

datovy stream



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

**DIGITÁLNÍ ZÁZNAMOVÁ JEDNOTKA SE ZÁZNAMEM
DAT NA PAMĚŤOVÉ MÉDIUM S PREVENČÍ ZTRÁTY
DAT PŘI VÝPADKU NAPÁJENÍ**

DIGITAL DATA LOGGER WITH INFORMATION LOSS PREVENTION IN CASE OF POWER FAILURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ DOLÁK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÁCLAV ŠÍMEK

BRNO 2025

Abstrakt

Tato záv re ná práce se zabývá návrhem a vývojem digitálního záznamníku s ochranou proti ztrát dat p i výpadku napájení. Hlavní pozornost je v nována výb ru vhodných komponent, návrhu a implementaci aplika ního softwaru záznamníku, konstrukci expanzní desky s pot ebnými sou ástkami a testování výsledného za ízení. Vyvinutý záznamník bude využíván v Qi certifika ních laborato ích pro záznam dat z bezdrátových nabíje ek podporovaných spole ností NXP Semiconductors. Díky své univerzálnosti však m že být po úprav použit i pro záznam dalších typ dat v r zných aplikacích.

Abstract

This thesis focuses on the design and development of a digital recorder with protection against data loss during power failure. The main attention is given to the selection of suitable components, design and implementation of the logger application software, construction of the expansion board with the necessary components and testing of the resulting device. The developed logger will be used in Qi certification labs to record data from wireless chargers supported by NXP Semiconductors. However, due to its versatility, it can also be used to record other types of data in various applications after modification.

Klí ová slova

vestav né za ízení, digitální záznamník, návrh expanzní desky, zálohované napájení, prevence ztráty dat, SDHC karta, FAT souborový systém

Keywords

embedded device, digital recorder, expansion board design, power backup, data loss prevention, SDHC card, FAT file system

Citace

DOLÁK, Tomáš. Digitální záznamová jednotka se záznamem dat na pam ové médium s prevencí ztráty dat p i výpadku napájení. Brno, 2025. Bakalá ská práce. Vysoké u ení technické v Brn , Fakulta informa ních technologií. Vedoucí práce Ing. Václav Šímek

Digitální záznamová jednotka se záznamem dat na paměťové médium s prevencí ztráty dat při výpadku napájení

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením panem Ing. Václavem Šímkem a konzultantem Ing. Martinem Moškem PhD. Další informace mi poskytli mí kolegové z firmy NXP Semiconductors. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Tomáš Dolák
6. března 2025

Poděkování

Rád bych vyjádřil své upřímné poděkování vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Václavu Šímkovi, za jeho odborné vedení, cenné rady a aktivní podporu během celého procesu. Velmi si cením jeho pomoci při návrhu a realizaci desky plošných spojů, zajištění její výroby a také poskytnutí potřebného vybavení pro měření spotřeby, které bylo klíčové pro finální návrh zařízení.

Dále bych chtěl poděkovat svému firemnímu vedoucímu Martinu Moškovi za to, že tuto práci inicioval a převzal nad ní odborný dohled. Jeho rady, konstruktivní kritika a čas, který mi věnoval, významně přispěl k úspěšnému dokončení projektu.

Mé díky patří také kolegům z firmy NXP Semiconductors za jejich podporu a cenné podněty během vývoje digitálního záznamníku. Zvláštní poděkování si zaslouží i samotná firma NXP Semiconductors za její dlouhodobou podporu studentů, a to nejen v rámci odborné spolupráce, ale i při psaní závěrečných prací. Právě díky této podpoře mohla tato práce vzniknout.

Obsah

Seznam zkratk	4
1 Úvod	6
2 Záznam dat	7
2.1 Pořátky záznamu dat	7
2.2 Záznam dat v počítačích elektrotechniky	8
2.3 Digitální zpracování dat	9
2.3.1 Princip digitálního záznamu dat	9
2.3.2 Digitální záznamník	10
2.3.3 Digitální záznam v počítačovém systému	11
2.3.4 Digitální záznam na platformě mikroadi e	12
2.4 Koncepty využívané ke zpracování dat digitálních záznamníků	14
2.4.1 Vícenásobná vyrovnávací paměť (multiple-buffering)	14
2.4.2 Dávkové zpracování (batch processing)	15
2.4.3 Církulární buěr	16
2.4.4 Nízko-energetické režimy (low-power modes)	16
2.5 Způsoby zápisu dat	18
2.5.1 Píímý zápis na permanentní uložířt	18
2.5.2 Zápis na permanentní uložířt p es mezivrřtvu s FRAM paměti	19
2.5.3 Zápis na vzdálené uložířt	20
3 Návrh digitálního záznamníku	23
3.1 Existujících řešení digitálních záznamníku	23
3.1.1 OpenLog Serial Data Logger	23
3.1.2 Keeilog AirDrive Serial Logger	25
3.1.3 Anticyclone Systems AntiLog Data Logger Pro	26
3.1.4 Shrnutí představených řešení	27
3.2 Výběr vhodné platformy	28
3.2.1 Arduino Due	28
3.2.2 NXP FRDM-MCXM947	29
3.2.3 Linux based - Raspberry	30
3.3 Pístupy k ovládaní uložířt	30
3.3.1 SDIO	30
3.3.2 SPI	30
3.3.3 Quad-SPI flash	30
3.4 Možnosti správy dat - souborové systémy	30
3.4.1 FATFS	31

3.4.2	Chan FATFD	31
3.4.3	LittleFS	31
3.5	Výběr řízení přístupu k získaným datům	31
3.5.1	USB Mass Storage	31
3.5.2	Media Transfer Protocol	31
3.5.3	Human Interface Device	31
3.6	Výběr zdroje času	31
3.6.1	Obvod reálného času	31
3.6.2	Interní časovač	31
3.6.3	Bezdrátová komunikace (GPS/NTP)	31
3.7	Výběr přístupu řízení běhu aplikace	31
3.7.1	Bare-Metal	31
3.7.2	RTOS	31
3.8	Architektura systému digitálního záznamníku	31
3.9	Volitelné rozšíření	31
3.9.1	Monitorování teploty	31
3.9.2	Řešení problému synchronizace času	31
4	Realizace hardwaru	34
4.1	Základová deska	34
4.2	Expanzní deska	34
4.3	Mechanická část	34
5	Softwarová implementace	35
5.1	Záznamové vlákno	35
5.2	USB Mass Storage vlákno	35
5.3	Signalizace stavu systému	35
6	Testování systému	36
6.1	Testování a validace	36
6.1.1	Funkcionální testování	36
6.1.2	Kontrola bezpečnosti kódu	36
6.2	Limitace systému	36
6.3	Možná rozšíření záznamníku	36
7	Závěr	37
	Literatura	38

Seznam obrázk

2.1	První skutečný grafický záznamník (Chart Recorder) patentovaný Williamem Henrym Bristolem v roce 1888 [13]	7
2.2	Ukázka zařazení patřící do skupiny analogových záznamníků - polygraf [31]	8
2.3	Průběh analogového a digitálního signálu	9
2.4	Obecné schéma digitálního záznamníku	10
2.5	Schéma pokročilého digitálního záznamníku síťové komunikace - Wireshark [41, 43]	12
2.6	Ukázka architektury digitálního záznamníku pro měření teploty	13
2.7	Schéma principu práce s vícenásobnou vyrovnávací pamětí - náhodný stav	14
2.8	Schéma principu práce s vícenásobnou vyrovnávací pamětí - pevné ukazatel	15
2.9	Organizace bloku nevolatilní paměti [40]	16
2.10	Cirkulární vyrovnávací paměť	17
2.11	Graf znázorňující dynamiku spotřeby mikrokontroléru v průběhu času při využití aktivního a nízkoeenergetického režimu	17
2.12	Přímý zápis na permanentní uložení s SDHC kartou za pomoci čtyřpinové datové sběrnice	18
2.13	Struktura 1T-1C feroelektrické RAM paměti (FeRAM) [28]	19
2.14	Struktura feroelektrické RAM paměti (FeRAM) [28]	20
2.15	Schéma pokročilého digitálního záznamníku s cloudovým uložením postavený na streamingové platformě Kafka [42, 16]	21
3.1	Digitální záznamník SparkFun Openlog [7]	23
3.2	Sledovací zařazení GPS se záznamem dat [7]	24
3.3	Keeylog AirDrive Serial Logger s přístupem k datům přes webové rozhraní [2, 1]	25
3.4	Anticyclone Anti-Log Pro [6]	26
3.5	Arduino Due Pinout	29
3.6	Keeylog AirDrive Serial Logger s přístupem k datům přes webové rozhraní [2, 1]	32
3.7	Výsledná architektura digitálního záznamníku	33

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
ADC	Analog-Digital Converter (analogov -digitální převodník)
API	Application Programming Interface (rozhraní pro programování aplikací)
DRAM	Dynamic Random-Access Memory (typ paměti)
EMC	Electromagnetic Compatibility (elektromagnetická kompatibilita)
FATFS	FAT File System (souborový systém)
FeRAM	Ferroelectric RAM (typ paměti)
FIFO	First-In, First-Out (typ fronty)
GPIO	General Purpose Input Output
HID	Human Interface Device
HTTP	HyperText Transfer Protocol (síťový protokol)
ISR	Interrupt Service Routine (rutina obsluhy přerušení)
I2C	Inter-Integrated Circuit (sériová sbírnice)
I3C	Improved Inter-Integrated Circuit (sériová sbírnice)
MCU	Micro Controller Unit (mikrokontroler / mikroprocesor)
MMQT	MQ Telemetry Transport (síťový protokol)
MSC	Mass Storage Class
OEM	Original Equipment Manufacturer
RAM	Random-Access Memory (typ paměti)
RFP	Request for Proposal
RTOS	Real-Time Operating System (operační systém v reálném čase)
SD	Secure Digital (paměťová karta)
SDHC	Secure Digital High Capacity (typ paměťové karty)
SRAM	Static Random-Access Memory (typ paměti)
SPI	Serial Peripheral Interface (sériová sbírnice)
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter (sériová sbírnice)
USB	Universal Serial Bus (sériová sbírnice)
WPC	Wireless Power Consortium

Tabulka 1: Seznam použitých zkratk

Kapitola 1

Úvod

Tato bakalářská práce je v nována návrhu a implementaci digitálního záznamníku s autonomním dokon ením záznamu dat p i výpadku napájecího nap tí. Požadavek na za ízení vznikl od firmy NXP Semiconductors, konkrétn od týmu zam eného v nující se bezdrátovému nabíjení, ve kterém pracuji. Tento tým p sobí v eské republice, jak v Rožnov pod Radhošt m tak i v Brn a zárove má své zastoupení v Asii a Severní Americe. NXP Semiconductors je jedním z p edních len WPC (Wireless Power Consortium), organizace zodpov dné za definování standardu Qi pro bezdrátové nabíjení. Primární zam ení NXP v této oblasti spo ívá ve vývoji referen ních design pro automotive sektor, kde zákazník m poskytuje ešení ur ená pro integraci do vozidel.

Zákazníci, kte í využívají referen ní designy NXP, pocházejí z celého sv ta a dostávají tém hotový produkt, který lze následn certifikovat v Qi certifika ních laboratoích. Nicmén i p esto, že jsou referen ní designy navrženy podle nejnov jších standard , asto dochází k jejich úpravám podle specifických požadavk zákazník , zejména s ohledem na konkrétní poptávku koncového zákazníka (OEM – Original Equipment Manufacturer). Tyto požadavky jsou obvykle shrnuty v RFP (Request for Proposal), kde zákazník specifikuje konkrétní požadavky na systém. Tyto úpravy mohou být nap íklad realizovány z d vodu snížení ceny nebo zlepšení výkonu, nap íklad EMC charakteristik a nebo speciální chování bezdrátové nabíje ky v krajních situacích.

P i jakýchkoli úpravách však vznikají nové technické výzvy, a proto NXP poskytuje zákazník m plnou technickou podporu až do úsp šné certifikace. Certifikace probíhá v r z-ných laboratoích po celém sv t , avšak ne vždy m že být p ítomen zam stnanec NXP, který by dohlížel na celý proces a zajistil, že certifikace prob hne hladce. V t chto p ípadech se momentáln tým pro bezdrátové napájení spoléhá pouze na záznamy poskytnuté operátorem certifika ní laborato e. Tyto záznamy však pocházejí pouze ze strany p íjíma e – tedy certifika ního za ízení, zpravidla od výrobc Nok9 nebo Granite River Labs (GRL). Ty poskytují n které z d ležitých informací, bohužel tyto nabídnuté záznamy nezahrnují explicitní informace o chování vysíla e. Pokud tedy bezdrátová nabíje ka, tedy bezdrátový vysíla n jakým testem neprojde, což se ob as stává, je asto náro né zp tn identifikovat p í inu problému. [21]

Nezbytným požadavkem na implementaci tohoto záznamníku je i jeho snadná obsluha, nebo za ízení bude poskytováno zákazník m pro již zmín né ú ely certifikace. V klasickém scéná i zákazník p edá nabíje ku i se záznamníkem operátorovi certifika ní laborato e, ten si ji p ípojí k testovanému za ízení. Po skon ení testovacího dne operátor záznamník vrátí zákazníkovi, který jej následn p ípojí k po íta i a odešle spole nosti NXP Semiconductors získané záznamy.

