

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 FAI-
LURE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ DOLÁK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÁCLAV ŠÍMEK

BRNO 2025

Abstrakt

Tato závěrečná práce se zabývá návrhem a vývojem digitálního záznamníku s ochranou proti ztrátě dat při výpadku napájení. Hlavní pozornost je věnována výběru vhodných komponent, návrhu a implementaci aplikačního softwaru záznamníku, konstrukci expanzní desky s potřebnými součástkami a testování výsledného zařízení. Vyvinutý záznamník bude využíván v Qi certifikačních laboratořích pro záznam dat z bezdrátových nabíječek podporovaných společnostmi NXP Semiconductors. Díky své univerzálnosti však může být po úpravě použit i pro záznam dalších typů dat v různých 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.

Klíčová slova

vestavné zařízení, 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 paměťové médium s prevencí ztráty dat při výpadku napájení*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Václav Símek

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
13. března 2025

Podpis

Obsah

Seznam zkratk	5
1 Úvod	7
2 Záznam dat	8
2.1 Pořátky záznamu dat	8
2.2 Záznam dat v počítačích elektrotechniky	9
2.3 Digitální zpracování dat	10
2.3.1 Princip digitálního záznamu dat	10
2.3.2 Digitální záznamník	11
2.3.3 Digitální záznam v počítačovém systému	12
2.3.4 Digitální záznam na platformě mikroadi e	14
2.4 Koncepty využívané ke zpracování dat digitálních záznamníků	15
2.4.1 Vícenásobná vyrovnávací paměť (multiple-buffering)	15
2.4.2 Dávkové zpracování (batch processing)	16
2.4.3 Církulární buěr	17
2.4.4 Nízko-energetické režimy (low-power modes)	17
2.5 Způsoby zápisu dat	19
2.5.1 Přímý zápis na permanentní uložíř	19
2.5.2 Zápis na permanentní uložíř přes mezivrstvu s FRAM pamětí	20
2.5.3 Zápis na vzdálené uložíř	21
3 Návrh digitálního záznamníku	24
3.1 Existujících řešení digitálních záznamníku	24
3.1.1 OpenLog Serial Data Logger	24
3.1.2 Keeilog AirDrive Serial Logger	26
3.1.3 Anticyclone Systems AntiLog Data Logger Pro	27
3.1.4 Shrnutí představených řešení	28
3.2 Výběr vhodné platformy	29
3.2.1 Arduino Due	29
3.2.2 NXP FRDM-MCXM947	30
3.2.3 Raspberry PI - mikrokontrolér postaven na Linuxu	32
3.2.4 Závěr výběru platformy	33
3.3 Přístupy k ovládaní uložíř	34
3.3.1 SDIO	34
3.3.2 SPI	34
3.3.3 Quad-SPI flash	34
3.4 Možnosti správy dat - souborové systémy	34

3.4.1	FATFS	35
3.4.2	LittleFS	36
3.4.3	Chan FATFS	37
3.5	Výběr řízení přístupu k získaným datům	37
3.5.1	USB Mass Storage	38
3.5.2	Media Transfer Protocol	39
3.5.3	Human Interface Device	40
3.6	Výběr zdroje času	41
3.6.1	Interní časovač	41
3.6.2	Obvod reálného času	42
3.6.3	Bezdrátová komunikace (GPS/NTP)	42
3.7	Výběr přístupu řízení bhu aplikace	42
3.7.1	Bare-Metal	42
3.7.2	RTOS	42
3.8	Architektura systému digitálního záznamníku	42
3.9	Volitelné rozšíření	42
3.9.1	Měření teploty	42
3.9.2	Řešení problému synchronizace času	42
4	Realizace hardwaru	43
4.1	Základová deska	43
4.2	Expanzní deska	43
4.3	Mechanická část	44
5	Softwarová implementace	45
5.1	Záznamové vlákno	45
5.2	USB Mass Storage vlákno	45
5.3	Signalizace stavu systému	45
6	Testování systému	46
6.1	Testování a validace	46
6.1.1	Funkcionální testování	46
6.1.2	Kontrola bezpečnosti kódu	46
6.2	Limitace systému	46
6.3	Možná rozšíření záznamníku	46
7	Závěr	47
	Literatura	48

Seznam obrázk

2.1	První skutečný grafický záznamník (Chart Recorder) patentovaný Williamem Henrym Bristolem v roce 1888 [29]	8
2.2	Ukázka zařízení patřící do skupiny analogových záznamníků - polygraf [48]	9
2.3	Průběh analogového a digitálního signálu	10
2.4	Obecné schéma digitálního záznamníku	11
2.5	Schéma pokročilého digitálního záznamníku síťové komunikace - Wireshark [59, 61]	13
2.6	Ukázka architektury digitálního záznamníku pro měření teploty	14
2.7	Schéma principu práce s vícenásobnou vyrovnávací pamětí - náhodný stav	15
2.8	Schéma principu práce s vícenásobnou vyrovnávací pamětí - pevné ukazatel	16
2.9	Organizace bloku nevolatilní paměti [57]	17
2.10	Cirkulární vyrovnávací paměť	18
2.11	Graf znázorňující dynamiku spotřeby mikrokontroléru v průběhu času při využití aktivního a nízkoeenergetického režimu	18
2.12	Přímý zápis na permanentní uložení s SDHC kartou za pomoci čtyřpinové datové sběrnice	19
2.13	Struktura 1T-1C feroelektrické RAM paměti (FeRAM) [45]	20
2.14	Struktura feroelektrické RAM paměti (FeRAM) [45]	21
2.15	Schéma pokročilého digitálního záznamníku s cloudovým uložením postavený na streamingové platformě Kafka [60, 32]	22
3.1	Digitální záznamník SparkFun Openlog [9]	24
3.2	Sledovací zařízení GPS se záznamem dat [9]	25
3.3	Keeylog AirDrive Serial Logger s přístupem k datům přes webové rozhraní [3, 2]	26
3.4	Anticyclone Anti-Log Pro [7]	27
3.5	Arduino Due vývody (pinout) [15]	30
3.6	Vývojová deska NXP FRDM-MCX947 [8]	31
3.7	Raspberry Pi Zero 2W vývody (pinout) [15]	33
3.8	Oblasti souborového systému FAT [39]	35
3.9	Souborový systém s alokací tabulkou souborů [39]	36
3.10	Průběh zápisu do souboru spravovaným žurnálovacím souborovým systémem [58]	36
3.11	Stavový diagram USB Mass Storage protokolu [19]	38
3.12	Stavový diagram Media Transfer Protocol [19]	39
3.13	HID komunikace [16]	40
3.14	Blokový diagram sběrnice	41

3.15	Výsledná architektura digitálního záznamníku	42
4.1	Obvod pro testování kondenzátoru	43
5.1	Vzorová struktura aplikace využívající NXP USB Stack [19]	45

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. [37]

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

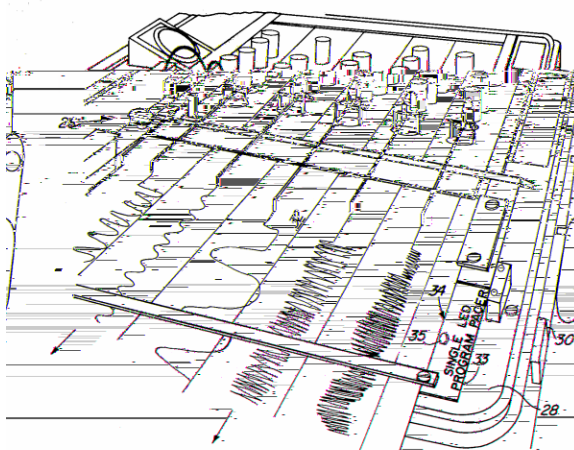
Záznam dat

2.1 Pořátky záznamu dat

Lidstvo již od svých počátků bylo potřebu zaznamenávat data, neboť lovci 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 [48]

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 pásky musí být velice často měněny za nové, ještě nepopsané, jelikož výsledné záznamy by se, jinak staly značně nepřehledné, pokud by byly popsány vícekrát. [22]

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. [38]

Další limitací těchto přístrojů bylo ruční vyhodnocování dat, což bylo mnohdy časově zdoluhavé 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. [50, 34]

¹Řešení jsou současně mnohdy optimalizovaná pro záznam konkrétního systému.

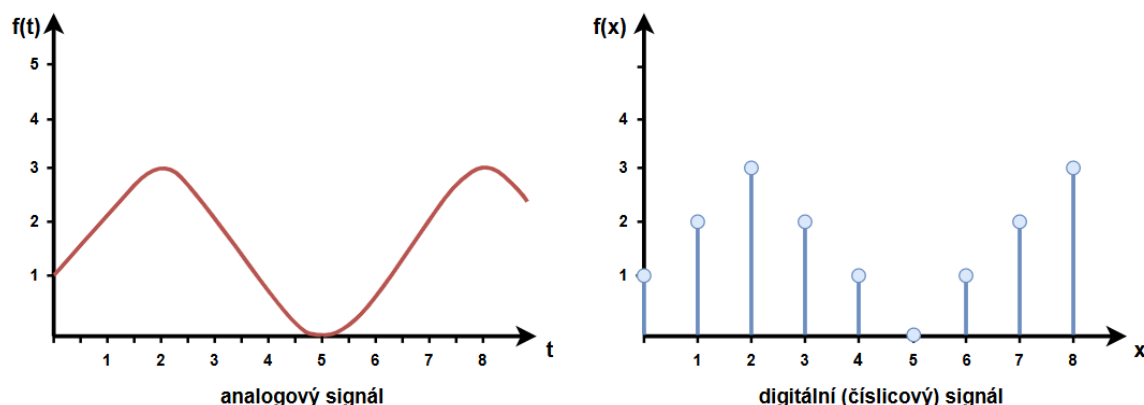
2.3 Digitální zpracování dat

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 původní signály v digitální podobě. Data tedy musí být generována číslicovými zdroji, nebo musí být převedena do digitálního tvaru pomocí komponenty k tomu určené – digitálno-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 složeného z vzorkování, kvantizace a kódování.

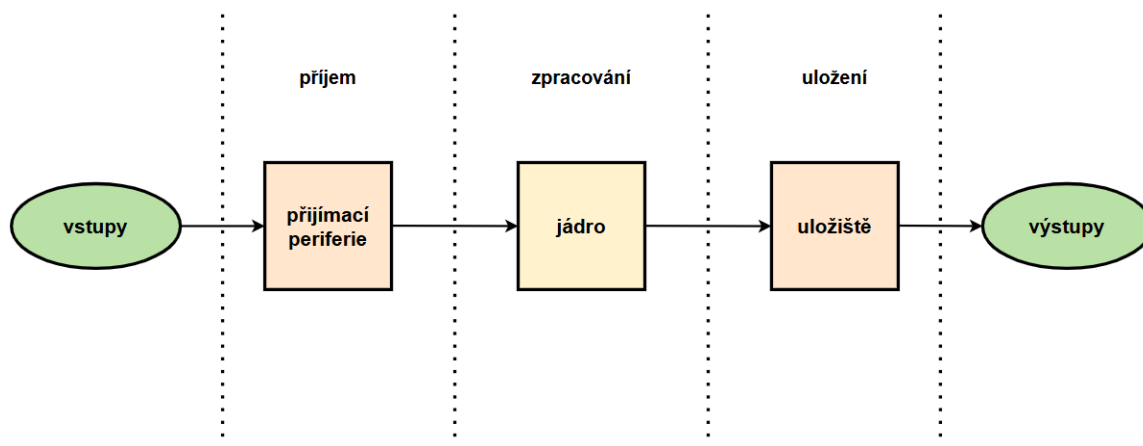
Digitální záznam poskytuje mnoho výhod oproti svému analogovému protějšku. Primárně je to jeho flexibilita a efektivita při zpracování, ukládání a přenosu dat. Digitální data lze snadno kopírovat, bez ztrát přenášet a ukládat bez degradace kvality, což je pro záznamové systémy zásadní. Díky digitálnímu 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 určený 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). [42, 44, 46]

