IP adresa, pouze jsou tečky nahrazeny pomlčkami, kam jsou uložena naměřená data.

Na prvním místě v CSV souboru je vždy název kanálu tak, jak byl zvolen v ovládací aplikaci, následuje zalomení řádku a dále jsou zapisována již naměřená data. Na jeden řádek připadá vždy jedna hodnota, po které následuje čárka (znak ',') a časová značka, která udává okamžik, kdy byla hodnota změřena. Dále následuje zalomení řádky pomocí znaků Carriage Return (0x13) a Line Feed (0x10). Na následující řádce pokračuje zápis další hodnoty.

Pokud modul využívá více než jeden kanál A/D převodníku, jsou jeho podkanály označeny malými písmeny *CH Na*, *CH Nb*, *CH Nc*, atd. Ke každému podkanálu jsou dopočítány časové značky a výsledný CSV soubor je tvořen vždy dvojicí sloupců pro každý podkanál zapsaných vedle sebe (CH 1, čas 1, CH 2, čas 2, CH 3, čas3, ...).

Speciální vlastností zde popisované aplikace je schopnost kruhového měření na více kanálech, které je využito k implementaci akustického sledovacího systému popisovaného v následující kapitole. Kruhové měření se spouští a vypíná pomocí dvou tlačítek na záložce *Circular measurement*.