Kapitola 2

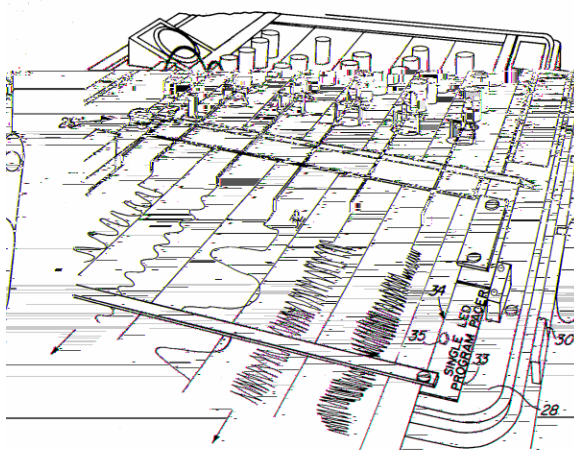
Záznam dat

2.1 Pořadí záznamu dat

Lidstvo již od svých počátků bylo potřebou zaznamenávat data, neboť člověk mnohdy dokáže datům přidat sémantiku - jejich význam, a proměnit je tak v informace. Právě díky nim

2.2 Záznam dat v počítačích elektrotechniky

Prvními specializovanými záznamníky byly mechanické i elektromechanické zařízení, využívající principu analogového záznamu dat. Jejich primárním účelem bylo zaznamenávání fyzikálních veličin, jako je například teplota, tlak, vlhkost nebo vibrace. Tyto přístroje využívaly myšlenky mechanického pohyblivého pera, které převádělo naměřenou hodnotu fyzikální veličiny na samostatný pohyb. Pro realizaci tohoto pohybu bylo nutné nejprve převést měřenou fyzikální veličinu na mechanický posun. Například pro měření teploty se běžně využíval bimetalový pásek, složený ze dvou kovových materiálů s různou hodnotou teplotní roztažitelnosti. Při změně teploty docházelo k prohnutí pásku v důsledku rozpínání kovu, čímž bylo rozpohybováno mechanické pero, které zapsalo hodnotu na paměťové médium.



Obrázek 2.2: Ukázka zařízení patřící do skupiny analogových záznamníků - polygraf [31]

Tyto přístroje jsou běžně používány od druhé poloviny 19. století. Pro již zmíněný záznam teploty lze například využít přístroj zvaný cirkulární grafový záznamník (Circular Chart Recorder), dále je hojně využíván polygraf, využívaný jako detektor lži. Znamnou nevýhodou těchto záznamníků bývá typ paměťového média, na které probíhá zápis hodnot, nejčastěji jím je papírová páska nebo papírový buben. Tyto pásy musí být velice často měněny za nové, ještě nepopsané, jelikož výsledné záznamy by se, jinak staly známy nepřečitelné, pokud by byly popsány vícekrát. [10]

Největší nevýhodou analogových záznamových systémů je jejich vysoká specializace¹ pro jediný konkrétní typ záznamu. Tyto záznamníky tedy nejsou snadno upravitelné pro jiné účely, na rozdíl od digitálních řešení, která umožňují flexibilnější přizpůsobení (například pouhou úpravou programu) k sledování monitorované soustavy. Často je v těchto případech nutné využít jiné analogové řešení. [22]

Další limitací těchto přístrojů bylo ruční vyhodnocování dat, což bylo mnohdy časově zdouhavé a také náchylné k chybám. K správné interpretaci dat byla často potřeba zkušená obsluha a v některých případech i pomocné měřicí pomůcky. Přenos souborů a automatizace taktéž nebyla možná, proto jakmile se v polovině 20. století začaly na trh dostávat číslicové systémy, analogové záznamové systémy jimi byly postupně nahrazovány. [33, 18]

¹ řešení jsou souasně mnohdy optimalizovaná pro záznam konkrétního systému.

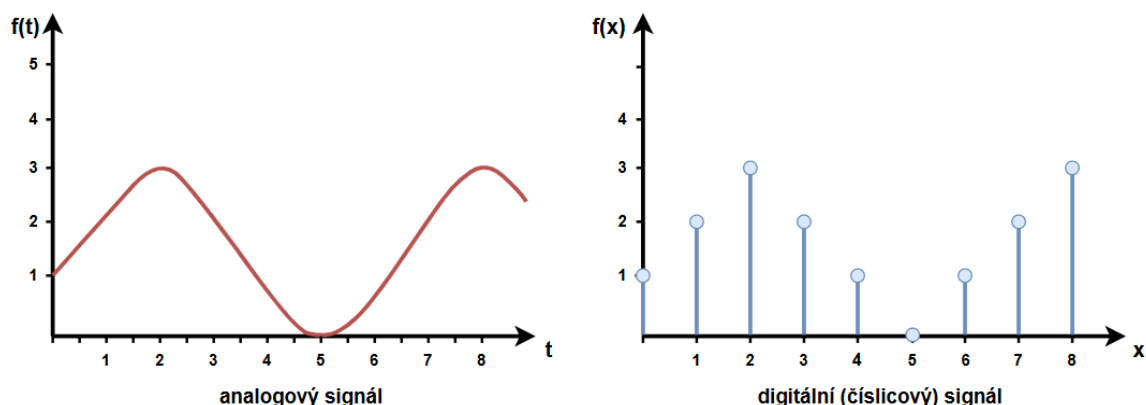
2.3 Digitální zpracování dat

S nástupem číslicových systémů v polovině 20. století došlo k velkému pokroku ve způsobu, jakým jsou data zaznamenávána, zpracovávána a uchovávána. Digitální záznam dat postupně nahradil analogové metody, které byly omezené nejen kapacitou paměťových médií (viz. kapitola 2.2), ale také nutností manuálního vyhodnocení záznamu a obtížným sdílením získaných dat.

2.3.1 Princip digitálního záznamu dat

Digitální záznam dat se oproti analogovému liší způsobem, jakým se v systému obecně pracuje se signály (viz. 2.2). Zatímco analogový záznam pracuje se spojitými (kontinuálními) signály, digitální záznam využívá diskrétní hodnoty, které jsou uchovávány v binární podobě. To znamená, že již na vstupu musí být přicházející signály v digitální podobě. Data tedy musí být generována číslicovými zdroji, nebo musí být převedena do digitálního tvaru pomocí komponenty k tomu určené - digitál-analogového převodníku.

V případě převodu analogových signálů do jejich digitální podoby prochází proces digitalizace ve třech základních krocích. V prvním dochází ke vzorkování, při kterém je tento spojitý signál snímán v pravidelných časových intervalech a převáděn na diskrétní hodnoty. Následně dochází ke kvantizaci, při níž jsou vzorkované hodnoty zaokrouhleny na nejbližší úroveň v omezeném rozsahu, to s sebou nese drobnou ztrátu přesnosti. Nakonec je kvantizovaný signál kódován do binární podoby, umožňující jeho další zpracování, ukládání a přenos výpočetním strojem.



Obrázek 2.3: Porovnání analogového a digitálního signálu

U digitálních signálů je proces záznamu výrazně jednodušší, protože již nevyžaduje žádnou digitalizaci. Digitální data vstupující do záznamníku v podobě datového toku (data stream) skrz přijímací periferie. Tyto periferie jsou specializované nikoliv na konkrétní fyzikální veličinu (jak tomu bylo u analogových záznamových zařízení viz. kapitola 2.2), ale na specifický komunikační protokol. Tedy jedna periferie může přenášet jak údaje o teplotě, vlhkosti, tak i cokoliv jiného pokud je dodrženo správné komunikační rozhraní, při němž povaha přenášených dat závisí na senzorech a zařízeních připojených k této periférii. Přijímaná data jsou tedy v přijímací periférii zpracovávána přímo ve své binární podobě, čímž odpadá celý proces potřebný pro provedení procesu digitalizace složené z vzorkování, kvantizace a kódování.

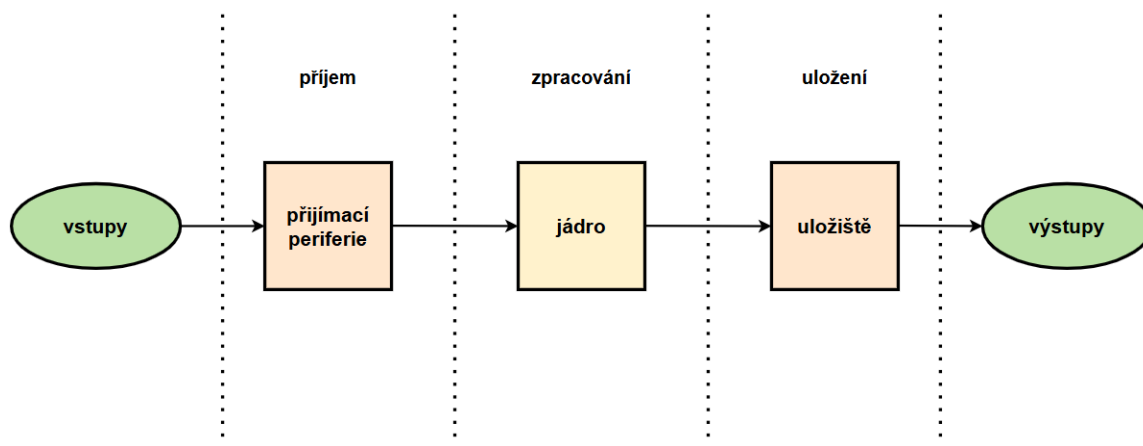
Digitální záznam poskytuje mnoho výhod oproti svému analogovému protějšku. Primárně je to jeho flexibilita a efektivita při zpracování, ukládání a přenosu dat. Digitální data lze snadno kopírovat, bez ztrát přenášet a ukládat bez degradace kvality, což je pro záznamové systémy zásadní. Díky digitálnímu záznamu můžeme dnes i jednoduše analyzovat data, než tomu bylo dříve u analogového záznamu. Proto jsou dnes systémy s digitálním záznamem preferovanou volbou.

2.3.2 Digitální záznamník

Digitální záznamník je dedikované zařízení nebo softwarový program určené ke sběru, zpracování a ukládání dat ve formě digitálního záznamu. Při pohledu na blokové diagramy digitálních záznamníků lze jejich strukturu rozdělit obecně do tří základních komponent, kterými jsou přijímací periferie, procesorové jádro a úložiště (viz. obrázek 2.4). [25, 27, 29]

Prvním klíčovým prvkem digitálního záznamníku je přijímací periferie, která slouží ke sběru vstupních dat. V závislosti na konkrétní aplikaci může tato komponenta zahrnovat různé typy vstupních rozhraní, jako jsou sériová rozhraní (UART, SPI, I2C a další) síťová rozhraní (Ethernet, Wi-Fi, LoRa, i CAN) nebo analogovo-digitální převodníky.² [27]

Druhým hlavním prvkem digitálního záznamníku je procesorové jádro, zajišťující zpracování vstupních dat. Procesorové jádro může být jak součástí mikrokontroléru, tak i procesoru, které může mít v tomto případě na starosti jednoduché operace, jako převod hodnoty z analogovo-digitálního převodníku na teplotu podle kalibrační křivky senzoru, přes filtrování šumu a doplnění časových značek naměřeným vzorkem, až po pokročilejší analýzy dat - například zpracování signálu pro EKG měření. [30]



Obrázek 2.4: Obecné schéma digitálního záznamníku

Poslední a také jednou z nejdůležitějších všeobecnou částí digitálního záznamníku je úložiště, kde jsou data uložena pro pozdější přenos a zpracování (post-processing). Volba tohoto úložného prostoru závisí na požadavcích aplikace a rozsahu jejího využití - od osobních "hobby" projektů až po zařízení využívaná ve velkopodnikových prostředích, nasazovaná ve vysokých počtech. V závislosti na tom lze využít různé strategie, které jsou v koherenci s různými technologiemi od paměťových karet SD a eMMC přes interní RAM i flash paměti až po síťová úložiště a cloudové služby. V mnoha případech je také využíván hybridní přístup.

²Vyjímkou jsou specifické monitorovací programy mezi, které patří například Windows Task Manager, jež ke svému sběru dat využívají rozhraní pro programování aplikací tzv. kernel API. [26]

ridní p ístup. Nashromžd ná data mohou být nejprve ukládána do interní volatilní pam ti záznamníku, jakou je třeba RAM úložišt (random access memory) a následn dávkov p enášena na trvalé médium (viz. kapitola 2.9) v podob lokálního i vzdáleného úložišt . Lze také p idat r zné mezivrstvy, například feroelektrickou pam s náhodným p ístupem (FRAM), která je podrobn ji rozebrána v kapitole 2.13, nebo jiné varianty nevolatilních pam tí s náhodným p ístupem, například další typy pam tí. [36]

Digitální záznamník poskytuje výstupy, obvykle jimi jsou organizovaná data, která mohou být dále analyzována, vizualizována nebo zpracovávána jinými systémy. Jakou podobu mají výstupní data, tedy jaký je jejich formát, op t závisí na konkrétních požadavcích aplikace. Jedním z požadavk je volba dle typu úložišt , jedná-li se o lokální úložný prostor, například pam ovou kartu, využívají se velmi ásto typy formát , jako třeba formát prostého textu (plain text) nebo binární formy. Databázová ešení typicky využívají formáty vycházející z rela ní nebo objektové reprezentace dat. Cloudová ešení naopak nabízejí daleko širší výb r, lze využít jak zmín ný prostý text, i binární formy, také lze ale využít objektové, textové formáty nebo formáty známé z databázových systém . Dále záleží, jakým zp sobem bude proveden p enos dat, pokud bude využita sí ová komunikace, třeba pomocí MQTT i HTTP, je vhodné data uspo ádávat do serializované podoby, zatímco p i zvolení p enosu po sériové lince je naopak vhodn jší a efektivn jší využít op t n který z binárních formát . D ležitou roli hrají i požadavky na následné zpracování (post-processing) a interpretaci dat v jiných systémech i aplikacích k tomu ur eným. Nap íklad pro nazírání na data z pohledu asových ad m že být vhodné využít formáty, které jsou kompatibilní s například databázovými systémy k tomu ur enými, jako je TimescaleDB, InfluxDB. V dalších p ípadech m že být efektivní využít knihovny pro zpracování a analýzu dat, například Pandas v prostředí Pythonu, které umož ůj rychlou manipulaci s velkým objemem strukturovaných dat, v takových p ípadech je tedy zase lepší strukturovat data podle formátu CSV. [39]

Zp sob , jak lze digitální záznamník sestavit, existuje mnoho, p i emž volba konkrétní architektury závisí na požadavcích dané aplikace. Velice ásto se však skládá z výše p edstavených komponent.