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 [44]

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 přepočet hodnoty z analogovo-digitálního převodníku na teplotu podle kalibrační křivky senzoru, přes filtrování šumu a doplnění časových značek k naměřeným vzorkům, až po pokročilejší analýzy dat - například zpracování signálu pro EKG měření. [47]



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. [43]

ridní p ístup. Nashromžd ná data mohou být nejprve ukládána do interní volatilní pam í 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 ídat 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 í s náhodným p ístupem, například další typy pam í. [53]

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 í 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 í zvolení p enosu po sériové lince je naopak vhodn jší a efektivn jší využít op í ten 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. [56]

Zp sob , jak lze digitální záznamník sestavit, existuje mnoho, p í 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

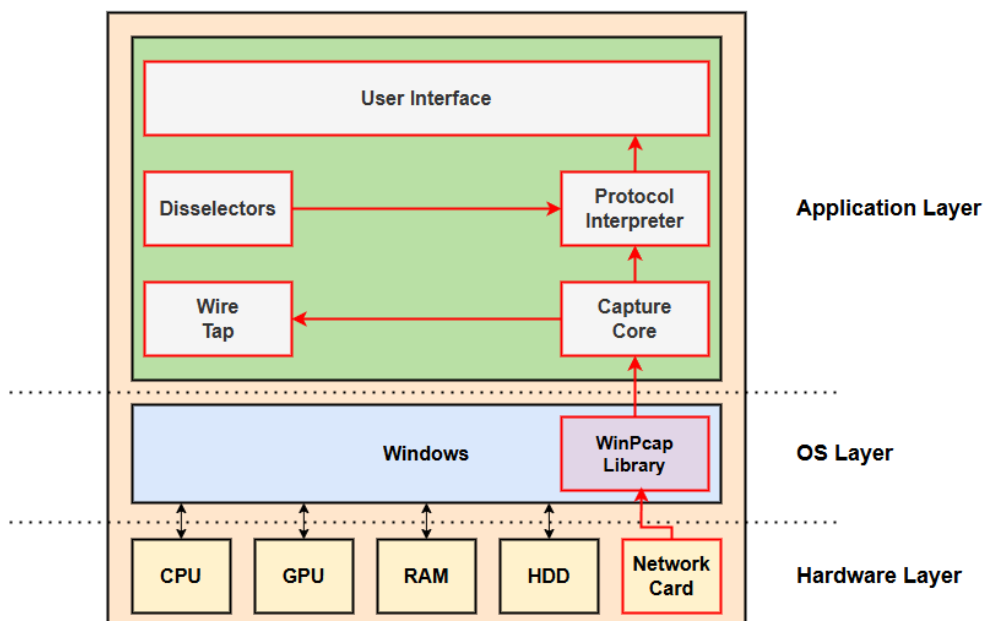
Digitální záznamníky lze implementovat na po íta ových systémech, jako jsou osobní po íta e i servery, kde p edstavují softwarová ešení, sloužící ke sb ru, zpracování a potenciální archivaci dat. Tyto systémy obvykle také vycházejí ze struktury obecného íslicového záznamníku, popsaného v kapitole 2.3.2.

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 í již zmi ovaných kernel API). Procesor, který tato data p íjímá, tak je obvykle nejen zpracovává, ale ásto i ur ítým 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. [33]

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 í 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.

Takovýmto záznamníkem i rovnou monitorovacím systémem může být program Wireshark, sloužící k záznamu síťové komunikace na síťových rozhraních počítačového systému. Wireshark pro záznam síťových rámců neboli paketů využívá vícevrstvou architekturu, data pocházejí přes síťovou kartu, čímž to je hardwarová vrstva, pakety jsou následně zachytávány nebo dokonce i filtrovány pomocí WinPcap knihovny (Windows Packet Capture). Následně jdou přijatá data paketů zpracovávána, identifikována (přiřazena konkrétnímu protokolu) a vizualizována na aplikační vrstvě. [59, 61]



Obrázek 2.5: Schéma pokročilého digitálního záznamníku síťové komunikace - Wireshark [59, 61]

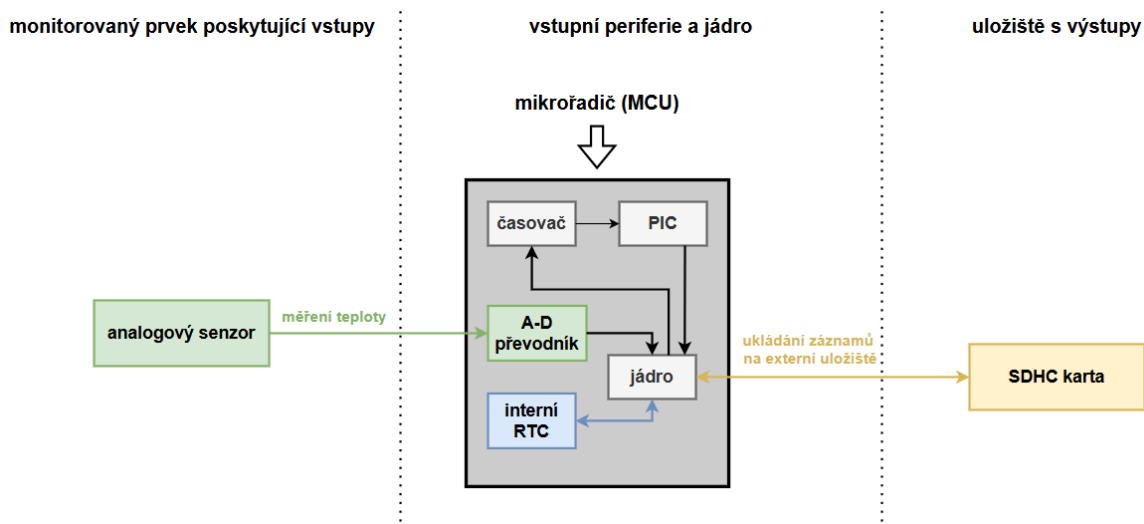
Je nutné si uvědomit, že tyto záznamníky jsou především implementovány na strojích s relativně výkonnými hardwarovými prostředky, což je činí kolikrát až překvalifikované pro pouhé monitorování, proto se předstávají spíše roli doplňku (tj. hlavním úkolem stroje není monitorování) například monitorování zmíněného síťového provozu, monitorování procesů běžících na daném stroji, pokročilé sériové záznamníky a terminály, i záznamníky speciálních rozhraní, jako je například HID (Human Interface Device). Běžících na daném stroji, ... Proto každý záznamník vyžaduje plnohodnotný počítač s dostatečným výpočetním výkonem, úložným prostorem a případným připojením k síti, takže je vysoká pořizovací cena a také cena provozních nákladů, jako je spotřeba elektrické energie.

Před implementací i použitím takového záznamníku je tedy dobré si promyslet, zda účel záznamníku, jestli budeme zaznamenávat stav na výpočetně silnějším zařízením, na které se vleze i implementovaný záznamník. Alternativou je použití záznamníku v podobě dedikovaného zařízení, jejichž hardware je navržen tak, aby výkon odpovídal konkrétním potřebám aplikace.

2.3.4 Digitální záznam na platformě mikroadi e

Digitální záznamníky nemusí být nutně implementovány na výkonných počítačových systémech, ale mohou být také realizovány jako vestavné systémy postavené na mikroadiích (MCU). Na rozdíl od svých protějšků na PC jsou však zaměřeny na oblasti, kde je potřeba určitým způsobem sbírat a ukládat data s minimálními nároky na spotřebu energie a výpočetní výkon. Proto své uplatnění nacházejí v průmyslové automatizaci, IoT aplikacích, zdravotnických zařízeních a dalších oblastech.

I tyto záznamníky také obvykle obsahují základní komponenty obecného záznamníku představeného v kapitole 2.3.2, které je možno libovolně rozšířit. Data vstupují do záznamníku prostřednictvím přijímacích periférií, která mohou pocházet z různých senzorů a už analogových i digitálních (tedy teplotních čidel, akcelerometrů nebo proudových snímačů a dalších) nebo z jiných pozorovaných zařízení. Vstupní periférie záznamníku mohou tvořit klasické komunikační rozhraní, jakými jsou UART, SPI, I2C i I3C, ale také bezdrátová rozhraní v podobě Wi-Fi, Bluetooth nebo analogovo-digitální převodník.³ Tyto vstupní periférie mohou být přímo integrovány v mikroadii – například již uvedený analogovo-digitální převodník, nebo mohou být připojeny externě ve formě samostatných modulů, které komunikují s MCU prostřednictvím již standardních rozhraní.



Obrázek 2.6: Ukázka architektury digitálního záznamníku pro měření teploty

Vstupní data jsou následně zpracována jádrem mikroadi e. To může provádět základní operace, jako je převod číslicové hodnoty z ADC na teplotu, filtrování signálu, doplňování časových značek, nebo provádět lehce obtížnější operace, jako je výpočet tepu v případě měření srdečních aktivit a další.

Následně jsou data ukládána do uložení. Obvykle se používají externí nevolatilní uložení, která zaručí perzistenci dat i po vypnutí záznamníku. Standardně se dnes používají různé typy SD karet, které poskytují relativně jednoduché připojení přes rozhraní SPI nebo SDIO. Široce využívané jsou také paměti FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) které kombinují výhody rychlého zápisu (pohybujícího se kolem 1–10 MB/s) a nízké spotřeby energie. Možné je také upravit systém se vzdáleným uložením v podobě databáze i cloudového systému.

³Vstupních komunikačních je vícero, zde jsou zmíněna jen ty nejzákladnější

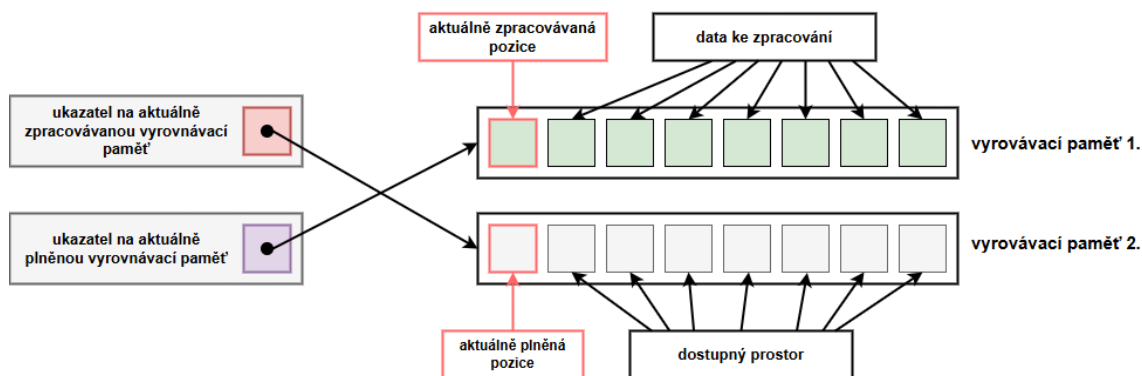
2.4 Koncepty využívané ke zpracování dat digitálních záznamníků

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. [55]