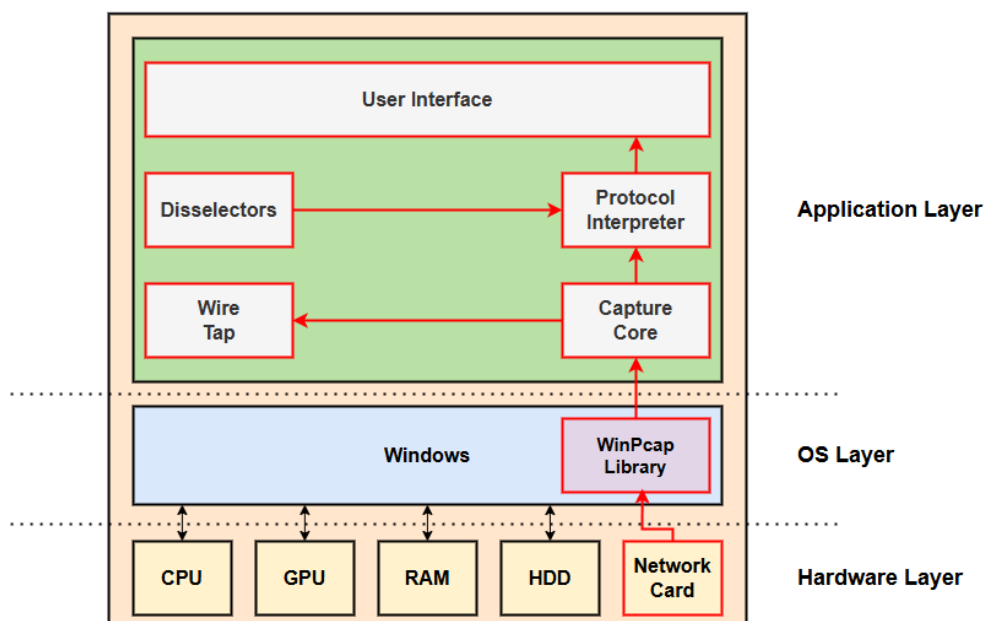
2.3.3 Digitální záznam v po íta ovém systému

Digitální záznamníky lze implementovat na po íta ových systémech jako jsou osobní po íta e i servery, kde p edstavují softwarová ešení, sloužící ke sb ru, zpracování a potenciální archivaci dat. Tyto systémy obvykle také vycházejí ze struktury obecného íslicového záznamníku popsaného v kapitole 2.3.2.

Vstupní data p ícházejí ásto z periférií, jako je například sí ová karta i sériové porty, ale mohou také pocházet ze "pseudo"za ízení obsahujících stavy aplikací b žících na daném po íta i i speciálních API (nap . již zmi ovaných kernel API). Procesor, který tato data p íjímá, tak je obvykle nejen zpracovává, ale ásto i ur itým zp sobem vyhodnocuje, jelikož disponuje dostate ným výpo etním výkonem pro pokro ílé operace. Výsledkem t chto úkon procesoru nad daty bývají informace o aktuálním stavu sledovaného systému, které lze využít k monitorování a dalším rozhodovacím proces m. [17]

Podle požadavk aplikace a jejího zam ení se liší i zp sob, jakým jsou data uchovávána. Mnohdy si tyto záznamníky odkládají data pouze do asn do opera ní pam ti RAM, to umož ůje sledovat pouze aktuální stav nebo krátkodobé trendy. Pro sledování dlouhodobých trend je pak možné tyto záznamy exportovat na dlouhodobá úložišt , do r zných typ

soubor - CSV, XLS i speciálních formát relevantních dané aplikaci. Také se zde velmi často uplatňuje koncept exportování do databázových systémů a cloudových služeb.



Obrázek 2.5: Schéma pokročilého digitálního záznamníku síťové komunikace - Wireshark [41, 43]

Tyto záznamníky jsou především implementovány na strojích s relativně výkonnými hardwarovými prostředky, což je činí až překvalifikovanými pro mnohé stroje. Kromě provozních nákladů, jako je spotřeba elektrické energie, je také vysoká pořizovací cena, nebo každý záznamník vyžaduje plnohodnotný počítač s dostatečným výpočetním výkonem, úložným prostorem a případným připojením k síti. Proto se softwarové záznamníky na počítačových systémech nejčastěji využívají jako doplňkový nástroj pro monitorování procesů, jako jsou TCP/IP záznamníky, pokročilé sériové záznamníky a terminály, i záznamníky speciálních rozhraní, jako je například HID (Human Interface Device). Typicky se nasazují tam, kde počítač plní jinou primární funkci, například jako server zpracovávající velké objemy síťové komunikace nebo vývojové prostředí pro embedded systémy. V těchto případech se využívají k diagnostice, analýze logů běžících aplikací nebo jako terminál pro připojení zařízení, čímž rozšiřují možnosti sledování a ladění bez nutnosti pořizování specializovaného hardwaru.

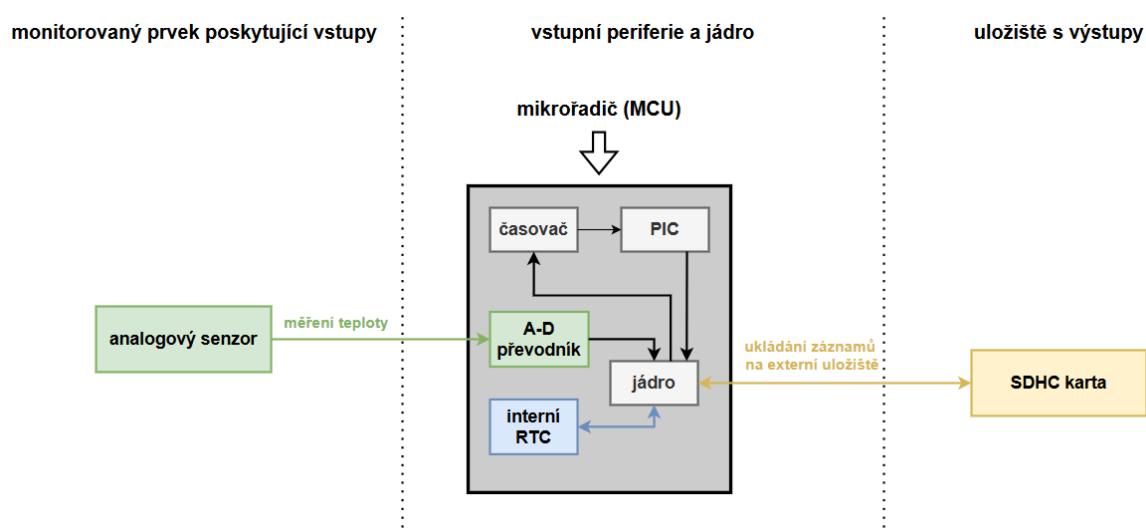
Před implementací a použitím takového záznamníku je tedy dobré si promyslet, zda úhel záznamníku, jestli budeme zaznamenávat stav pokročilého zařízení, na které se vleze i implementovaný záznamník. Pro dedikované záznamníky je z hlediska ceny a efektivity často výhodnější využít specializované vestavné systémy, jejichž hardware je navržen tak, aby výkon odpovídal konkrétním potřebám aplikace.

2.3.4 Digitální záznam na platformě mikroadi

Digitální záznamníky nemusí být nutně implementovány na výkonných počítačových systémech, ale mohou být také realizovány jako vestavné systémy postavené na mikroadiích (MCU). Narozdíl od svých protějšků na PC jsou však zaměřena na oblasti, kde je potřeba

ur itým zp sobem sbírat a ukládat data s minimálními nároky na spot ebu energie a výpo etní výkon. Proto své uplatnění nacházejí v pr myslové automatizaci, IoT aplikacích, zdravotnických za ízeních a dalších oblastech.

I tyto záznamníky také obvykle obsahují základní komponenty obecného záznamníku p edstaveného v kapitole 2.3.2, které je možno libovoln rozší it. Data vstupují do záznamníku prost ednictvím p íjímacích periférií, která mohou pocházet z r zných senzor a už analogových i digitálních (tedy teplotních ídel, akcelerometr nebo proudových sníma a dalších) nebo z jiných pozorovaných za ízení. Vstupní periférie záznamník mohou tvo it klasické komunika ní rozhraní, jakými jsou UART, SPI, I2C i I3C, ale také bezdrátová rozhraní v podob Wi-Fi, Bluetooth nebo analogov -digitální p evodník.³ Tyto vstupní periférie mohou být p ímo integrovány v mikro adi i - nap íklad již uvedený analogov -digitální p evodník, nebo mohou být p ípojeny extern ve form samostatných modul , které komunikují s MCU prost ednictvím již standardních rozhraní.



Obrázek 2.6: Ukázka architektury digitálního záznamníku pro měření teploty

Vstupní data jsou následn zpracována jádrem mikro adi e. To m že provád t základní operace, jako je p evod íslicové hodnoty z ADC na teplotu, filtrování signálu, dopl ování asových zna ek, nebo provád t lehce obtížn jší operace, jako je výpo et tepu v p ípad m ení srde ních aktivit a další.

Následn jsou data ukládána do uložišť . Obvykle se používají externí nevolatilní uložišť , která zaru ují perzistenci dat i po vypnutí záznamníku. Standardn se dnes používají r zné typy SD karet, které poskytují relativn jednoduché p ípojení p es rozhraní SPI nebo SDIO. Široce využívané jsou také pam ti FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) které kombinují výhody rychlého zápisu (pohybujícího se kolem 1–10 MB/s) a nízké spot eby energie. Možné je také up ednostnit p ístup se vzdáleným uložiště m v podob databáze i cloudového systému.

³Vstupních komunika ních je vícero, zde jsou zmín eny jen ty nejzákladn jší

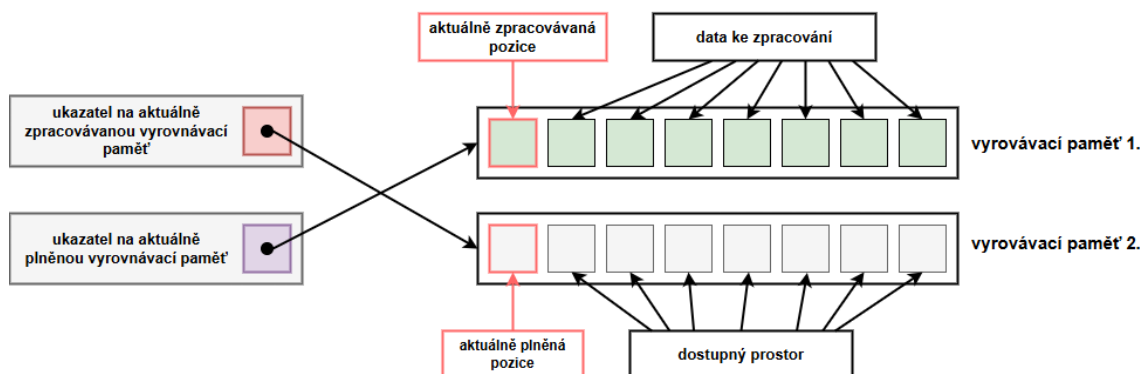
2.4 Koncepty využívané ke zpracování dat digitálních záznamníků

Digitální záznamníky často bývají implementovány na platformě MCU, která dokáže poskytnout dobrý kompromis mezi cenou a výkonem, nicméně je nezbytné zohlednit specifická omezení a vlastnosti daného mikrokontroléru. Oproti počítačovým systémům mají MCU omezené výpočetní a paměťové zdroje, což vyžaduje důkladný návrh architektury systému. Proto je i nutné volit takové metody, které mohou minimalizovat latenci, spotřebu energie a nároky na paměť, a zároveň zajistí spolehlivý provoz v reálném čase.

2.4.1 Vícenásobná vyrovnávací paměť (multiple-buffering)

Jedním z častých konceptů využívaných v implementaci digitálních záznamníků je použití vícenásobné vyrovnávací paměti. Tento koncept je převážně známý díky algoritmům využívaným v oboru počítačové grafiky. Grafický chip musí zpracovat velké množství dat za krátký časový úsek, proto algoritmus zpracování dat využívá dvě vyrovnávací paměti – přední vyrovnávací paměť, takzvaný front-buffer, jež je využívána pro zobrazení aktuálního snímku a zadní vyrovnávací paměť, ve které chip připravuje nový obsah. Výsledný obsah tak může být plynule vykreslen bez artefaktů a trhání. Jakmile je nový snímek kompletní, vyrovnávací paměti se prohodí. [38]

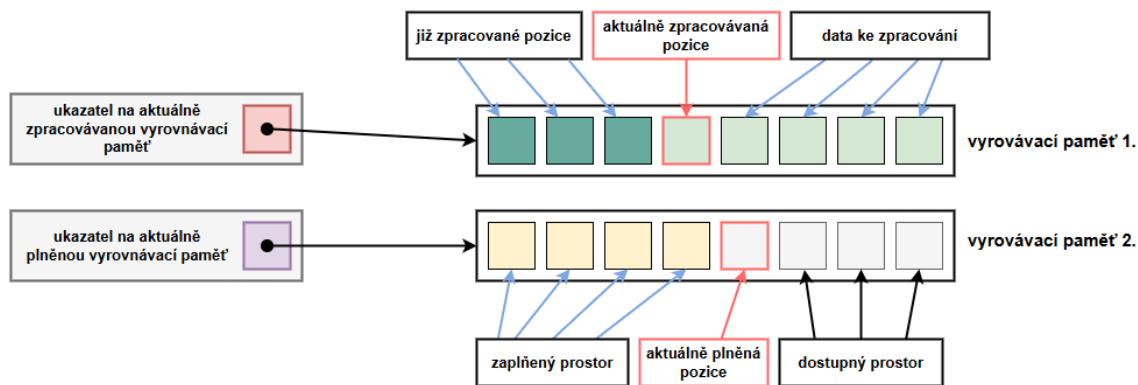
Obdobný mechanismus se využívá i v digitálních záznamnících, kde slouží k zajištění kontinuálního sběru dat bez výpadků. Zatímco jeden buffer přijímá nová data ze vstupní periferie (například analogovo-digitálního převodníku či jiných vstupů), druhý buffer je současně zpracováván nebo ukládán na úložné médium. Tím se minimalizuje riziko ztráty dat způsobené časovou prodlevou při jejich zpracování nebo zápisu.



Obrázek 2.7: Schéma principu práce s vícenásobnou vyrovnávací pamětí - náhodný stav

Důležitou vlastností tohoto algoritmu je jeho nízká operační režijní náročnost. Plynulý chod zpracování dat je zajištěn bez nutnosti fyzického přenosu obsahu mezi vyrovnávacími pamětmi. Místo toho se využívají ukazatele (pointery), které směřují na počítačové adresy jednotlivých bufferů. Jakmile je sbíraný buffer (Back Buffer) naplněn, ukazatele se prohodí – back buffer se stane zpracovávaným bufferem (Front Buffer) a přední front buffer se uvolní pro další sběr dat.