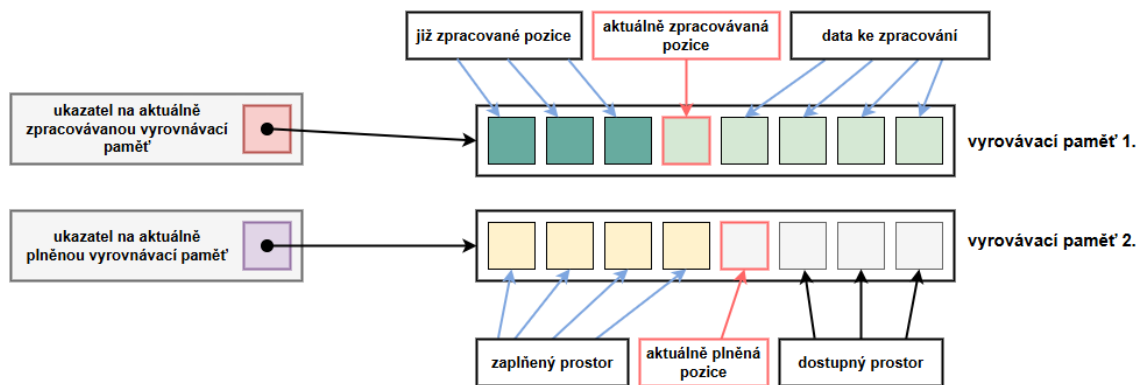
Obdobný mechanismus se využívá i v digitálních záznamnících, kde slouží k zajištění kontinuálního sběru dat bez výpadků. Zatímco jeden buffer přijímá nová data ze vstupní periferie (například analogovo-digitálního převodníku či jiných vstupů), druhý buffer je současně zpracováván nebo ukládán na úložné 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 buferů. Jakmile je sbíraný bufer (Back Buffer) naplněn, ukazatele se prohodí – back bufer se stane zpracovávaným buferem (Front Buffer) a převodní front bufer 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

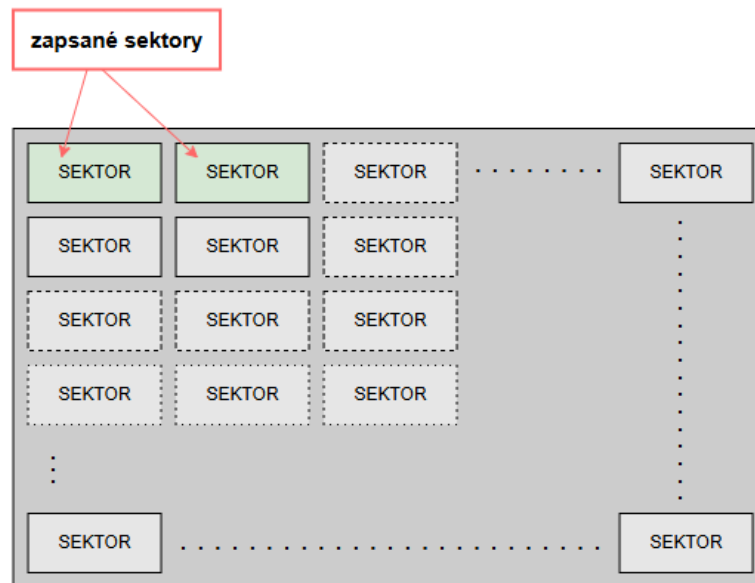
minimalizuje latence zpracování a souasn se snižuje riziko p ete ení pam ového prostoru. [31]

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. [54]

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 . [28, 41]

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 [57]

2.4.3 Církulární buěr

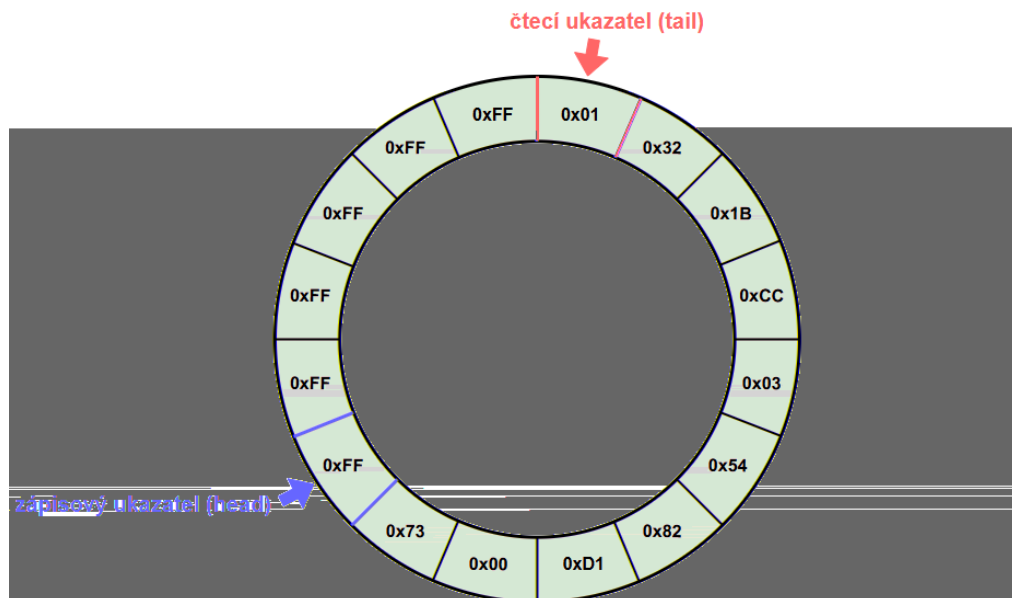
Církulární buěr (circular buěr), někdy také označovaný jako kruhový nebo cylindrický buěr, je datová struktura, která funguje na principu FIFO fronty (First-In, First-Out) a považuje tuto paměť za kruhovou. Tento přístup je často využíván k řešení problému jednoho producenta a konzumenta (producer-consumer 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. [30]

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. [30, 40]

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. [49]

2.4.4 Nízko-energetické režimy (low-power modes)

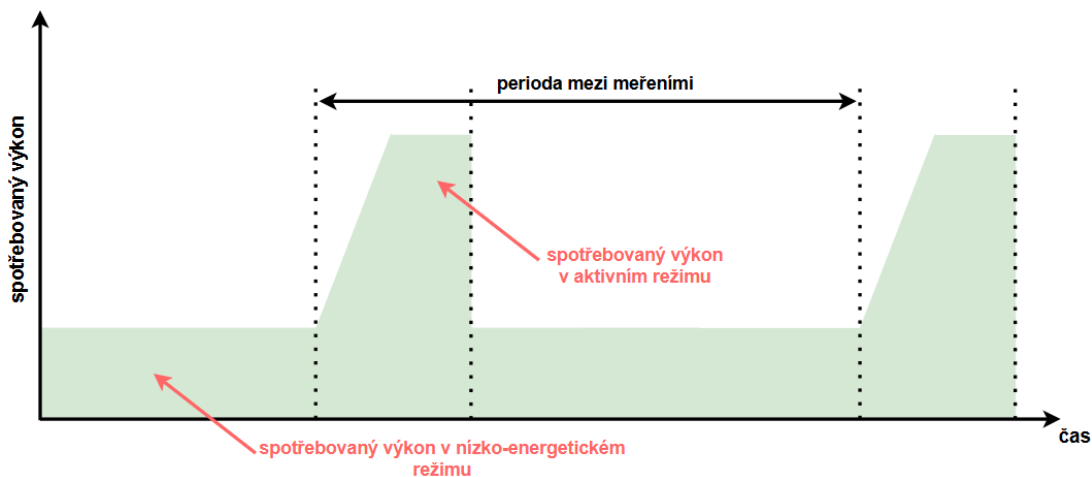
Energetická efektivita je jedním z klíčových parametrů obecně vestavných zařízení, tedy i digitálních záznamníků implementovaných na platformě MCU, zejména pokud jsou napájeny z baterií či jiných omezených zdrojů energie (například energy harvesting). Minimalizace spotřeby bývá v těchto případech realizována 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. [52]

Průběh takového cyklického chování spotřeby mikrokontroléru, kde se střídají fáze měření a spánku s pravidelnou periodou měření teploty, je znázorněn na obrázku 3.15 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. [51]

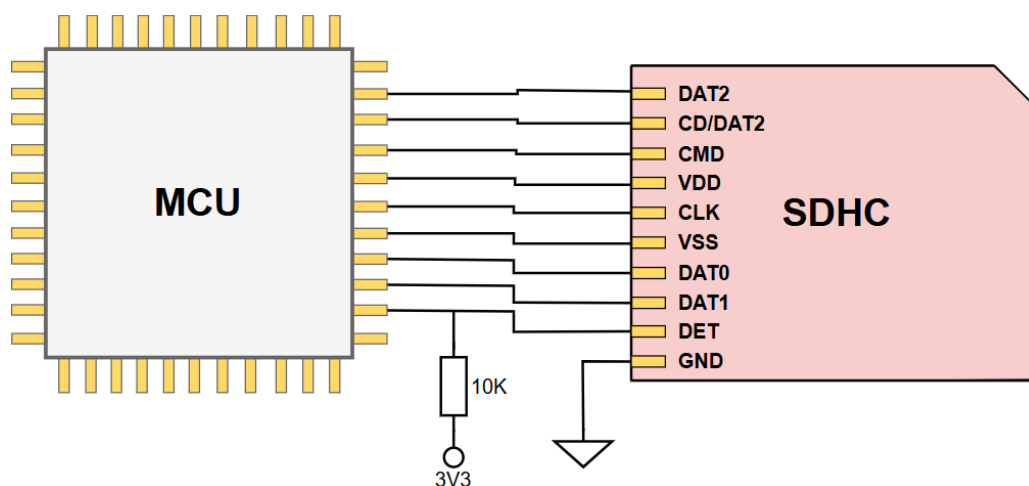
V těchto případech je proto nutné zvážit provozní podmínky a očekávanou dostupnost systému. Pokud záznamník pracuje s velkým datovým tokem a má možnost být připojen po dobu záznamu stále k externímu napájení, může být výhodnější upustit od implementace nízkoeenergetických režimů a místo toho optimalizovat architekturu systému pro nepřetržitý provoz s důrazem na výkon a rychlou odezvu. [52]

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 určují 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 sběrnice

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

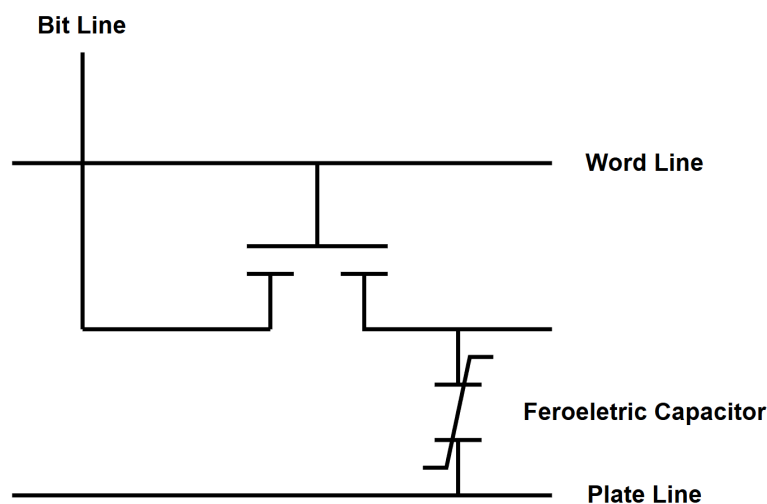
zvláště výhodné v záznamnících, které zapisují drobné množství dat, kde se data nemění neustále, ale jednou za danou periodu uvedenou v kapitole 2.4.4, například v environmentálních záznamnících monitorujících teplotu nebo vlhkost.

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.

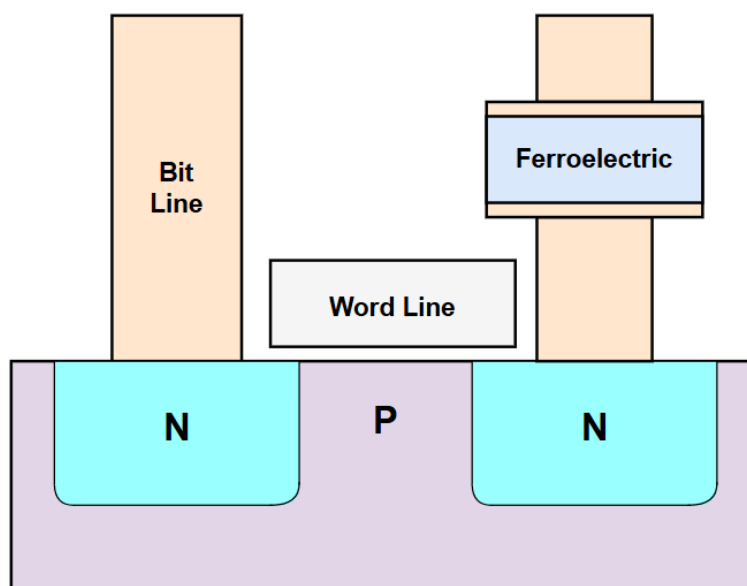
Ve feroelektrické RAM paměti (FRAM/FeRAM) jsou data ukládána pomocí změny polarizace feroelektrického materiálu v paměťové buňce. Jednotlivé buňky se skládají podobně jako je tomu u dynamické RAM (DRAM), z jednoho tranzistoru a jednoho feroelektrického kondenzátoru (1T-1C). Na rozdíl však od DRAM, kde je informace uchovávána jako elektrický náboj v lineárním dielektriku, FeRAM využívá feroelektrický materiál, jakým je třeba titanititan olovnatý (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 odeznání elektrického pole. [36]



Obrázek 2.13: Struktura 1T-1C feroelektrické RAM paměti (FeRAM) [45]

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

dostate n zapln na, její obsah je dávkov p enesen na dohodnuté trvalé úložišt , a tento cyklus se opakuje.



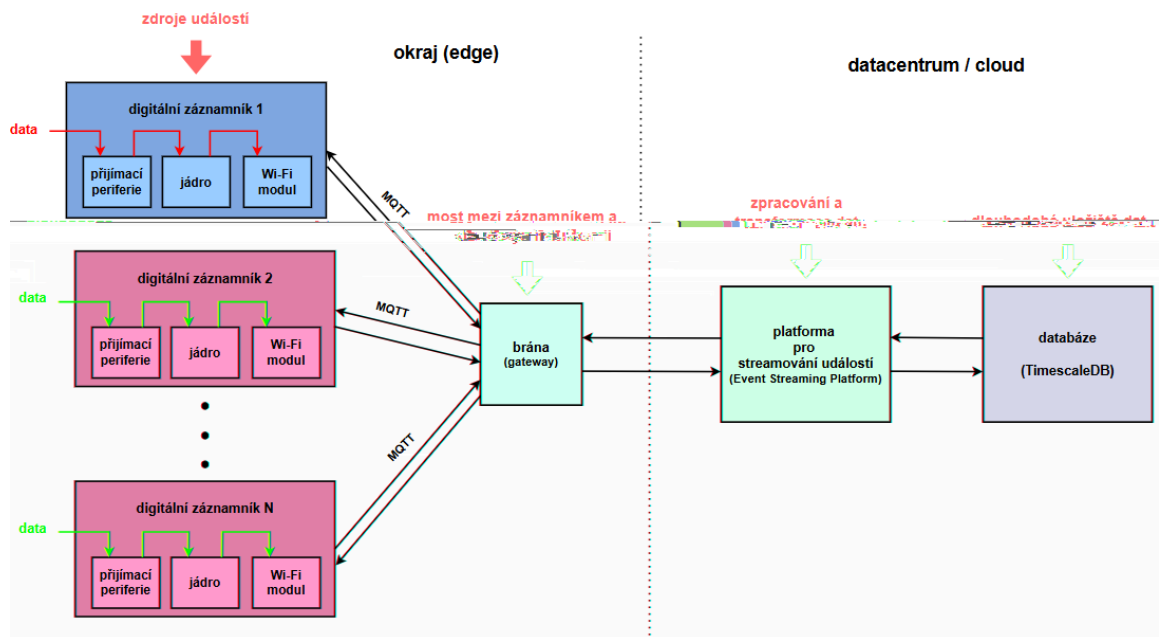
Obrázek 2.14: Struktura feroelektrické RAM pam ti (FeRAM) [45]

Použití FRAM jako vyrovnávací pam ti p ínání n kolik výhod. Jedním z hlavních p ínos je snížení opot ebení hlavního úložišt , eliminán je totiž astý zápis po malých blocích dat, který zbyte n opot ebovává koncová nevolatilní úložišt typu flash, která mají omezený počet p episovacích cykl . Další výhodou je velice rychlý zápis oproti flash pam tem, obvykle trvá zápis na FRAM v ádu nanosekund, což je ádov rychlejší než srovnávané flash pam ti, na kterých zápis trvá typicky v ádu mikrosekund až milisekund. FRAM je navíc nevolatilní, což znamená, že i v p ípad v ýpadku napájecího nap tí z stávají zaznamenaná data na feroelektrickém uložišti zachována, ímž se eliminuje pot eba dodate ných opat ení k ochran dat, jako jsou záložní baterie nebo superkondenzátory.

2.5.3 Zápis na vzdálené úložišt

Pro dlouhodobé uložení dat lze v neposledním p ípad také využít vzdálená úložišt , jakými jsou databáze i cloudy. Lze tak využít jednotného úložišt pro velké množství digitálních záznamník a eliminovat tak pot ebu lokálních, nevolatilních pam ových médií. Zmínované jednotné úložišt m že být jak centrální server, nebo distribuovaná sí ová soustava, umož ující uložení daleko v tšího množství dat, než m že nabídnout lokální úložišt .

V praxi dedikovaný záznamník, který data bu p ímo zpracovává, nebo je do asn uchovává v volatilní pam ti, využívá sí ové rozhraní k jejich p enosu do vzdáleného úložišt . P enos probíhá obvykle prost ednictvím aplika ních sí ových protokol postavených nad transportním protokolem TCP (Transmission Control Protocol), jakým je MQTT, nebo nad protokolem UDP, nad kterým je postaven t eba protokol CoAP. Každý z uvedených zástupc poskytuje trochu odlišnou funkcionalitu. MQTT je vhodn jší pro komunikaci, kde odesílatel a p íjemce jsou synchronizováni a dialog probíhá asynchronn . Vysílatel tedy odesílá data a ostatní za ízení mohou za ít. Zato CoAP zase prosazuje formát komunikace typu dotaz-odpov , kterým mimikuje HTTP. [26]



Obrázek 2.15: Schéma pokročilého digitálního záznamníku s cloudovým uložištěm postavený na streamingové platformě Kafka [60, 32]

Následně jsou data ukládány na již zmíněné 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 může být tedy vhodné využít například InfluxDB nebo TimescaleDB.⁴ Cloudová řešení jsou pak objektová uložiště, kde jsou data ukládány v podobě souborů i 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. [35]

Jaké jsou tedy výhody tohoto přístupu? Především je to možnost centralizovaného ukládání a zpracování dat, to se hodí při velkých množstvích 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 i 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. [35]

Tento přístup se hodí pro digitální záznamníky operující ve známých prostředích, jakým je třeba zmíněná 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 časté.

tento přístup využít na zařízení, která že zařízení musí mít kolikrát 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

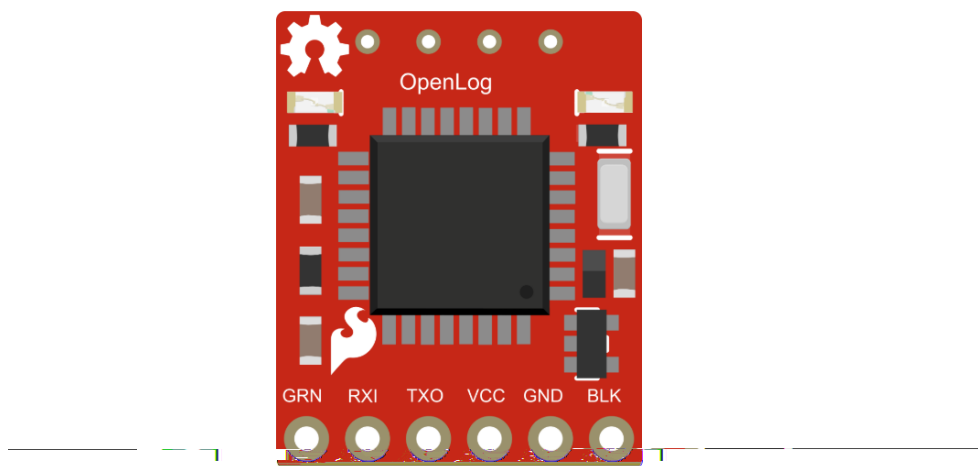
Návrh digitálního záznamníku

3.1 Existujících řešení digitálních záznamníků

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 vnuje popisu n kterých dostupných řešení, konkrétně záznamník m zaměřeným na záznam datových toků zmíněných v kapitole 2.3, mezi které se bude adit i výsledné zařízení, které jsem navrhl, implementoval a popsal v této bakalářské práci.

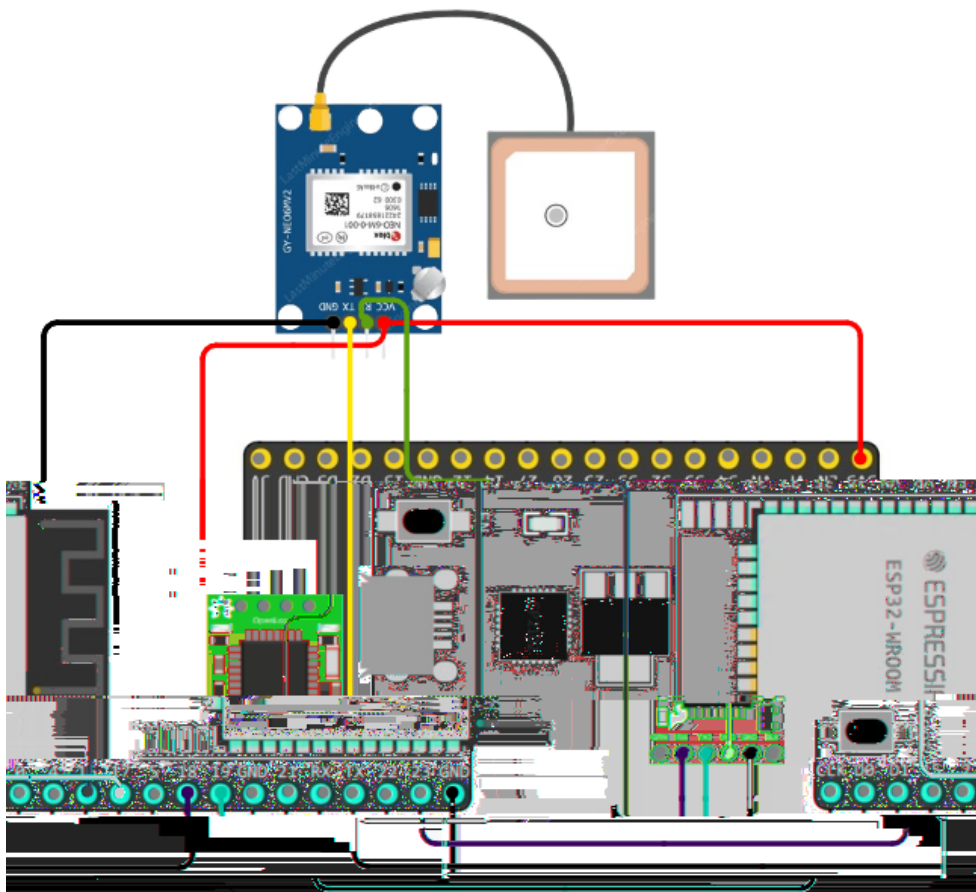
3.1.1 OpenLog Serial Data Logger

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 jší konfigurace. [14]



Obrázek 3.1: Digitální záznamník SparkFun Openlog [9]

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 (Printed Circuit Board). Záznamník je vhodný k monitorování systému, který již zpracovává data ze zdroje dat (viz. obrázek 3.4). Obvykle máme v tomto případě hlavní mikrokontrolér, který přijímá monitorovaná data (např. 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 volatilní RAM paměti a jakmile se tento buffer naplní, tedy nasbírá 512 bajtů, tak je zapíše do micro SD karty. [9]