Tato metoda nachází významné uplatnění zejména v systémech pracujících v reálném čase, kde dochází k přijmu velkého objemu dat v krátkých časových intervalech a kde doba zpracování nesmí překročit dobu sběru dat. Využitím vícenásobné vyrovnávací paměti se



Obrázek 2.8: Schéma principu práce s vícenásobnou vyrovňovací pamětí - p e azení ukaza-
tel

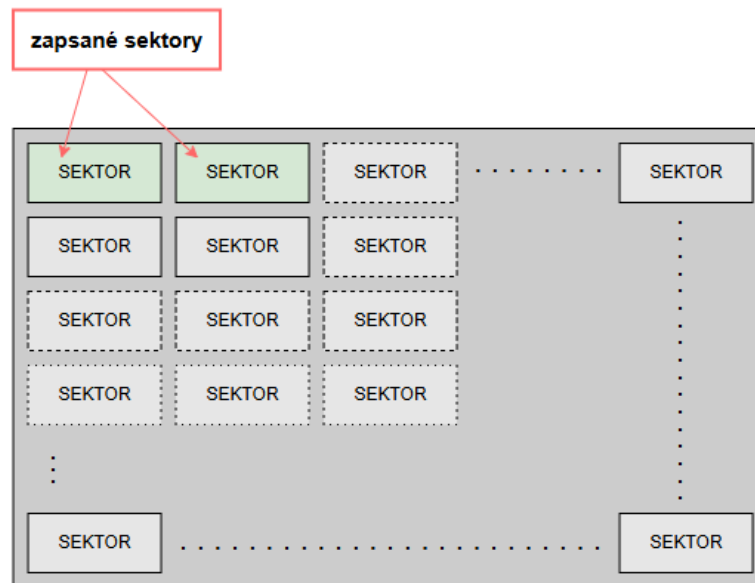
minimalizuje latence zpracování a souasn se snižuje riziko p ete ení pam ového prostoru. [15]

Nicmén , žádný algoritmus není dokonalý a i tato metoda má své nevýhody, které je t eba zmínit. Vyrovňovací pam ti jsou zpravidla implementovány softwarov , nikoliv hardwarov , což vede k zvýšeným nárok m na pam ové prost edky, obzvláš v segmentu volatilní pam ti (SRAM/DRAM) kde jsou bu ery uloženy. [37]

2.4.2 Dávkové zpracování (batch processing)

Další princip, jež je využíváný v implementacích digitálních záznamník , souvisí s typem uložiš , na které jsou získaná data zaznamenávána. Data jsou standardn ukládána dlouhodob na n který z typu nevolatilních pam tí, nap íklad NAND i NOR Flash pam í, FeRAM, jež umož ůjí uchování dat i po odpojení napájení. Tyto druhy pam ti jsou organizovány do blok (viz. obrázek 2.9), p í emž bloky jsou následn rozd leny na menší jednotky zvané sektory. Velikost sektoru obvykle bývá 512 bajt i 4096 bajt , v závislosti na typu média a jeho architektu e. Tato bloková struktura umož ůje ú innou správu prostoru, které uložiš nabízí, ale souasn vyžaduje specifický zp sob zápisu/ tení dat, které je pouze umožn no na úrovni celých blok . [12, 24]

Dávkové zpracování tohoto chování pam ti využívá, data se tedy nejprve shromaž ůjí ve volatilní pam ti - nap íklad RAM a teprve po napln ní ur itého objemu (celého bloku i jeho násobku) dojde k jejich zápisu na kone né pam ové médium.



Obrázek 2.9: Organizace bloku nevolatilní paměti [40]

2.4.3 Církulární buěr

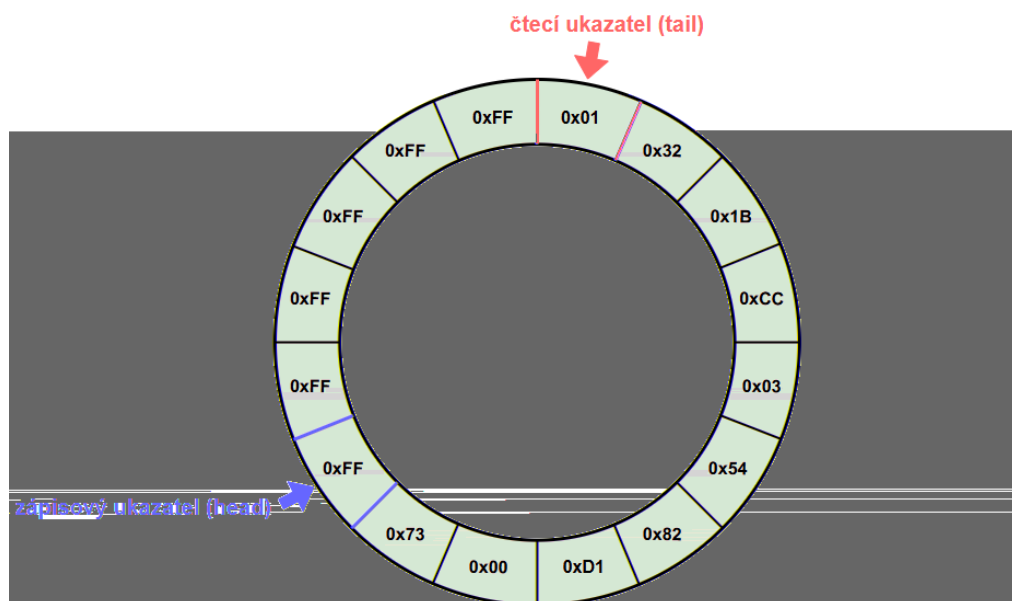
Církulární buěr (circular buěr), někdy také označovaný jako kruhový nebo cylindrický buěr, je datová struktura, která funguje na principu FIFO fronty (First-In, First-Out) a považuje tuto paměť za kruhovou. Tento přístup je často využíván k řešení problému jednoho producenta a konzumenta (producer-consumer problem), kde jedno vlákno je konzument a druhé producent. Například ve vestavných zařízeních, jedním z vláken je rutina obsluhy přerušení, která čte data ze senzoru a druhým vláknem je hlavní smyčka událostí. [14]

Princip činnosti církulárního buěru spočívá v použití dvou ukazatelů - zápisový ukazatel (head) a čtecí ukazatel (tail). Ukazatel head vždy směřuje na pozici, kam bude zapisován následující prvek, zatímco ukazatel tail ukazuje na pozici, ze které bude čtena následující hodnota. Pokud ukazatel head dosáhne konce pole, vrací se na jeho začátek, čímž je zajištěna kruhová povaha struktury. Při plném buěru lze zvolit dvě strategie - přepsání nejstarších dat nebo odmítnutí nových vstupů, přičemž výběr závisí na konkrétní aplikaci. [14, 23]

Z hlediska časové složitosti nabízí církulární buěr konstantní časovou složitost - $O(1)$ pro základní operace, jako je zápis (enqueue) a čtení (dequeue). Tato efektivita je dána tím, že se při zápisu a čtení dat není potřeba přesouvat prvky v paměti, ale lze pouze inkrementovat ukazatele s využitím operace modulo. Pokud jde o prostorovou složitost, velikost církulárního buěru je určena předem - zpravidla jde totiž o staticky alokované, to v tomto případě odpovídá složitosti $O(n)$, kde n je maximální počet prvků, které může buěr pojmout. [32]

2.4.4 Nízko-energetické režimy (low-power modes)

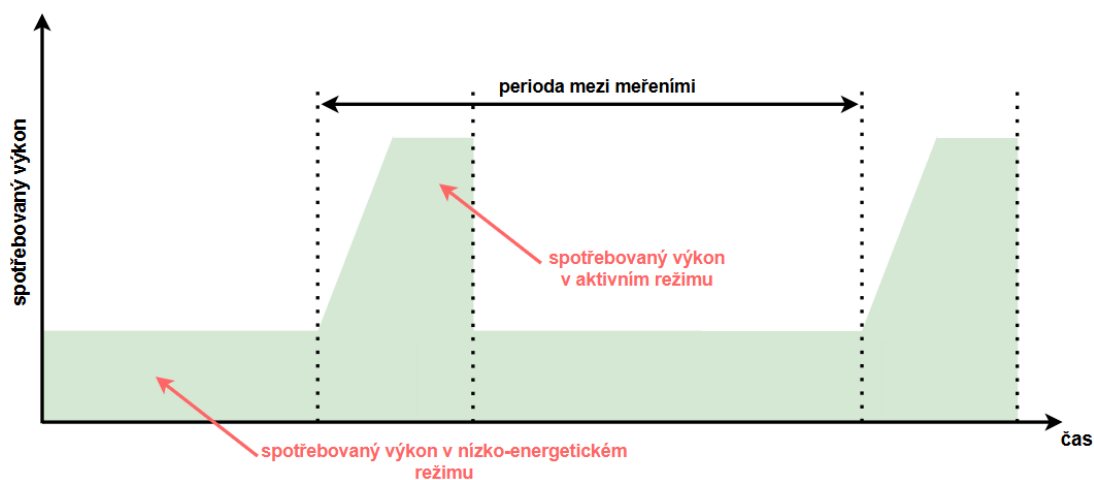
Energetická efektivita je jedním z klíčových parametrů obecně vestavných zařízení, tedy i digitálních záznamníků implementovaných na platformě MCU, zejména pokud jsou napájeny z baterií či jiných omezených zdrojů energie (například energy harvesting). Minimalizace spotřeby bývá v těchto případech realizována využitím nízkoenergetických režimů



Obrázek 2.10: Církulární vyrovnávací pam

(low-power modes), které umožní zařízení přejít do stavu s minimální energetickou náročností během nečinných period. V praxi mnoho digitálních záznamníků nemusí provádět měření a záznam dat nepřetržitě. Například záznamník teploty může v pravidelných intervalech provést měření, uložit naměřenou hodnotu, přejít do režimu nízké spotřeby a po uplynutí definovaného časového intervalu nebo při vyskytnutí speciální události přejít do aktivního režimu. [35]

Průběh takového cyklického chování spotřeby mikrokontroléru, kde se střídají fáze měření a spánku s pravidelnou periodou měření teploty, je znázorněn na obrázku 3.7 níže.



Obrázek 2.11: Graf znázorňující dynamiku spotřeby mikrokontroléru v průběhu času při využití aktivního a nízkoenergetického režimu

Akoliv nízkoenergetické režimy přinášejí značné úspory energie a jsou nezbytné pro zařízení napájená z baterií, u dataloggerů s velkým objemem zaznamenávaných dat mohou představovat významná omezení. Tyto režimy sice snižují energetickou náročnost systému,

avšak zároveň omezují schopnost mikrokontroléru rychle reagovat na události. Spánkové stavy, které minimalizují spotřebu energie, často vedou k delšímu zpoždění při probuzení a nižší dostupnosti kritických periférií. V aplikacích, kde je vyžadována okamžitá odezva na externí podněty nebo nepřetržitě zpracování velkého množství dat, může tento faktor negativně ovlivnit spolehlivost a efektivitu záznamníku. [34]

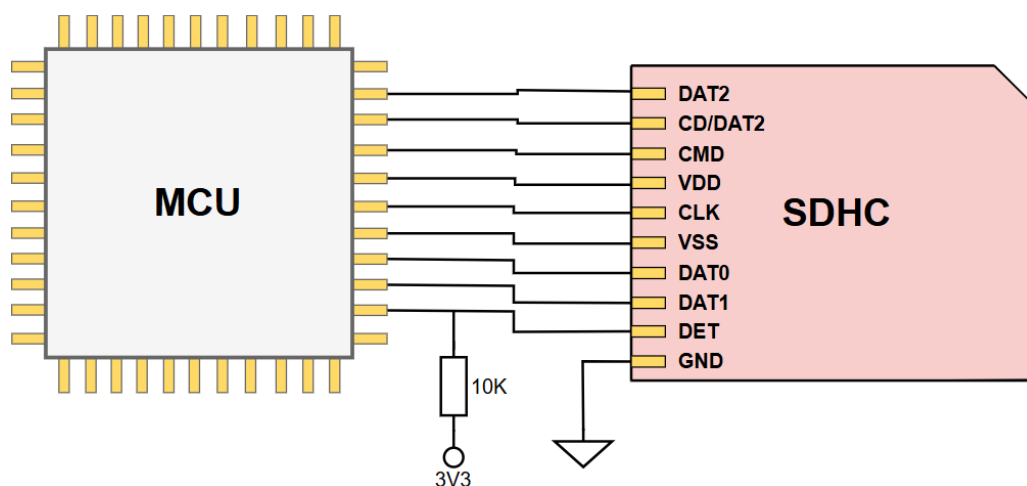
V těchto případech je proto nutné zvážit provozní podmínky a očekávanou dostupnost systému. Pokud záznamník pracuje s velkým datovým tokem a má možnost být připojen po dobu záznamu stále k externímu napájení, může být výhodnější upustit od implementace nízkoeenergetických režimů a místo toho optimalizovat architekturu systému pro nepřetržitý provoz s důrazem na výkon a rychlou odezvu. [35]

2.5 Způsoby zápisu dat

Stejně jako jsou důležité úložiště, na které jsou zaznamenána data získána, je tak je důležitá práce s tímto úložištěm. Záznamníky dat musí být navrženy tak, aby umožnily spolehlivé ukládání získaných dat, které by mělo být efektivní ve smyslu rychlosti a šetrné pro zvýšení životnosti úložiště. Tato kapitola popisuje tři různé způsoby ukládání dat: přímý zápis na lokální úložiště, ukládání prostřednictvím mezivrstvy s FRAM pamětí a využití vzdálených úložišť. Každá z těchto metod má své specifické výhody a omezení, které určí její vhodnost pro konkrétní aplikaci.