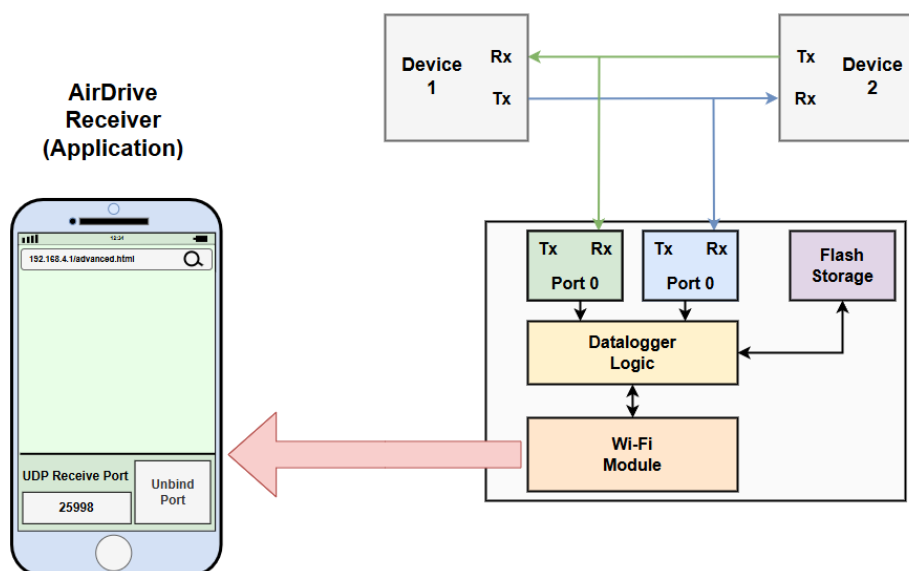


Obrázek 3.2: Sledovací zařízení GPS se záznamem dat [9]

Nevýhodou tohoto záznamníku je, že hlavní mikrokontrolér, který zpracovává data a posílá data následně do záznamníku, musí být aplikací připojen k tomuto úcelu, 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 přímým 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, zprůměrněním inženýrství sériových protokolů, zálohování dat z platebních terminálů nebo sběru dat ze senzorových systémů. [3, 4, 5]



Obrázek 3.3: Keeylog AirDrive Serial Logger s přístupem k datům přes webové rozhraní [3, 2]

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), při němž 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. [3]

Navzdory svým pokročilým funkcím má AirDrive Serial Logger i n kolik 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. [3]

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. [6]



Obrázek 3.4: Anticyclone Anti-Log Pro [7]

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

Hlavní výhodou AntiLog Pro záznamníku je podpora vysokých provozních rychlostí, což umožňuje záznam širokého spektra zařízeních, která společně s nízkou spotřebou a možností připojení baterie umožní použití jak ve vnitřních prostorech, tak i v přírodě. Systém podporuje pokročilé časové razítkování (timestamping) s rezolucí až jednu milisekundu, ulehčující synchronizaci. Záznam lze rozšířit o měření veličin, jako je teplota, vlhkost či tlak, prostřednictvím podporovaných senzorů komunikujících prostřednictvím 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 zařízení souasně. [6, 10]

Přesto má AntiLog Data Logger i své nevýhody. Velkým omezením je vysoká pořizovací cena, ta se aktuálně pohybuje u zařízení Anticyclone Anti-Log Pro od 229 £ do 366 £. Pro konfiguraci a přehrávání zaznamenaných dat je zase nutné využívat speciální aplikaci AntiTermPro RS-232 terminálový software, což znesnadňuje práci se zařízením pro nezkušenou obsluhu. [6, 7]

3.1.4 Shrnutí představených řešení

Představená řešení reprezentují různé přístupy k problematice digitálního záznamu sériových dat, a už se jedná o jednoduché a cenově velmi dostupné systémy typu OpenLog, pokročilejší řešení, jakými je AirDrive Serial Logger a AntiLog Pro. Každé z těchto řešení má své výhody, od kapacity úložiště přes různé možnosti přístupu k získaným datům až po vysokou provozní rychlost a další vlastnosti zmíněné v kapitolách v nichž se jednotlivým zařízením.

Navzdory těmto vlastnostem však žádné z uvedených řešení plně neodpovídá požadavkům společnosti NXP Semiconductors. Požadovaný digitální záznamník musí zvládat zaznamenávat sériovou komunikaci o rychlosti mezi 300,000-400,000 baud, dále je potřeba vkládat časová razítka (timestamps), jelikož výsledné záznamy musí být možné synchronizovat s dalším systémem. Nezbytné je, aby záznamník disponoval mechanismem prevence proti ztrátě dat při výpadku napájecího napětí, získaná data musí být možné vyčíst bez nutnosti vyjmutí fyzického média a navíc to vše musí být za rozumnou cenu.

Hlavním společným problémem všech těchto představených řešení je problém prevence ztráty dat při výpadku napájecího napětí, jež ani jedno neřeší. Dále například záznamník od společnosti OpenLog nepodporuje přístup k datům bez nutnosti vyjmutí fyzického média a navíc je nutné, aby každá nová SD karta musela být nejprve zformátována v počítači před použitím v záznamníku. Potenciálním problémem OpenLogu je i schopnost zpracovávat vyšší provozní rychlosti – všiml jsem si, že při praktických ukázkách byly mezi odesláním dat z hlavního MCU vkládány časové mezery (timeouts), což naznačuje, že záznamník není schopen efektivně pracovat s velkými objemy dat při vyšších baudratech. Záznamník od společnosti Keelog zase má problém v maximální rychlosti přijímání dat, která činí 115200 baud. Základní požadavky splňuje pouze záznamník od společnosti Anticyclone, ten je však zbytečně drahý a pro vytení dat je nutné mít v počítači nainstalovanou speciální aplikaci, to je zbytečná záležitost pro nezkušenou obsluhu, u které se očekává, že záznamník použije hned na poprvé správně. Další nevýhodou záznamníků Keelog a Anticyclone Systems je jejich zaměření výhradně na standard RS-232, což také není vhodné pro použití, digitální záznamník bude použit k monitorování bezdrátového nabíjení, kde stačí pouze UART, musela by se tedy zakoupit ještě redukce, která by byla poskytována se záznamníkem.

Rozhodl jsem se tedy navrhnout a implementovat vlastní digitální záznamník, který bude možné využít pro záznam bezdrátových nabíječek a nebude mít výše zmíněné nedostatky.

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.

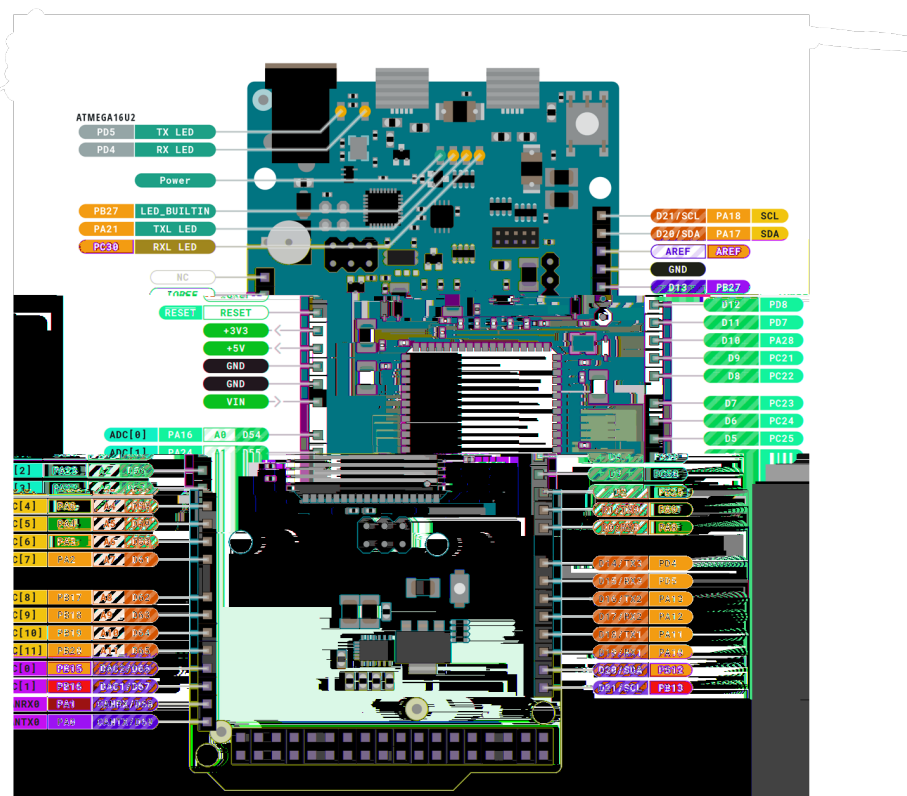
3.2.1 Arduino Due

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.

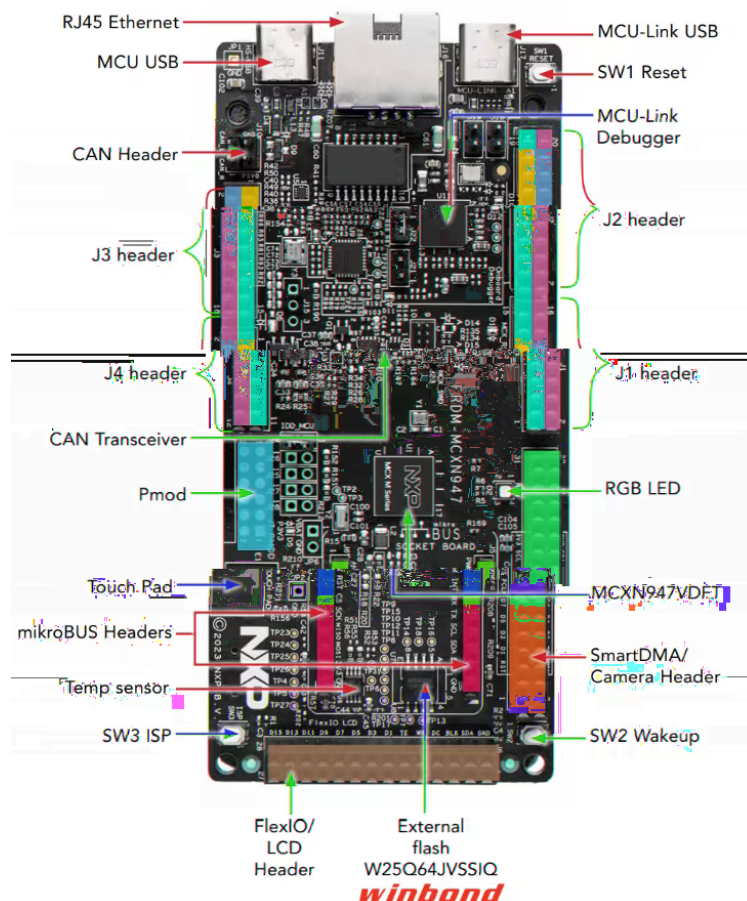
Jednou z hlavních výhod Arduina je jeho modulární a rozšiřitelný ekosystém, který umožňuje připojení různých rozšíření v podobě expanzních desek (shield) a periférií, jako jsou paměťová úložiště, komunikační moduly, senzory pro měření fyzikálních veličin a lze také využít záznamový modul Serial Data 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). [15, 15]

Po stránkách periférií typ nabízí až 4 moduly periferie USART, 2 moduly I2C v podobě IWT (Two Wire Interface). Dále typ obsahuje dva 32bitové 32bitové říta a interní obvod reálného času (Real-Time Circuit zkráceně RTC), které usnadní následné 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



lišťami typu Arduino a microBus pro možné rozšíření v podobě expanzních desek plošných spojů. Významnou výhodou je přítomnost vestavěného debuggeru NXP LPC55569, který umožňuje krokové ladění kódu a sledování hodnot proměnných pomocí MCU LinkServer nebo pomocí J-Link program. K dispozici jsou také dva porty USB typu C, první z nich MCU-Link USB port je určen pro již zmíněné debuggovací úkoly, nahrávání programů a sériovou komunikaci, a druhé z portů - MCU USB slouží pro aplikativní úkoly a podporuje standardy USB Mass Storage, HID (Human Interface Device), USB CDC (Communications Device Class), USB MTP (Media Transfer Protocol) a dalšími standardy pro datový přenos. [12, 8]



Obrázek 3.6: Vývojová deska NXP FRDM-MCXN947 [8]

NXP MCXN947

Srdce mikroadi je MCXN947 je tvořeno dvoujádrovým procesorem Arm® Cortex-M33 s taktem až na 150 MHz, který představuje novou generaci procesoru ARM. Cortex-M33 oproti předchozí generaci - Cortex-M3 je postaven s novější instrukční sadou ARMv8-M, nabízí v té míře bezpečnosti v podobě TrustZone, jež umožňuje rozdělení paměťového prostoru na zabezpečenou (Secure World) a nezabezpečenou oblast (Non-Secure World). Dále jádro poskytuje možnost zvýšení výkonu pomocí integrovaného rozšíření DSP (Digital

Signal Processor), které umožňuje efektivnější zpracování digitálních signálů a numerických výpočtů. [12]

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 i přebaven několika typy rychlé paměti 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). [12]

Pro implementaci různých aplikací a variabilitu systému postavených na tomto čipu, MCXN947 nabízí širokou škálu periférií od základních časovačů v podobě CTIMER a CSTIMER, přes komunikační periférie 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 čipu integrován Ultra Secured Digital Host Controller (uSDHC), který zprostředkovává komunikaci se SD, SDIO a MMC kartami. Ještě k tomu má 16bit ADC a CMP. [12]

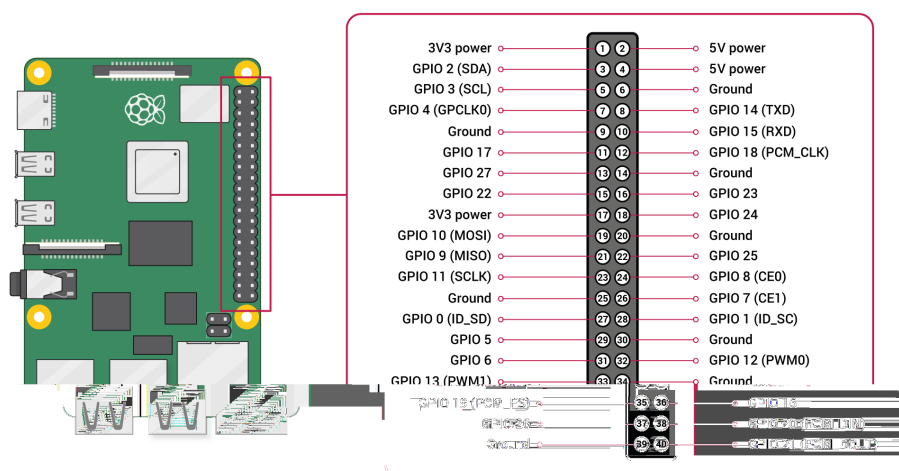
Všechny periférie a části mikrokontroleru jsou znázorněny na dalším obrázku ???. Jak je vidno, lze tento mikrokontroler využít na spoustu různých aplikací, to podporuje i velikost paměti, díky které lze zvolit i různé možnosti vývoje, jako je Bare-Metal i s operačním systémem.

3.2.3 Raspberry PI - mikrokontrolér postaven na Linuxu

Jednou z nejvýkonnějších možností pro implementaci digitálního záznamníku v podobě dedikovaného zařízení je využití mikroprocesorových platform s operačním systémem Linux, přičemž nejznámějším zástupcem této kategorie je Raspberry Pi. Tato platforma spadá do kategorie jednodeskových počítačů (SBC – Single Board Computer), které kombinují výpočetní výkon a pružnost standardních počítačových systémů s rozhraními vhodnými pro práci s externími perifériemi.

Raspberry Pi je nízkonákladový minipočítač, de facto dnes už rodina počítačů, postavených na procesorech společnosti ARM, které podporují běžných operačních systémů, nejčastěji Raspberry Pi OS. Raspberry Pi oproti klasickým mikrokontrolérům (MCU) poskytuje vyšší výpočetní výkon, taktéž i větší množství operační paměti (RAM) a podporuje také multitasking, umožňující běžně více aplikací i procesů souasně.

Raspberry Pi existuje v několika verzích, proto bude následný text v novém modelu Raspberry Pi Zero 2 W, který představuje rozumné parametry pro implementaci digitálního záznamníku v podobě dedikovaného zařízení. Model Zero 2 W je vybaven čtyřjádrovým procesorem Broadcom BCM2710A1 založeným na jádru ARM Cortex-A53 s taktem 1 GHz a disponuje 512 MB nízkoeenergetické operační paměti SDRAM typu LPDDR2. Raspberry Pi Zero 2 W disponuje jedním USB portem typu micro-B, jenž podporuje režim OTG (On-The-Go) a umožňuje tak připojení externích zařízení, jako jsou USB flash disky i další periférie. Úložnou kapacitu zařízení lze jednoduše rozšířit díky přítomnosti slotu pro microSD kartu, která zároveň slouží jako primární úložiště operačního systému. Model Zero 2 W obsahuje také integrovaný bezdrátový komunikační modul podporující Wi-Fi standardu 802.11 b/g/n pracující v pásmu 2,4 GHz, díky kterému lze snadno implementovat digitální záznamník s podporou vzdáleného úložiště (viz. kapitola 2.5.3).



Obrázek 3.7: Raspberry Pi Zero 2W vývody (pinout) [15]

Raspberry Pi tedy jako varianta pro implementaci digitálního záznamníku vypadá dobře, má ale i nějaké nevýhody? Hlavním omezením Raspberry Pi Zero 2 W je obecný nedostatek komunikačních periférií – tato platforma totiž disponuje pouze jedním modulem UART, jedním modulem SPI a jedním modulem I2C. Tento omezený počet periférií může znatelně limitovat další rozšiřování zařízení o senzory i externí moduly. Například, komplikace může nastat pouze při řešení vkládání časových razítek do záznamů, deska bohužel neobsahuje interní obvod reálného času, nabízí se tedy využít jako referenční zdroj času, časovač (Timer) se softwarovým přerušením, druhou variantou je připojení záznamníku k síti a získat čas pomocí NTP (Network Time Protocol). Alternativním řešením se nabízí dokoupit externí obvod reálného času, to by znamenalo, že už by nebylo možné rozšiřovat zařízení o další periférie komunikující pomocí rozhraní I2C, jelikož RTC moduly toto rozhraní v těsnou využívají, tedy sníží se možnost budoucích rozšíření.

3.2.4 Závěr výběru platformy

Jaká je tedy nejvhodnější platforma pro implementaci digitálního záznamníku ve formě dedikovaného zařízení? Vybral jsem FRDM-MCXXN947 od společnosti NXP Semiconductors, jelikož poskytuje nejvyšší kompromis a nabízí nejvíce možností, z jakých komponent výsledný záznamník složit.

Alternativa Arduino Due, za svoji cenu za mě dostatečný poměr cena/výkon, jak je vidno v tabulce 3.1. Maximální taktovací frekvence jádra je pouze 84 MHz, navíc to je postaveno na starší architektuře Cortex-M3. Kapacita flash paměti je oproti svým konkurentům za nižší cenu pouze 512 KB. V základu deska také neposkytuje možnost prostého rozšíření o externí uložení jako je třeba mikro SD karta, na které by mohly být získané záznamy uloženy. Také výběr z jakého je možné vybrat řešení pro detekci ztráty napájení je omezen.

Raspberry Pi Zero 2W naopak nabízí z vybraných možností velice dobrý poměr cena/výkon, obsahuje vysoce výkonný chip BCM2711 s taktem až 1.5 GHz a nabízí prostor, kde mohou být uloženy získané záznamy, a to konkrétně na micro SD kartě. Nicméně obtížnější by se řešilo vkládání časových značek a možná rozšíření v podobě doplňujících periférií.

Parametr / Platforma	Arduino Due	FRDM-MCXXN947	Raspberry Pi
Typ ipu	ATSAM3X8E	MCXXN947	BCM2711
Typ jádra	ARM Cortex-M3	ARM Cortex-M33	ARM Cortex-A53
Architektura jádra	32-bit	32-bit	64-bit
Taktovací frekvence	84 MHz	150 MHz	1.5 GHz
Opera ní pam	96 KB	1 MB	Až 8 GB LPDDR4
Flash pam	512 KB	2 MB	MicroSD
Spot eba	-	-	-
Po izovací cena	2 058 k (50,82€)	593 K	459 K

Tabulka 3.1: Porovnání vývojových desek Arduino Due, FRDM-MCXXN947 a Raspberry Pi

3.3 P ístupy k ovládaní úložišť

Obecný popis, pro je pot eba externí úložišť , že by se data mohla ukládat i v RAM pam ti, 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

V p edchozí ásti práce byla vybrána základní deska NXP FRDM-MCXXN947 s mikrokontrolérem MCXXN947, který bude sbírat data pomocí vstupní periferie, a tato data také zpracovávat pomocí jádra. Taktěž je vybráno externí úložišť , na které budou získaná data uložena, tím bude SD karta, konkrétn ě SDHC karta. Data na tomto externím úložišti je t eba n jak organizovat, spravovat, aby mohla být v budoucnu n jakým zp sobem interpretována a také pop ípad ě je t eba zajistit konzistenci a perzistenci uložených dat. K tomu ů elu lze využít nap íklad souborový systém, databázový systém nebo data uchovávat v surovém (raw) formátu. Každý z t chto p ístup ů má svá specifika, nicmén ě data, která budou zaznamenávána vyvíjeným záznamníkem, budou nestrukturovaná, rozhodl jsem se vybrat souborový systém. Souborový systém organizuje data p írozen ě do soubor ů a složek a hodí se zejména pro již zmín ěné ukládání nestrukturovaných dat. Pod pojmem nestrukturovaná data rozumíme taková data, která nejsou organizována jednotn ě v tabulkách (relacích) nebo databázových strukturách, ale mohou být ukládána do více typ ů soubor ů v r ůzných formátech a umíst ěna do r ůznorodých adresá ových struktur. Tento p ístup p ínáší výhodu, lze nap íklad získané záznamy hierarchicky ěnit, a zároveň umo ůuje snadné p ízp sobení implementované logiky záznamníku pro ukládání i jiných typ ů dat. Díky tomu je záznamník obecn ě ji využitelný pro r ůzné typy záznamu. [21, 20]

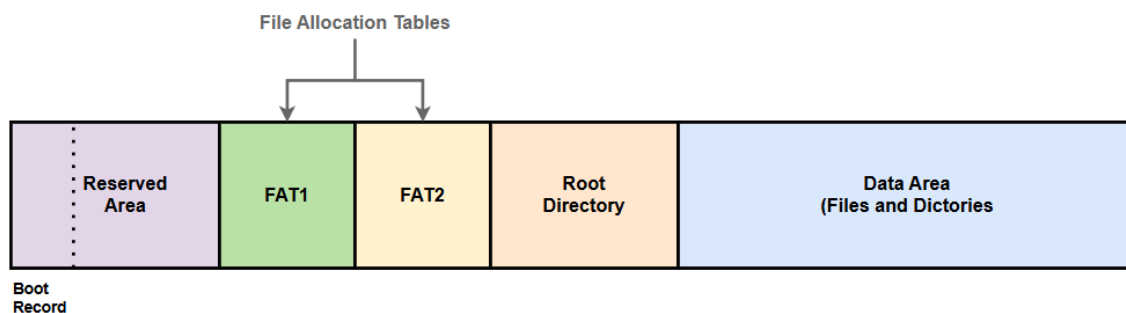
se m ěže proto existovat logika speciální pro danou aplikaci, jakou je t eba anebo lze využít již vytvo ěné komponenty k tomu ur ěné, mezi které pat í i souborové systémy (File Systems).