2.5.1 Přímý zápis na permanentní úložiště

Přímý zápis na permanentní úložiště představuje nejjednodušší a nejpřímější metodu ukládání dat. V tomto případě jsou zaznamenána data ihned zapisována na nevolatilní paměťové médium, jako je SD karta, eMMC, USB Flash disk nebo NAND Flash chip. Tento způsob eliminuje potřebu mezivrstvy mezi záznamníkem a úložištěm, čímž se minimalizuje latence a zjednodušuje celková implementace.



Obrázek 2.12: Přímý zápis na permanentní úložiště s SDHC kartou za pomoci čtyřpinové datové sbírnice

Hlavní výhodou této metody je její jednoduchost a okamžitá perzistence dat. Data jsou ukládána přímo na trvalé úložiště a nehrozí tak jejich ztráta při výpadku napájení. To je

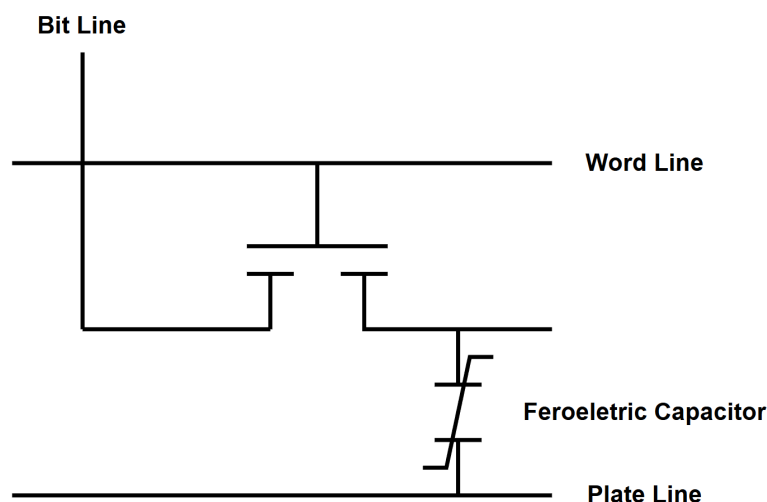
zvláště výhodné v záznamnících, které zapisují drobné množství dat, kde se data nemění neustále, ale jednou za danou periodu uvedenou v kapitole 2.4.4, například v environmentálních záznamnících monitorujících teplotu nebo vlhkost.

Problémem tohoto principu je však častý zápis na paměťové médium. Proto, aby se předešlo nadměrnému opotřebení uložení a zvýšila se efektivita zápisu, využívá se mnohdy souasná metoda dávkového zpracování (batch processing) zmíněná v kapitole 2.4.2. Data jsou krátkodobě uložena ve volatilním uložení, a jakmile jich je nashromážděno dostatek, tak jsou přepsána do dlouhodobé nevolatilní paměti. To ale přináší i nové úskalí, hodnoty uložené v neperzistentním uložení jsou vystavena riziku ztráty v případě ztráty napájecího napětí.

2.5.2 Zápis na permanentní uložení přes mezivrstvu s FRAM pamětí

Alternativní volbou k přímému zápisu na permanentní uložení je využití mezivrstvy ve formě FRAM (Ferroelectric Random Access Memory). FRAM je nevolatilní paměť, jež kombinuje výhody rychlé volatilní RAM paměti a perzistentního uložení.

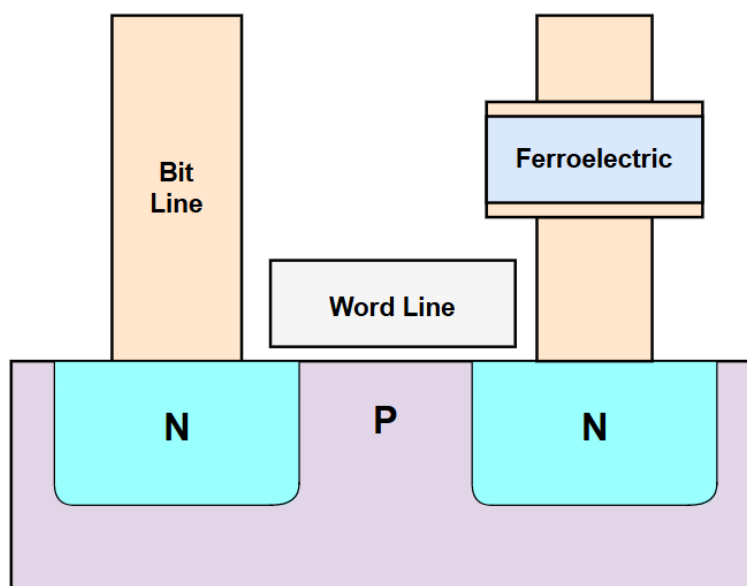
Ve feroelektrické RAM paměti (FRAM/FeRAM) jsou data ukládána pomocí změny polarizace feroelektrického materiálu v paměťové buňce. Jednotlivé buňky se skládají podobně jako je tomu u dynamické RAM (DRAM), z jednoho tranzistoru a jednoho kondenzátoru (1T-1C). Na rozdíl však od DRAM, kde je informace uchovávána jako elektrický náboj v lineárním dielektriku, FeRAM využívá feroelektrický materiál, jakým je třeba titanititanolovnatý (PZT), který vykazuje hysterezní chování. Jakmile je aktivní elektrické pole, dipóly se v krystalové mřížce přeuspořádají do jednoho ze dvou stabilních stavů odpovídajících binárním hodnotám nula a jedna a tento stav zůstává zachován i po odeznění elektrického pole. [20]



Obrázek 2.13: Struktura 1T-1C feroelektrické RAM paměti (FeRAM) [28]

FRAM lze v dedikovaném digitálním záznamníku využít jako takzvanou mezivrstvu neboli vyrovnávací paměť, pomocí které lze optimalizovat zápisy na konečné dlouhodobé uložení. Jak jsou tedy data záznamníkem postupně sbírána, tak mohou být postupně i po blocích zapisována do této mezivrstvy. Pokud je následně vyrovnávací paměť FRAM

dostatek nabití, její obsah je dávkově přenesen na dohodnuté trvalé úložiště, a tento cyklus se opakuje.



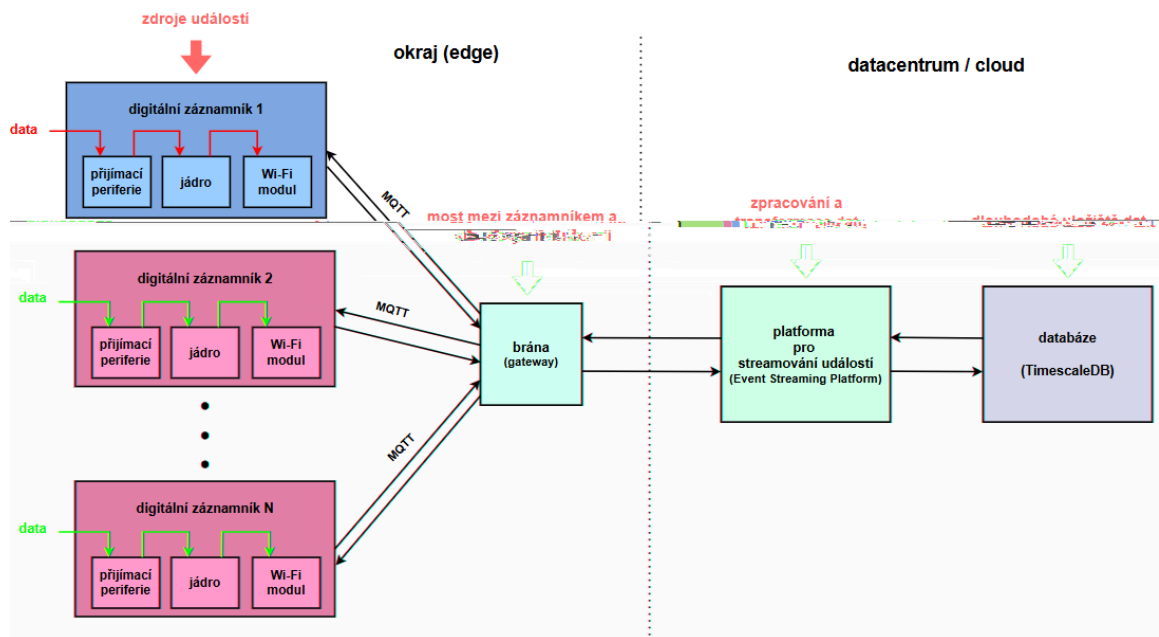
Obrázek 2.14: Struktura feroelektrické RAM paměti (FeRAM) [28]

Použití FRAM jako vyrovnávací paměti přináší několik výhod. Jedním z hlavních přínosů je snížení opotřebení hlavního úložiště, eliminován je totiž častý zápis po malých blocích dat, který zbytečně opotřebovává koncová nevolatilní úložiště typu flash, která mají omezený počet přepisovacích cyklů. Další výhodou je velice rychlý zápis oproti flash pamětem, obvykle trvá zápis na FRAM v řádu nanosekund, což je řádově rychlejší než srovnávané flash paměti, na kterých zápis trvá typicky v řádu mikrosekund až milisekund. FRAM je navíc nevolatilní, což znamená, že i v případě výpadku napájecího napětí zůstávají zaznamenaná data na feroelektrickém úložišti zachována, čímž se eliminuje potřeba dodatečných opatření k ochraně dat, jako jsou záložní baterie nebo superkondenzátory.

2.5.3 Zápis na vzdálené úložiště

Pro dlouhodobé uložení dat lze v neposledním případě také využít vzdálená úložiště, jakými jsou databáze i cloudy. Lze tak využít jednotného úložiště pro velké množství digitálních záznamníků a eliminovat tak potřebu lokálních, nevolatilních paměťových médií. Zmínované jednotné úložiště může být jak centrální server, nebo distribuovaná síťová soustava, umožňující uložení daleko většího množství dat, než může nabídnout lokální úložiště.

V praxi dedikovaný záznamník, který data buď přímo zpracovává, nebo je do něj uchovává v volatilní paměti, využívá síťové rozhraní k jejich přenosu do vzdáleného úložiště. Přenos probíhá obvykle prostřednictvím aplikačních síťových protokolů postavených nad transportním protokolem TCP (Transmission Control Protocol), jakým je MQTT, nebo nad protokolem UDP, nad kterým je postaven třeba protokol CoAP. Každý z uvedených zástupců poskytuje trochu odlišnou funkcionalitu. MQTT je vhodnější pro komunikaci, kde odesílatel a příjemce jsou synchronizováni a dialog probíhá asynchronně. Vysílatel tedy odesílá data a ostatní záležitosti mohou být. Zato CoAP zase prosazuje formát komunikace typu dotaz-odpověď, kterým mimikuje HTTP. [11]



Obrázek 2.15: Schéma pokročilého digitálního záznamníku s cloudovým uložištěm postavený na streamingové platformě Kafka [42, 16]

Následně jsou data ukládány na již zmínované databázové servery a cloudové služby. Databázové servery mohou být postaveny na různých technologiích v závislosti na typu dat a požadavcích na jejich zpracování. Často jsou využívány systémy, které umožňují pracovat s daty ve formátu časových řad, což jsou sekvence datových bodů zaznamenávaných a už v pravidelných i nepravidelných časových intervalech. Na takové data můžeme být tedy vhodné využít například InfluxDB nebo TimescaleDB.⁴ Cloudová řešení jsou pak objektová uložiště, kde jsou data ukládány v podobě souborů a binárních objektů. Zároveň tyto služby umožňují kromě samotného uložení, přidat i analytickou vrstvu, která umožní zpracování dat v reálném čase a reagovat tak na aktuální stav. K tomuto účelu pak lze využít třeba streamovací platformy, jakými jsou Apache Kafka (viz. obrázek 2.15) a AWS Kinesis. [19]

Jaké jsou tedy výhody tohoto přístupu? Především je to možnost centralizovaného ukládání a zpracování dat, to se hodí pro velké množství digitálních záznamníků, jelikož v takovémto případě nechceme obcházet všechna zařízení a postupně z nich extrahovat získaná data. Další výhodou je možnost reagovat na aktuální stav a odvozovat z nich skutečnosti. Je tedy třeba možné v chytrých domácnostech automaticky upravit výkon klimatizace nebo vytápění na základě dat ze senzorů teploty a vlhkosti. [19]

Tento přístup se hodí pro digitální záznamníky operující ve známých prostředích, jakým je třeba zmínovaná chytrá domácnost i továrna, jelikož je třeba zaručit stabilní připojení k síti. Pokud by měl záznamník cestovat různě po světě, bylo by třeba ho na každém novém místě připojit k Wi-Fi síti i Ethernetu, nebo by bylo třeba koncipovat tento digitální záznamník se SIM kartou, pomocí které by byl zajištěn přístup k mobilní síti, nicméně i to má své nedostatky. Dále je důležité mít i koncipovanou komplexní infrastrukturu, jelikož jsou přenášena data po síti, je třeba přidat další úroveň zabezpečení, která zajistí autentizaci, šifrování, integritu dat a případně další bezpečnostní prvky. Dále je kolikrát možné

⁴Možné je také zvolit relační databáze, ale ty jsou u digitálních záznamníků méně vhodné.

tento přístup využít na zařízení, která že zařízení musí mít celistvý TCP/IP modul (stack), bez něhož by záznamník nemohl podporovat protokoly, jakým je třeba MQTT, jež je postavený nad transportním protokolem TCP a zároveň z důvodu zmiňovaného zabezpečení.

Kapitola 3

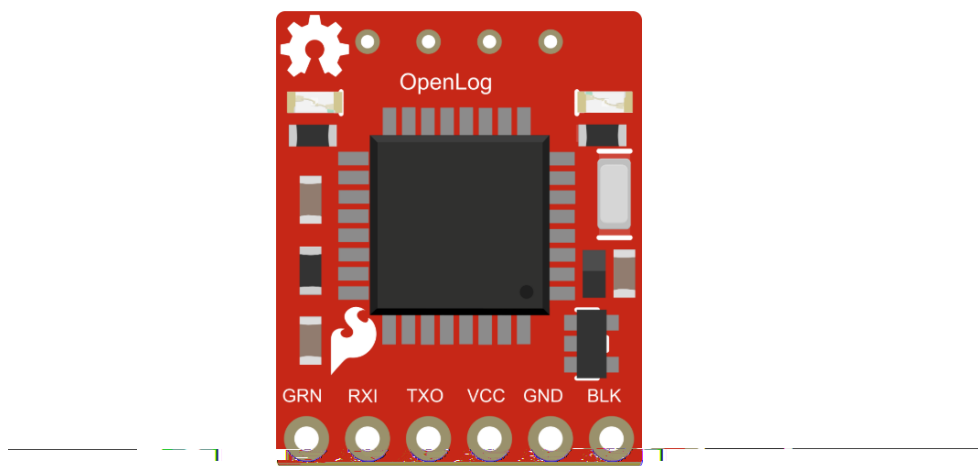
Návrh digitálního záznamníku

3.1 Existujících řešení digitálních záznamníku

Také již bylo zmíněno, že záznam dat lidé eší od nepaměti. A problém záznamník dat se také nevyskytuje poprvé a existuje mnoho již produkčních řešení, která se zaměřují na záznam různých typů dat. Tato kapitola se v níže popisu n kterých dostupných řešení, konkrétně záznamník m zaměřeným na záznam datových tok zmíněných v kapitole 2.3, mezi které se bude adit i výsledné zařízení, které jsem navrhl, implementoval a popsal v této bakalářské práci.

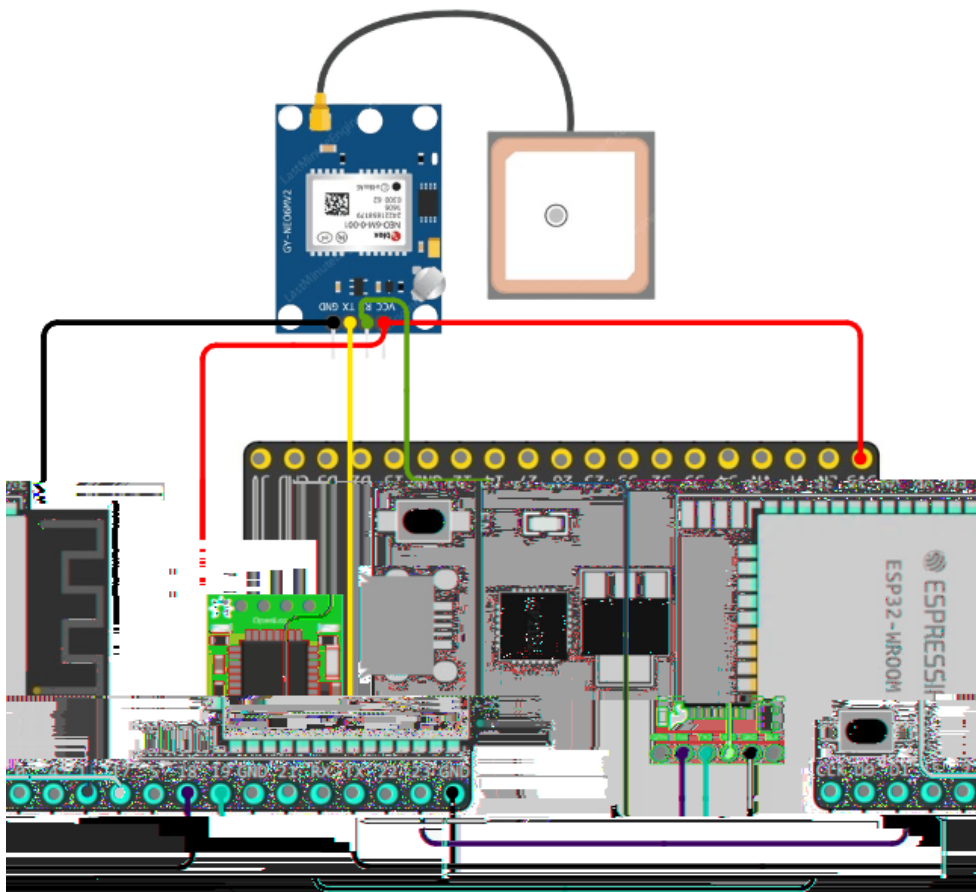
3.1.1 OpenLog Serial Data Logger

Prvním z vybraných existujících záznamníků je modul OpenLog, který je kompaktní a snadno použitelné zařízení pro záznam sériové komunikace, který vyvinula společnost SparkFun. Tento záznamník bží na osmibitovém mikrokontroléru ATmega328P taktovaném na 16 MHz a je navržen tak, aby umožnil p ímý záznam sériové komunikace na microSD kartu s podporou až do velikosti 32 GB a bez nutnosti složit ější konfigurace. [9]



Obrázek 3.1: Digitální záznamník SparkFun Openlog [7]

Tento záznamník je vhodný na jednoduché projekty, hobby projekty, i prototypování, OpenLog lze totiž snadno použít v systémech postavených například na nepájivém poli. není tedy potřeba složitá integrace do PCB. Záznamník je vhodný k monitorování systému, který již předzpracoval data ze zdroje dat (viz. obrázek 3.4). Obvykle máme v tomto případě hlavní mikrokontroler, který přijímá monitorovaná data (například z GPS modulu) a následně je jakýmsi způsobem zpracovává a formátuje je do koncové podoby a následně je posílá po sériové lince na bázi UART komunikace, Openlog modulu. Záznamník si data následně ukládá do vyrovnávací paměti ve volatilibní RAM paměti a jakmile se tento buffer naplní, tedy nasbírá 512 bajtů, tak je zapíše do micro SD karty. [7]

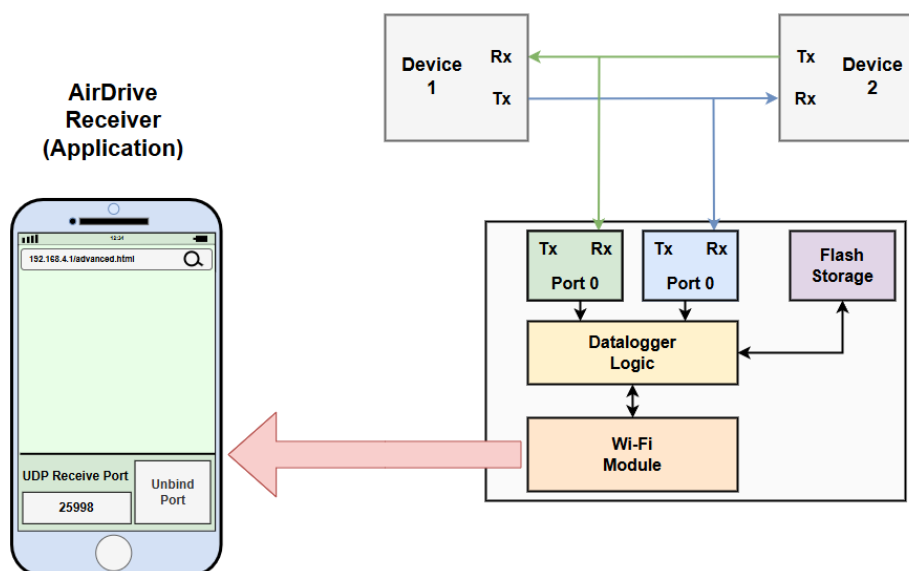


Obrázek 3.2: Sledovací zařízení GPS se záznamem dat [7]

Nevýhodou tohoto záznamníku je, že hlavní mikrokontrolér, který zpracovává data a posílá data následně do záznamníku, musí být aplikací připojen k tomuto úřadu, což zvyšuje režii (overhead) navíc. Toto ovládací MCU musí buď pomocí příkazů nastavit parametry záznamu, jako je baudrate, vytvoření souboru, přídání dat do souboru, a další funkcionality, nebo je třeba využít konfigurační soubor uložený na SD kartě. Bohužel po nastavení v konfiguračním souboru je nutné provést napájecí cyklus (power cycle) než se nastavení propíše. Datalogger podporuje SD karty s kapacitou od 64 MB do 32 GB se souborovými systémy, nicméně je nutné tuto SD kartu zformátovat předešle na zařízeních s operačním systémem Windows. Dále tento záznamník nepodporuje přístup na SD kartu bez nutnosti vyjmutí fyzického úložiště.

3.1.2 Keeylog AirDrive Serial Logger

Dalším takovým řešením je AirDrive Serial Logger, vynalezený společností Keelog. Toto zařízení je moderní digitální záznamník poskytující bezdrátový přístup k datům, který umožňuje záznam sériových dat pomocí komunikačního standardu RS-232 i RS-485. Na rozdíl od tradičních řešení, která ukládají data pouze na lokální úložiště, nabízí tento záznamník konektivitu k Wi-Fi síti, čímž umožňuje vzdálený přístup k uloženým datům bez nutnosti vyjmutí fyzického média a manipulace s tímto zařízením. Keelog poskytuje více variant AirDrive záznamníků, které se liší poskytnutými funkcionalitami. Hlavním rozdílem je odlišný přístup k získaným datům, základní verze pracuje jako Wi-Fi hotspot, zatímco verze Pro a Max umožní připojení do existující Wi-Fi sítě a také odesílání e-mailových reportů, časové razítkování záznamů nebo dokonce živé streamování dat. Všechny se naopak zmíněné verze neliší, je velikostí interní paměti, která činí 16 GB, ta je přístupná i jako USB flash disk s rychlostí až 480 Mbps. Zařízení jako AirDrive nachází uplatnění zejména v průmyslovém monitorování, zprůměrně inženýrství sériových protokolů, zálohování dat z platebních terminálů nebo sběru dat ze senzorových systémů. [2, 3, 4]



Obrázek 3.3: Keeylog AirDrive Serial Logger s přístupem k datům přes webové rozhraní [2, 1]

Výhodou AirDrive Serial Loggeru je již zmíněvaná poskytovaná bezdrátová konektivita, která umožňuje přístup k datům z jakéhokoliv zařízení s Wi-Fi připojením, to se může hodit zejména v průmyslových prostředích, kde může být velký počet takovýchto zařízení a získaná data tak mohou být hromaděna na jednom místě. Tímto centrálním bodem může být například cloudové úložiště nebo serverová databáze (viz. kapitola 2.5.3), kam budou data pravidelně odesílána a následně mohou být analyzována. Tento záznamník také podporuje možnost konfigurace pomocí souboru CONFIG.TXT, ve kterém je možné nastavit, s jakou frekvencí budou získaná data odesílána do koncového úložiště. Pro a Max verze umožní také nastavit tzv. živé vysílání (live streaming), přičemž data mohou být monitorována a analyzována v reálném čase. Možné je také k datům přidávat časová razítka (timestamps), to se může hodit pro monitorování systému, jejichž chování se chystáme porovnávat v jiném systému a je tedy nutné si synchronizovat dva záznamy z různých zařízení. [2]

Navzdory svým pokročilým funkcím má AirDrive Serial Logger i několik nevýhod. Jednou z nich je omezení na standardy RS-232 a RS-485, které již nejsou v dnešní době široce rozšířené, a v mnoha systémech by bylo třeba využít sériové převodníky. Jelikož tyto standardy využívají asynchronní sériovou komunikaci (UART), není možné s tímto záznamníkem přímo zaznamenávat data z jiných běžných komunikačních sběrnic, jako jsou I2C, SPI, USB, CAN a ani nepodporuje možnost procesu digitalizace pomocí A-D převodníku. Tím se omezuje jeho univerzálnost a možnost použití v širším spektru aplikací. Další limitací je maximální přijímací přenosová rychlost UART (baud rate), která dosahuje pouze 115200 bps. To je například nevyhovující pro monitorování systém bezdrátového nabíjení společnosti NXP Semiconductors, kde se komunikace probíhá s daleko vyšší komunikační rychlostí. [2]

3.1.3 Anticyclone Systems AntiLog Data Logger Pro

Tím řešením je AntiLog Data Logger od společnosti Anticyclone Systems, který lze klasifikovat jako vysoce výkonný digitální záznamník určený pro záznam sériových dat v průmyslových a vývojových aplikacích.¹ Opět jako u řešení od společnosti Keyylog (viz. kapitola 3.1.2) umožňuje data přijímat pomocí standardu RS-232 a také plnohodnotně zaznamenávat obousměrné sériové přenosy s vysokými přenosovými rychlostmi až 921 600 baud. Zařízení umožňuje dlouhodobé zaznamenávání díky podpoře velkokapacitních nevolatilních úložišť až do velikosti 1 TB. Datalogger existuje v několika provedeních - verze AntiLog, AntiLog Pro a také OEM verze (ta je ve formě modulu), která umožňuje přímou integraci do jiných systémů. Nejpokročilejší verze Pro podporuje funkce jako časové razítkování (timestamps), podpora GNSS/NMEA dat a možnost vícekanálového záznamu, což je její velmi atraktivní volbou pro aplikace, kde je potřeba přesné a rozsáhlé monitorování sériových přenosů. [5]



Obrázek 3.4: Anticyclone Anti-Log Pro [6]

¹Společnost Anticyclone Systems nabízí tři varianty tohoto záznamníku, v tomto textu je primárně popsána verze Pro, jež je svými parametry a funkcionalitou nejbližší záznamníku, které jsou předmětem této bakalářské práce.

Hlavní výhodou AntiLog Pro záznamníku je podpora vysokých provozních rychlostí, což umožňuje záznam širokého spektra záření, která spolehně s nízkou spotřebou a možností připojení baterie umožní použití jak ve vnitřních prostorech, tak i v přírodě. Systém podporuje pokročilé časové razítkování (timestamping) s rozolucí až jednu milisekundu, ulehčující synchronizaci. Záznam lze rozšířit o měření veličin, jako je teplota, vlhkost či tlak, prostřednictvím podporovaných senzorů komunikujících po sběrnici I2C, a to paralelně se záznamem až dvou datových kanálů využívajících standard RS-232. Možné je také propojení až 255 jednotek do jednoho vícekanálového záznamníku, které pak umožní komplexní monitorování více záření souasně. [5, 8]

Přesto má AntiLog Data Logger i své nevýhody. Velkým omezením je vysoká pořizovací

3.2 Výběr vhodné platformy

Již z předchozí kapitoly 2 je jasné, že bude třeba implementovat digitální záznamník na mikroadi, jelikož požadavkem na koncový systém ze strany NXP Semiconductors je přenosnost, jednoduchost na použití a nízká cena. K dispozici je široká škála platform, které lze pro tento účel využít, přičemž každá z nich nabízí různé výhody a omezení.