Obecný popis, souborový systém je zodpov dný za organizaci, správu a p ístup k dat ům na zvoleném úložném médiu.

3.4.1 FATFS

Prvním z představených souborových systémů je FAT File System (FATFS), který je implementován v podobě lehké softwarové knihovny pro mikrokontroléry a vestavné systémy implementující podporu souborového systému FAT/exFAT. FATFS se řadí mezi hierarchické souborové systémy založené na alokační tabulce souborů (File Allocation Table – FAT), ve kterých jsou data organizována do logických jednotek označovaných jako shluky (clusters). Každý soubor uložený na úložném médiu se tak skládá z jednoho nebo více těchto shluků, písemné informace o jejich návaznosti jsou uloženy právě v alokační tabulce FAT. [39, 23]

Fyzické úložiště v systému FAT je rozděleno do několika oblastí, konkrétně do zaváděcího záznamu (Boot Record) ležícího v rezervované oblasti (Reserved Area), který obsahuje informace nutné pro inicializaci a naštvení souborového systému, alokační tabulky FAT1 a FAT2, které spravují umístění jednotlivých shluků. Za nimi se nachází oblast kořenového adresáře (Root Directory), ve které jsou umístěny záznamy o souborech a adresářích nejvyšší úrovně. Poslední část tvoří datová oblast (Data Area), kde jsou samotné soubory a podadresáře fyzicky uloženy.

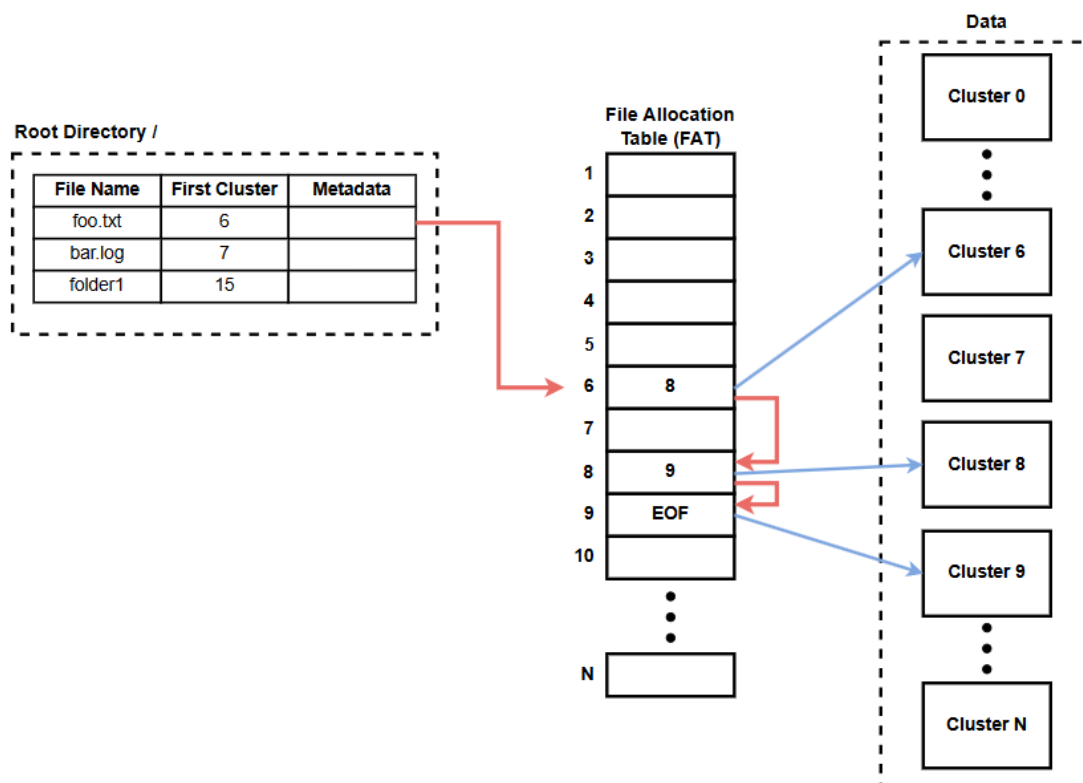


Obrázek 3.8: Oblasti souborového systému FAT [39]

V dnešní době existuje několik variant systému FAT, mezi nejznámější patří FAT12, FAT16, FAT32 a exFAT. Pro úložná média typu SDHC karet se obvykle volí FAT32, nebo nižší varianty, jakou je třeba FAT16, omezují maximální kapacitu úložného média pouze na 4 GB, což je pro dnešní aplikace často nedostatečné. Z tohoto důvodu i dnešní implementace FATFS podporují 32bitovou LBA i 64bitovou LBA variantu, které podporují mnohem větší kapacitu úložiště. [25]

FATFS v současnosti představuje jeden z nejrozšířenějších souborových systémů pro použití ve vestavných aplikacích, a to zejména díky své nízké paměťové náročnosti (nízký memory footprint) a snadné přenositelnosti mezi různými hardwarovými platformami. Významnou předností této knihovny je také široká možnost konfigurace, která umožňuje volbu krátkých a dlouhých názvů souborů (Long File Name - LFN), navíc v různých formátech ANSI/OEM i Unicode. Pro velmi velká úložiště lze využít podporu exFAT s 64-bitovým adresováním bloků (LBA) a GPT (GUID Partition Table) pro práci s diskovými oddíly o velké kapacitě. FATFS také podporuje více fyzických jednotek i oddílů souasně, variabilní velikost sektorů a různé kódové stránky. Knihovna rovněž obsahuje podporu pro volitelná rozhraní API, I/O buffering a režim pouze pro čtení. V případě použití v aplikaci běžící nad operačními systémy reálného času (RTOS) je výhodou této knihovny její bezpečnost, jelikož je garantována bezpečnost při práci ve vícevláknovém prostředí.² [24]

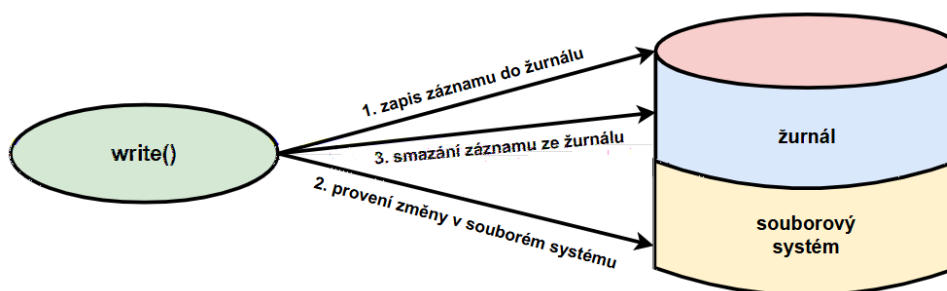
²Knihovna FATFS je takzvaně Thread Safe.



Obrázek 3.9: Souborový systém s alokací tabulkou soubor [39]

3.4.2 LittleFS

Alternativou k souborovému systému FATFS může být blokový (Block-Based) souborový systém LittleFS, který je podobný jako FATFS implementován ve formě odlehčené softwarové knihovny určené primárně pro vestavné systémy a mikrokontroléry. Tento systém byl vyvinut s ohledem na specifika flashových pamětí, aby se rovnoměrně rozdělil zápis na jednotlivé bloky a nebyly první bloky vytíženy více než ty s vyššími indexy.



Obrázek 3.10: Průběh zápisu do souboru spravovaným žurnálovacím souborovým systémem [58]

Souborový systém LittleFS využívá pokročilý mechanismus atomického zpracování známého z databázových systémů, kdy je každá operace buď kompletně dokončena, nebo v případě selhání či výpadku napájení zcela zrušena. K tomu je využit mechanismus žurnálo-

vání (journaling), který je využíván v pokročilých souborových systémech jako je ext3, XFS i ext4. Operace nad souborovým systémem jsou nejprve zaznamenány do speciální struktury (logu) před jejich fyzickým provedením. Pokud by došlo k selhání, jakým je například výpadek napájení, souborový systém se může spolehlivě vrátit do konzistentního stavu.

V souborovém systému LittleFS se k záznamu změny využívá technologie páry metadata (Metadata Pairs). Při každé operaci jsou změněna metadata souborového systému, přičemž tato metadata musí být aktualizována změnou atomicky. K změně jsou využity dvě speciální oblasti, označované jako metadata páry, které jsou opatřeny kontrolními součty (Checksum) a čísly revizí (Revision Count). Při každém zápisu se střídavě aktualizuje jeden ze dvou bloků metadata, přičemž druhý blok vždy uchovává předchozí konzistentní stav. Pokud by tedy došlo k selhání zápisu, souborový systém může jednoduše detekovat poškozený (Corrupted) stav a obnovit data z druhého, neporušeného bloku. [11]

Pro samotná data (Non-Meta Data) souborový systém LittleFS používá techniku Copy-on-Write (COW). Tato technika zajišťuje konzistenci dat tak, že při každém zápisu jsou aktuální (nová) data nejprve zapsána do volných bloků a teprve po úspěšném dokončení zápisu jsou bloky s neaktuálními/starými daty označeny jako volné. Pokud by tedy došlo během zápisu k chybě nebo výpadku napájení, systém se jednoduše vrátí k předchozím, neporušeným blokům, a tím zabrání ztrátě nebo poškození dat. [11]

Hlavními výhodami souborového systému LittleFS jsou tedy šetrnost k paměťovým médiím, nad kterými systém operuje, a také velmi nízká paměťová náročnost jak na velikost programového kódu ve flash paměti, tak na množství operací paměti RAM potřebné k jeho provozu. Dalším významným přínosem jsou již výše zmíněné pokročilé mechanismy známé z databázových systémů, zejména žurnálování a atomické operace, které umožní zachovat souborový systém v konzistentním stavu i v případě neočekávaných selhání nebo výpadků napájení. [11]

Žurnálovací souborový systém LittleFS má ale také své nevýhody. Jednou z nejvýznamnějších je absence kompatibility při použití běžných paměťových médií, jakými jsou například SD i microSD karty, se standardními operačními systémy osobních počítačů, jakými jsou třeba Windows, Linux a MacOS. Data uložená pomocí LittleFS tak nejsou přímě použitelná na běžném počítači bez použití dodatečného softwarového nástroje (Wrapperu). [27]

3.4.3 Čtení FATFS

3.5 Výběr řízení přístupu k získaným datům

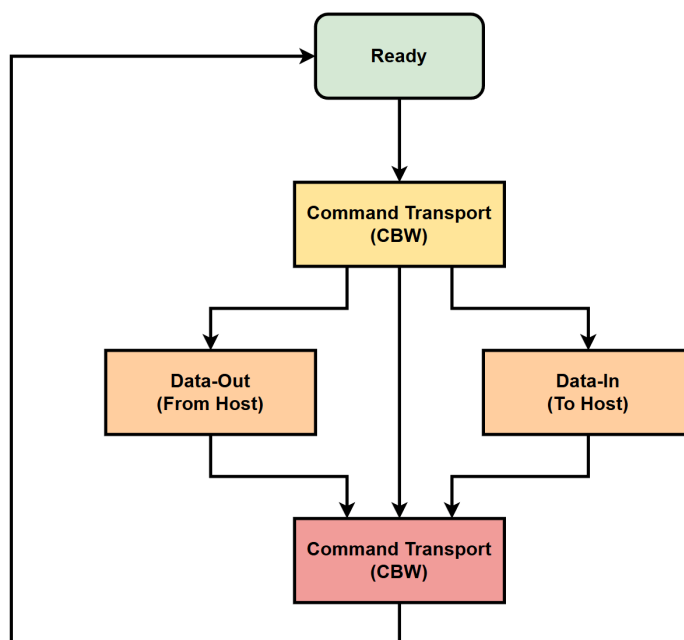
Důležitým prvkem digitálního záznamníku je také přístup k získaným datům, jak již víme, že data budou ukládána na SD kartu, respektive SDHC kartu a budou organizována a spravována souborovým systémem FatFs. Nutné je také připomenout, že jedním z požadavků na realizaci zadání v této bakalářské práci je přístup k zaznamenaným datům bez nutnosti vyjmutí fyzického média. V úvahu připadávají varianty využívající USB i Ethernet, které vývojová deska NXP FRDM-MCXM947 nabízí, nicméně vzhledem k bezpečnostním restrikcím společnosti NXP není možné zadání připojit k síti pomocí Ethernetového rozhraní. Tato skutečnost tedy omezuje dostupné možnosti přenosu dat pouze na komunikační protokoly nad rozhraním USB.