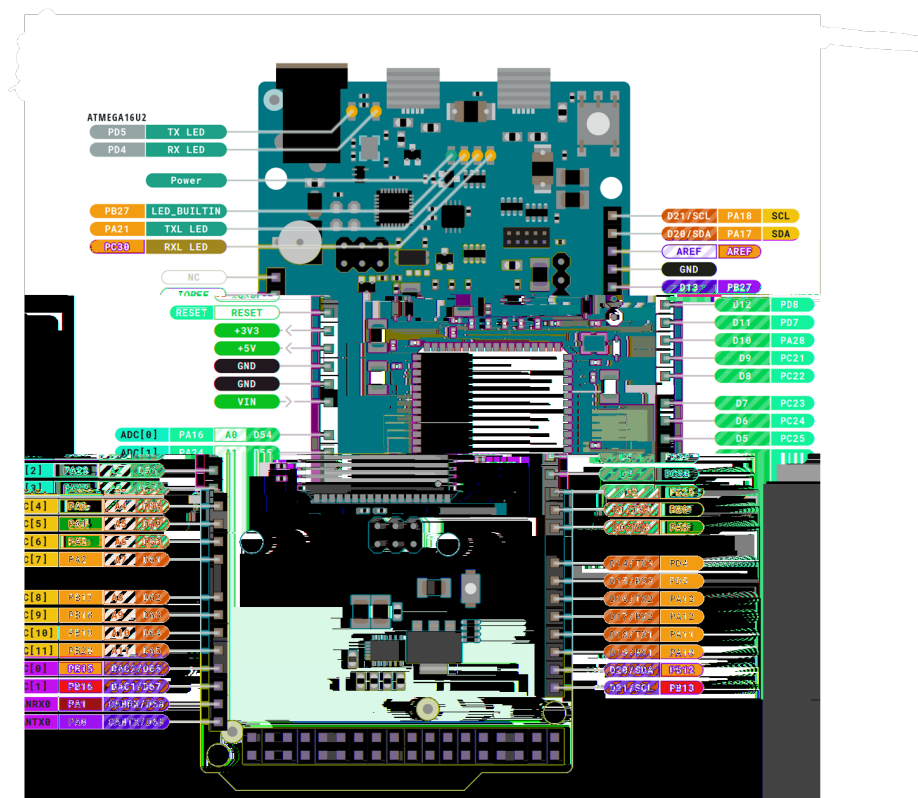
3.2.1 Arduino Due

Nejpřívětivější alternativou pro vývoj digitálního záznamníku v podobě dedikovaného zařízení je zvolit platformu Arduino, která umožňuje snadný vývoj vestavných aplikací díky intuitivnímu programovacímu prostředí a široké podpoře komunity. Programování probíhá v jazyce podobném C/C++, přičemž i programování na platformu Arduino lze využít rozsáhlou sadu knihoven a softwarových rozšíření vyvíjených výrobcí hardwaru, nezávislými vývojáři a komunitou, což značně usnadňuje vývoj a práci s různými periferiemi a senzory.

Jednou z hlavních výhod Arduina je jeho modulární a rozšiřitelný ekosystém, který umožňuje připojení různých rozšíření v podobě expanzních desek (shield) a periférií, jako jsou paměťová úložiště, komunikační moduly, senzory pro měření fyzikálních veličin a lze také využít záznamový modul Serial Data Logger od společnosti OpenLog zmíněný v kapitole 3.1.1. Arduino poskytuje vícero standardizovaných desek od těch nejjednodušších, jakým je Arduino Uno, Mega, po daleko výkonnější modely Arduino Due a Arduino Portenta, postavených již na architektuře s jádrem Cortex-M od společnosti Arm®. Velkou výhodou této platformy je povaha s otevřeným zdrojovým kódem (open source), která otevírá dvířka k velkému množství zdrojových v podobě knihoven a příkladů podporujících rychlý vývoj vestavných aplikací. K vývoji samotnému lze využít vývojové prostředí (IDE - integrated development environment) Arduino IDE, které je jednoduché na použití a umožňuje vývoj programů v podobě skic (sketches), nicméně nepodporuje debugger a nezobrazuje chyby ještě před kompilací, proto lze alternativně využít pokročilejší vývojové nástroje, jako jsou PlatformIO a Arduino CLI.

Jak již bylo zmíněno, existuje vícero modelů postavených na platformu Arduino, následující text bude v novém pouze Arduino Due a primárně typu, který je k dispozici na této vývojové desce, protože nejvíce odpovídá požadavkům na implementovaný digitální záznamník. Arduino Due je výkonná vývojová deska postavená na 32bitovém mikrokontroléru Atmel SAM3X8E, který je založen na jádře ARM Cortex-M3 se starší instrukční sadou ARMv7. Mikrokontrolér SAM3X8E běží na maximální frekvenci 84 MHz, což je podstatně více v porovnání se standardními 8bitovými modely, jakými jsou modely Uno a Mega. Pro ukládání programového kódu a dat disponuje 512 KB Flash pamětí a 96 KB SRAM. Kromě interních paměťových zdrojů lze kapacitu rozšířit připojením SD karty prostřednictvím SPI (Serial Peripheral Interface).

Po stránkách periférií typ nabízí až 4 moduly periférie USART, 2 moduly I2C v podobě IWT (Two Wire Interface). Dále typ obsahuje dva 32bitové 32kanalové 32bitové říta a interní obvod reálného času (Real-Time Circuit zkráceně RTC), které usnadní budoucí vkládání časových značek do záznamů. Důležitou otázkou je, jak by se dalo pomocí tohoto typu vyřešit otázku detekce ztráty napájecího napětí, typ totiž neobsahuje interní analogový komparátor (CMP), který by tuto otázku snadno vyřešil. Arduino Due obsahuje lineární stabilizátor napětí NXP NX1117CE33Z (LDO), který mění vstupní napětí (Vcc) z USB na 3V3, zásobující Atmel SAM3X8E. Stačilo by pouze nastavit hodnotu pro porovnávání



Obrázek 3.5: Arduino Due Pinout

na hodnotu odpovídající sou tu dropout nap tí stabilizátoru a výstupního nap tí 3,3 V, a jakmile by této hodnoty bylo dosaženo, vygenerovalo by se p erušení s nejvyšší prioritou. Bohužel tedy tato volba nep ichází v úvahu, a musela by se tato situace ešit jinými zp soby, nap íklad pomocí interního 12bitového analogov -digitálního p evodníku, který by musel být periodicky kontrolován, nebo pomocí univerzálního vstupn /výstupního pinu. Tyto volby však nejsou ideální a budou dále rozebrány v kapitole 4.

3.2.2 NXP FRDM-MCXXN947

Alternativou k vývoji digitálního záznamníku na platform Arduino je vývoj programu na klasickém mikrokontroléru pomocí C/C++ jazyk , jakou je na moderní platforma FRDM-MCXXN947 od spole nosti NXP Semiconductors. FRDM-MCXXN947 je vývojová deska spo le nosti NXP Semiconductors postavená na mikro adi i MCXXN947 a je navržena pro rychlé prototypování vestav ných systém . Srdce mikro adi e MCXXN947 je tvo eno dvoujádrovým procesorem Arm® Cortex-M33 s taktem až na 150 MHz, který p edstavuje novou generaci procesoru ARM. Cortex-M33 oproti p edchozí generaci - Cortex-M3 je postaven s nov jší instru ní sadou ARMv8-M, nabízí v tší míru bezpe nosti v podob Trust-Zone, jež umož ũje rozd lení pam ového prostoru na zabezpe enou (Secure World) a nezabezpe enou oblast (Non-Secure World). Dále jádro poskytuje možnost zvýšení výkonu pomocí integrovaného rozší ení DSP (Digital Signal Processor), které umož ũje efektivn jší zpracování digitálních signál ũ a numerických výpo t ũ.

NXP MCXN947

Z hlediska paměťových zdrojů nabízí MCXN947 512 KB paměti SRAM s podporou detekce a opravy chyb (Error Correction Code i zkrácen ECC). Pro zvýšení výkonu systému je iip vybaven n kolika typy cache. Mikrokontrolér dále poskytuje 2 MB integrované flash paměti a pro programy s vyššími požadavky na úložiště je možné paměť rozšířit o dalších 8 MB prostřednictvím externí paměti typu flash připojené přes rozhraní Quad-SPI (QSPI).

Pro implementaci různých aplikací a variabilitu systému postavených na tomto iipu, MCXN947 nabízí širokou škálu periférií od základních asova v podobě CTIMER a CSTIMER, přes komunikační periférii LP_FLEXCOMM, jež může být nastavena pro komunikační rozhraní I2C, UART i SPI, nechybí ani podpora pro Ethernet a vysokorychlostní přenosy pomocí standardu USB 2.0 s Universal Serial Bus Full Speed Host and Device Controller (USBFS), který podporuje protokol OTG. Pro práci s paměťovými kartami je do iipu integrován Ultra Secured Digital Host Controller (uSDHC), který zprostředkovává komunikaci se SD, SDIO a MMC kartami. Ještě iíct, že to má 16bit ADC a CMP.

Všechny periférie a části mikrokontroleru jsou znázorněny na dalším obrázku. Jak je vidno, lze tento mikrokontroler využít na spoustu různých aplikací, to podporuje i velikost paměti, díky které lze zvolit i různé možnosti vývoje, jako je Bare-Metal i s operačním systémem.

3.2.3 Linux based - Raspberry

3.3 Přístupy k ovládaní úložišť

Obecný popis, proč je potřeba externí úložiště, že by se data mohla ukládat i v RAM paměti, ale že by tam moc dlouho nevydržela,

3.3.1 SDIO

3.3.2 SPI

3.3.3 Quad-SPI flash

3.4 Možnosti správy dat - souborové systémy

Obecný popis, souborový systém je zodpovědný za organizaci, správu a přístup k datům na zvoleném úložném médiu.

3.4.1 FATFS

3.4.2 Chan FATFD

3.4.3 LittleFS

3.5 Výběr řízení přístupu k získaným datům

3.5.1 USB Mass Storage

3.5.2 Media Transfer Protocol

3.5.3 Human Interface Device

3.6 Výběr zdroje času

3.6.1 Obvod reálného času

3.6.2 Interní časovač

3.6.3 Bezdrátová komunikace (GPS/NTP)

3.7 Výběr přístupu řízení běhu aplikace

Srovnání obecně bare-metal a RTOS.

3.7.1 Bare-Metal

3.7.2 RTOS

FreeRTOS

Konkretní výhody a nevýhody FreeRTOS

ZephyrRTOS

Konkretní výhody a nevýhody ZephyrRTOS

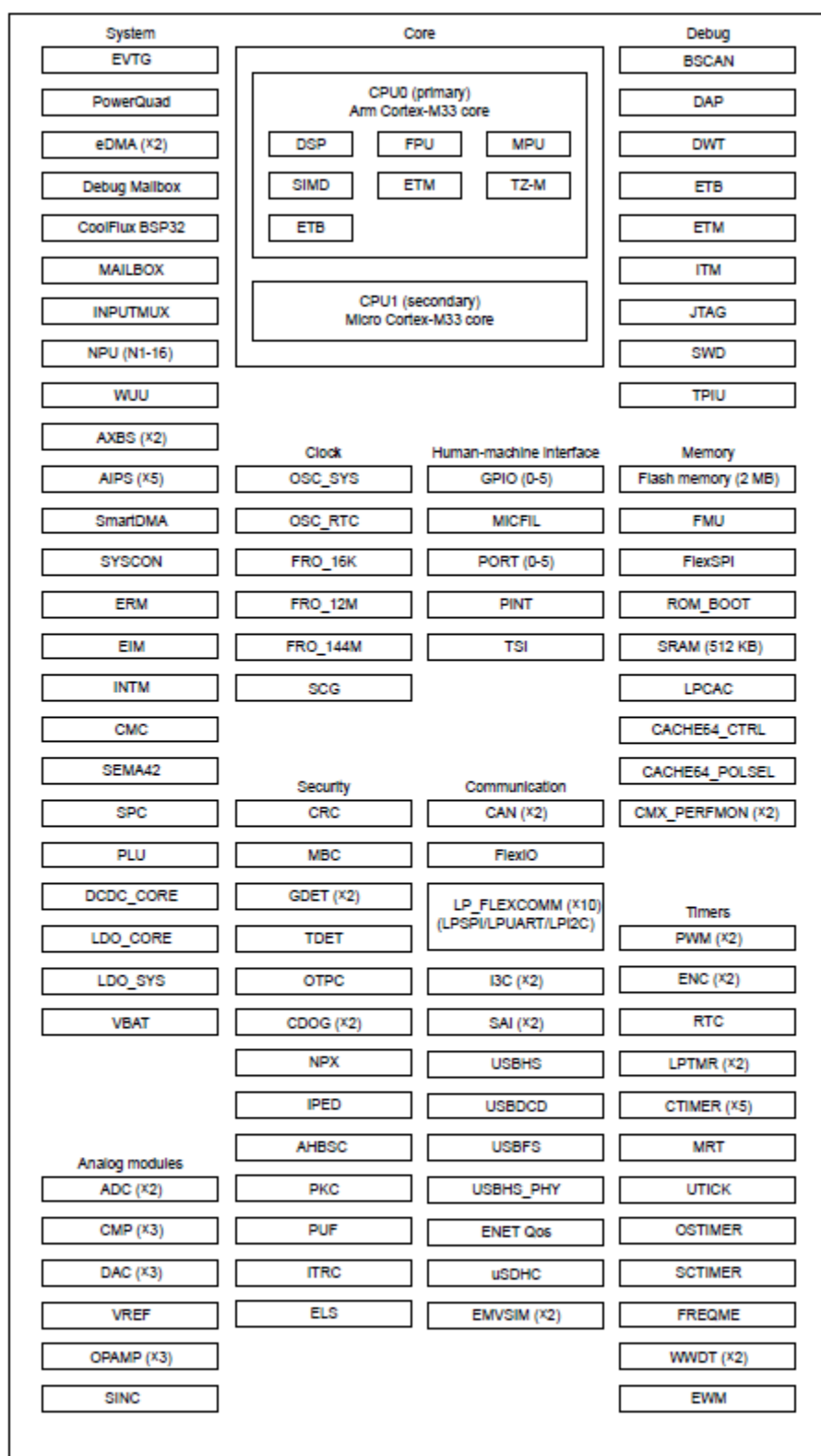
3.8 Architektura systému digitálního záznamníku

Popis architektury na základě vybraných komponent. Popis blokového diagramu.

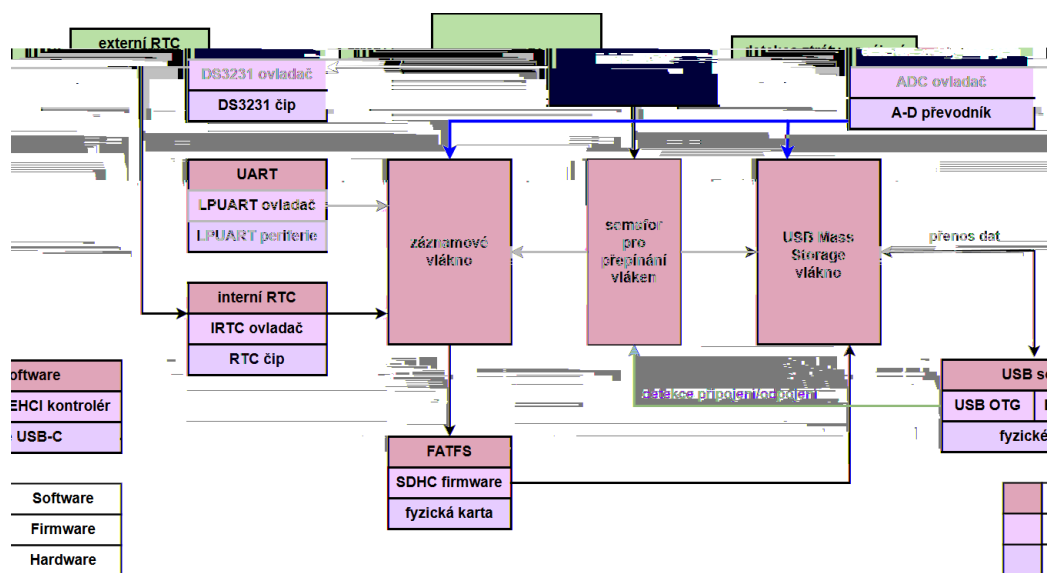
3.9 Volitelné rozšíření

3.9.1 Měření teploty

3.9.2 Řešení problému synchronizace času



Obrázek 3.6: Keeylog AirDrive Serial Logger s přístupem k datům přes webové rozhraní [2, 1]



Obrázek 3.7: Výsledná architektura digitálního záznamníku

Kapitola 4

Realizace hardwaru

Popis co všechno je již na platformě FRDM MCXN947, z toho ti vyplyne co všechno bude ještě muset nabízet expanzní deska.

4.1 Základová deska

4.2 Expanzní deska

$$V_{in\ min} = V_{out} + V_{do}$$

kde V_{out} je 3,3 V a V_{do} je dropout napětí daného LDO regulátoru.

4.3 Mechanická část

Jak jsem měl spotřebu, jak jsem spočítal hodnoty kondenzátor

Kapitola 5

Softwárová implementace

5.1 Záznamové vlákno

5.2 USB Mass Storage vlákno

5.3 Signalizace stavu systému

Kapitola 6

Testování systému

Obecně proč je potřeba testovat, jaké jsou možnosti testování a validace vestavených systémů

6.1 Testování a validace

6.1.1 Funkcionální testování

Popis skriptů pro automatické testování, popis výsledků, atd, ...

6.1.2 Kontrola bezpečnosti kódu

MISRA

6.2 Limitace systému

6.3 Možná rozšíření záznamníku

Kapitola 7

Záv r

Literatura

- [1] AirDrive RS-232 Recorder online. Airdrivewifi. Dostupné z: <https://www.airdrivewifi.com/?page=AD065SGL0GGB>. [cit. 2025-03-01].
- [2] AirDrive Serial Logger online. Keelog. Dostupné z: <https://www.keelog.com/serial-logger/>. [cit. 2025-03-01].
- [3] AirDrive Serial Logger Pro online. Keelog. Dostupné z: <https://www.keelog.com/airdrive-serial-logger-max-premium-rs232-logger-and-data-recorder-with-wifi-flash-drive-email-and-live-data-transfer/>. [cit. 2025-03-01].
- [4] AirDrive Serial Logger Pro online. Keelog. Dostupné z: <https://www.keelog.com/airdrive-serial-logger-pro-rs232-logger-and-data-recorder-with-wifi-flash-email-and-live-data-transfer/>. [cit. 2025-03-01].
- [5] AntiLog and AntiLogPro - High performance RS232 data loggers online. Anticyclone Systems. Dostupné z: https://www.anticyclone-systems.co.uk/product_antilog.php. [cit. 2025-03-01].
- [6] AntiLogPro Boxed online. Anticyclone Systems. Dostupné z: <https://martel.ec.anticyclone-systems.co.uk/product/antilogpro-boxed/>. [cit. 2025-03-01].
- [7] How to Use SparkFun OpenLog: Examples, Pinouts, and Specs online. Circuit Designer. Dostupné z: <https://docs.circuitdesigner.com/component/fc2f1903-3180-e08a-f700-1c8c6515fb8d/sparkfun-openlog>. [cit. 2025-02-27].
- [8] Logging temperature, humidity and pressure online. Anticyclone Systems. Dostupné z: https://www.anticyclone-systems.co.uk/product_antilog_env.php. [cit. 2025-03-01].
- [9] OpenLog Hookup Guide online. Sparkfun. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/openlog-hookup-guide/all>. [cit. 2025-02-27].
- [10] The Origin and History of Chart Recorders online. Recorder Charts and Pens, 2023. Dostupné z: <https://recorderchartsandpens.com/blog/the-origin-and-history-of-chart-recorders/?srsltid=AfmB0ooMqIXNP8LYI118itclRzgEKo1N0c6G0eVfD3ckKHGC0dteTkGe>. [cit. 2025-02-14].
- [11] MQTT vs CoAP: Comparing Protocols for IoT Connectivity online. EMQ, duben 2024. Dostupné z: <https://www.emqx.com/en/blog/mqtt-vs-coap>. [cit. 2025-02-28].

- [12] Bigelow, S. J. a Jones, M. NAND flash memory online. TechTarget, kv ten 2023. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/searchstorage/definition/NAND-flash-memory>. [cit. 2025-02-17].
- [13] Bristol, W. H. Pressure Indicator and Recorder. 1888. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US389635A/en>. US Patent 389635, Bristol Manufacturing Company, 18. září 1888.
- [14] Chandrasekaran, S. Implementing Circular Buffer in C online. Embed Journal. Dostupné z: <https://embedjournal.com/implementing-circular-buffer-embedded-c/>. [cit. 2025-02-18].
- [15] Chang, S.-K. Physical Structures online. University of Pittsburgh - Department of Computer Science. Dostupné z: <https://people.cs.pitt.edu/~chang/156/08struct.html>. [cit. 2025-02-17].
- [16] Clifford, J. MQTT vs Kafka: An IoT Advocate's Perspective (Part 3 - A Match Made in Heaven) online. Influxdata, červen 2022. Dostupné z: <https://www.influxdata.com/blog/mqtt-vs-kafka-iot-advocate%E2%80%99s-perspective-part-3/>. [cit. 2025-02-21].
- [17] Clinton, D. Linux in Action. 1. vyd. Manning, 2018. 229–251 s. ISBN 9781617294938.
- [18] Florián, J. T. Transformace simulátor z analogové do digitální podoby s dle rozvoje digitální formy a využití virtuální reality pro aplikace simulací v odvětví bezpečnosti složek. Brno, CZ, 2018. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně, Filozofická fakulta. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/p1bg7/>.
- [19] Grzesik, P. a Mrozek, D. Comparative Analysis of Time Series Databases in the Context of Edge Computing for Low Power Sensor Networks. In: Krzhizhanovskaya, V. V.; Závodszy, G.; Lees, M. H.; Dongarra, J. J.; Siout, P. M. A. et al., ed. Computational Science – ICCS 2020. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 371–383. ISBN 978-3-030-50426-7. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-50426-7_28.
- [20] Haratipour, N.; Chang, S.-C.; Shivaraman, S.; Neumann, C.; Liao, Y.-C. et al. Hafnia-Based FeRAM: A Path Toward Ultra-High Density for Next-Generation High-Speed Embedded Memory. In: 2022 International Electron Devices Meeting (IEDM). 2022, s. 6.7.1–6.7.4.
- [21] Hošek, J. Future-Proof MWCT Wireless Charging MCUs online. NXP Semiconductors, prosinec 2024. Dostupné z: <https://www.nxp.com/company/about-nxp/smarter-world-blog/BL-FUTURE-PROOF-MWCT-WIRELESS-CHARGING-MCUS>. [cit. 2025-02-09].
- [22] Hung, P. a Vuong, V. D. Analog Signal and Digital Signal Processing in Telecommunication System. Journal La Multiapp online, Leden 2021, sv. 1, s. 6–11. Dostupné z: <https://doi.org/10.37899/journallamultiapp.v1i6.277>.

- [23] Kolhe, A. What is RingBuffer? online. Medium. Dostupné z: <https://medium.com/@kolheankita15/what-is-ringbuffer-7b6b808f33e0>. [cit. 2025-02-18].
- [24] Kumar, D. A Study about Non-Volatile Memories. Preprints. Preprints, July 2016. Dostupné z: <https://doi.org/10.20944/preprints201607.0093.v1>.
- [25] Mahzan, N.; Omar, A.; Mohammad Noor, S. a Rodzi, Z. Design of data logger with multiple SD cards. Conference: 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), Listopad 2013, s. 175–180. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/271547689_Design_of_data_logger_with_multiple_SD_cards.
- [26] Manocha, H. Genesis - The Birth of a Windows Process (Part 1) online. FourCore, ervenec 2022. Dostupné z: <https://fourcore.io/blogs/how-a-windows-process-is-created-part-1>. [cit. 2025-02-19].
- [27] Mateski; Stojan; Anastasovski a Zoran. Digital sound recorder with ARM microcontroller and SD card. Telecommunications Forum (TELFOR), 2012, s. 1741–1743. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6419564>.
- [28] Meena, J.; Sze, S.; Chand, U. a Tseng, T.-Y. Overview of Emerging Non-volatile Memory Technologies. Nanoscale Research Letters, Září 2014, sv. 9, s. 1–33. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265727614_Overview_of_Emerging-Non-volatile_Memory_Technologies.
- [29] Merabtane, B. a Benabadji, N. Design and Implementation of a Multi Connectivity Datalogger using SD Card Storage for Photovoltaic System Monitoring. 2023 2nd International Conference on Electronics, Energy and Measurement (IC2EM), 2023, sv. 1, s. 1–5. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10419399>.
- [30] Murray, T. M. The design, development, and implementation of a microprocessor-based ECG analysis system. Behavior Research Methods Instrumentation, 1982, sv. 14, s. 281–289. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.3758/BF03202167>.
- [31] Peterson, D. A. Program pacer online. 1980. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US4333084>. [cit. 2025-02-14].
- [32] Petrungaro, D. Data Structure - Circular buffer online. damianopetrungaro. Dostupné z: <https://www.damianopetrungaro.com/posts/data-structure-circular-buffer/>. [cit. 2025-02-18].
- [33] Randell, B. The History of Digital Computers. "l'Histoire Générale des Techniques online. edice 1. Springer Verlag, 1973, Únor 1973, sv. 3, s. 57–69. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-96145-8>. [cit. 2025-02-16].
- [34] Redon, M. Strategies for Choosing the Appropriate Microcontroller when Developing Ultra Low Power Systems online. embedded, bizen 2012. Dostupné z:

<https://www.embedded.com/understanding-mcu-sleep-modes-and-energy-savings/>.
[cit. 2025-02-18].

- [35] Redon, M. Strategies for Choosing the Appropriate Microcontroller when Developing Ultra Low Power Systems. Analog Dialogue. Analog Devices, Prosinec 2017, sv. 51, . 4. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/strategies-for-choosing-the-appropriate-microcontroller-when-developing-ultra-low-power-systems.html>.
- [36] Rinaldi, J. Local Vs. Cloud: Are You Going About Data Logging All Wrong? online. Real Time Automation, íjen 2020. Dostupné z: <https://www.rtautomation.com/local-vs-cloud-are-you-going-about-data-logging-all-wrong/?srsltid=AfmBOoqrDjIqC47hR-VZagW2sKvRgDJkqru8xxEqag66zC36aXIztNvj>.
[cit. 2025-02-20].
- [37] Sammons, J. The Basics of Digital Forensics. 1. vyd. Syngress Publishing, 2012. ISBN 978-1-59749-661-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9781597496612/the-basics-of-digital-forensics#book-info>.
- [38] Sheeparamatti, R.; Sheeparamatti, B.; Bharamagoudar, M. a Ambali, N. Simulink Model for Double Buffering. In: IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. 2006, s. 4593–4597.
- [39] Shweta. Optimizing IoT Data Storage: Experience with PostgreSQL and TimescaleDB online. Medium. Dostupné z: <https://medium.com/@paigude.shweta/optimizing-iot-data-storage-experience-with-postgresql-and-timescaledb-e4dc3dcc7ae7>. [cit. 2025-02-21].
- [40] Tsai, Y.-L.; Hsieh, J. wei a Kuo, T.-W. Configurable NAND Flash Translation Layer. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. ervenec 2006, sv. 2006, s. 8 pp. ISBN 0-7695-2553-9.
- [41] Vancea, C. M. a Dobrota, V. SNMP Agent for WLAN networks online. Researchgate, leden 2015. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267421729_SNMP_Agent_for_WLAN_networks/citations. [cit. 2025-02-23].
- [42] Waehner, K. Internet of Things (IoT) and Event Streaming at Scale with Apache Kafka and MQTT online. Confluent, íjen 2019. Dostupné z: <https://www.confluent.io/blog/iot-with-kafka-connect-mqtt-and-rest-proxy/>. [cit. 2025-02-21].
- [43] Winpcap.org. WinPcap internals online. Dostupné z: https://www.winpcap.org/docs/docs_40_2/html/group__internals.html. [cit. 2025-02-23].