3.5.1 USB Mass Storage

První z možností pro zajištění přístupu k datům uloženým na SD kartě, respektive SDHC kartě, představuje použití standardu USB Mass Storage (MSC), vypracovaného v roce 1998 organizací USB-IF (USB Implementers Forum). Tento standard umožňuje, aby zařízení vystupovalo v hostitelském systému jako standardní blokové zařízení (Block Device), host má tedy přímý přístup k celému uložišti. Protokol je dnes stále využíván a také podporován majoritní většinou moderních operačních systémů jako Microsoft Windows, operační systémy založené na Linuxu, tedy Ubuntu, Mint, Debian, ale také i Mac OS. Vyčíst data z SD karty a zapsat data na SD kartu lze tedy zvládnout téměř z kterékoliho osobního počítače.

Tento protokol rozlišuje dva komunikační prvky, prvním z nich je Mass Storage host, tedy zařízení, které aktivně přistupuje k uložišti a provádí operace čtení a zápisu dat, tím je typicky osobní počítač nebo jiný hostitelský systém. Druhým prvkem je Mass Storage zařízení (Device), které je koncovým zařízením vystupující jako externí paměťové médium, tím může být například zmíněný Flash Disk či Hard Disk.

Z hlediska přenosových protokolů definuje USB Mass Storage dvě hlavní metody komunikace: Control/Bulk/Interrupt (CBI) a Bulk-Only Transport (BOT). CBI je přenosový protokol definovaný standardem USB 1.1, který kombinuje tři typy USB přenosů – řídicí (Control), blokové (Bulk) a přerušovací (Interrupt). Přenos se dále dělí na protokol přenosu dat, který využívá přenos přerušování, a protokol, který přenos přerušování nevyužívá. V současnosti nejrozšířenější metodou přenosu v rámci USB Mass Storage je transport pomocí BOT, v tomto režimu jsou data přenášena po blocích. Součástí USB Mass Storage bývá také USB Floppy Interface (UFI), což je sada příkazů založená na SCSI-2 a SFF-8070 sadách příkazů, navržená pro jednoduchá bloková zařízení, převodně určená pro USB disketové mechaniky (Floppy Disk), ale dnes běžně používaná pro základní interakci s jakýmkoliv typem Mass Storage zařízení. UFI definuje sadu příkazů pro čtení, zápis a správu paměťového média. [17]

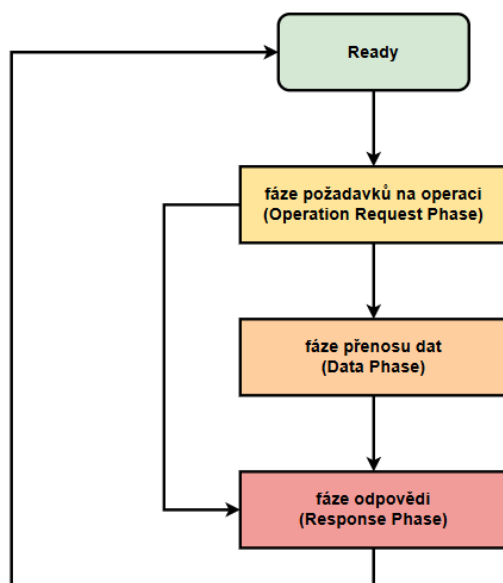


Obrázek 3.11: Stavový diagram USB Mass Storage protokolu [19]

Komunikace mezi hostitelem a zařízením v rámci protokolu Bulk-Only Transport (BOT) probíhá ve třech hlavních fázích, zajišťují přenos příkazů, dat a zpětné vazby o provedení operace. První fází je přenos příkazu (Command Transport), během které host odešle zařízení požadavek na operaci v podobě struktury Command Block Wrapper (CBW). Tato struktura obsahuje informace o typu požadované operace (jakou je třeba inicializace, čtení, zápis), adresaci cílového sektoru na médiu a velikost přenášených dat. Pokud příkaz vyžaduje přenos dat, následuje druhá fáze - přenos dat (Data Transport). Data mohou být posílána ze zařízení do hostitele (například při čtení dat ze zařízení) nebo z hostitele do zařízení (například při zápisu na SD kartu). Přenos probíhá výhradně pomocí bulk přenosu (Bulk-In/Bulk-Out). Poslední fází je Status Transport, v této fázi zařízení odešle zpět hostiteli strukturu CSW, která obsahuje informaci o výsledku provedené operace³. Ne všechny příkazy však vyžadují přenos dat (například příkazy pro kontrolu stavu zařízení), v těchto případech je fáze Data Transport vynechána a zařízení odesílá CSW ihned po přijetí CBW. [19]

3.5.2 Media Transfer Protocol

Media Transfer Protokol neboli zkráceně MTP je druhým významným protokolem umožňujícím přenos multimediálních dat mezi hostitelem a cílovým zařízením pomocí USB. MTP protokol byl navržen firmou Microsoft na základě protokolu Picture Transfer Protocol (PTP), se kterým je dodnes zpětně kompatibilní. MTP je od roku 2008 součástí USB standardu a od roku 2011 se stal standardem pro transfer souborů u zařízení využívajících operační systém Android.



Obrázek 3.12: Stavový diagram Media Transfer Protocol [19]

Komunikace probíhá ve formě transakcí, při nichž role komunikujících zařízení jsou iniciátor (Initiator) a odpovídající (Responder), zároveň je možné, aby si zařízení role mohly vyměnit. Transakce probíhají vždy ve třech fázích definovaných standardem, tou první je

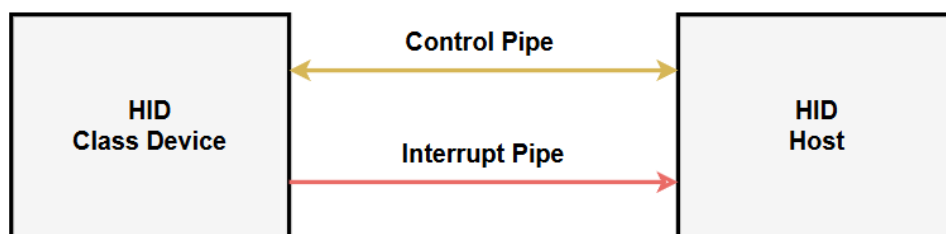
³ v případě chyby může obsahovat další doplňující informace jako třeba množství nepřenesených dat (data residue)

fáze požadavku na operaci (Operation Request Phase), kdy iniciátor vyšle požadavek na provedení určité operace. Následuje volitelná druhá fáze přenosu dat (Data Phase), ve které probíhá přenos dat, pokud to daná operace vyžaduje. Poslední je fáze odpovědi, ve které odpovídající odešle iniciátoru odpověď, ve které informuje o výsledku operace. Probíhající komunikace je vždy jednosměrná (Unidirectional), tedy v rámci jedné operace mohou data být pouze přenesena od iniciátoru k odpovídajícímu či naopak, nikoliv však oběma směry souasně.

MTP se liší od USB Mass Storage, kde je médium připojeno přímo jako blokové zařízení a hostitel má přímý přístup k souborovému systému, zde u MTP k tomu nedochází. Iniciátor tedy není zodpovědný za přímé operace se souborovým systémem, ale pouze zasílá žádosti o přenos nebo manipulaci se soubory. To znamená, že data zde nejsou interpretována připojeným zařízením (iniciátorem), ale interpretaci má na starosti odpovídající zařízení, a připojenému iniciátoru předává jen celé soubory. To má výhodu, že obě zařízení mohou přistupovat k datům souasně (najednou). Naopak to, ale vytváří nové problémy - přes počítač nelze opravit poškozené soubory uložené na zařízením, v případě úpravy souboru je třeba nejprve soubor stáhnout do počítače, zde upravit a následně přenést zpět do zařízení.

3.5.3 Human Interface Device

Další možností pro zajištění přístupu k datům uloženým na SD kartě je využití standardu USB Human Interface Device (HID). Tento standard byl navržen společností Microsoft a posléze přijat jako součást USB specifikace za účelem unifikace komunikace s periferiemi, jako je klávesnice či počítačová myš. HID se liší od USB Mass Storage (MSC) a Media Transfer Protocol (MTP), neslouží primárně pro práci se soubory nebo blokovými zařízeními, ale slouží jako univerzální protokol pro výměnu malých datových paketů (tzv. HID report). [16, 18]



Obrázek 3.13: HID komunikace [16]

HID protokol definuje dvě základní role, prvním z nich je hostitelské zařízení (HID Host) a druhým je koncové zařízení (HID Device). Komunikace mezi těmito zařízeními probíhá primárně pomocí dvou typů přenosových kanálů (tzv. USB Pipe), které jsou pevně definovány standardem HID. Řídící kanál (Control Pipe) slouží především pro inicializaci zařízení a konfiguraci přenosu dat. Přes tento kanál se přenáší tzv. HID Report Descriptor, což je struktura, která popisuje formát a význam jednotlivých HID reportů, které bude zařízení posílat hostitelskému zařízení. Řídící kanál je také využíván pro přístup ke zprávám o funkcích (Feature Reports), sloužící například k nastavování parametrů zařízení. Druhým z kanálů je přerušovací kanál (Interrupt Pipe), který slouží jako hlavní komunikační kanál pro pravidelný přenos datových rámců (reportů) mezi hostem a zařízením. Tento kanál je optimalizovaný pro malé datové pakety s nízkou latencí, typicky pro odesílání stavových informací, aktuálních měřených dat či událostí, jakým je třeba stisk tlačítka. Přerušovací

přenosy probíhají periodicky, přičemž jejich frekvence je definována přídělováním časových slotů.
[16, 18]

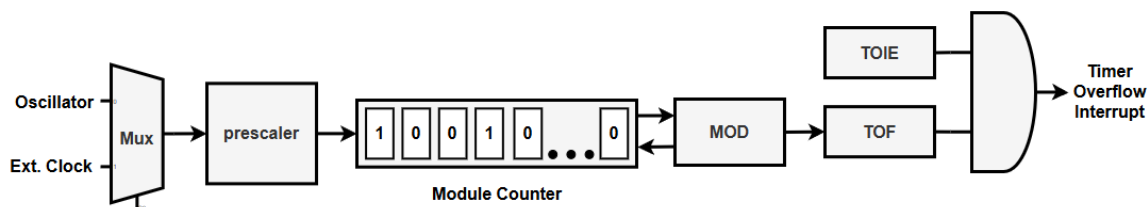
3.6 Výběr zdroje času

Požadavkem na implementovaný digitální záznamník je také vkládání časových značek do záznamu, které budou využity pro následnou synchronizaci s druhým systémem. Způsob, jak generovat časové značky, je mnoho, a tedy nutné si na začátku stanovit základní požadavky, zda časové značky mohou být relativní (tedy například od času spuštění zařízení) či absolutní. Zároveň je však nutné při návrhu systému zvážit i další parametry, jakým je granularita časových značek, tedy časové rozlišení, s jakým budou události zaznamenávány, dále za zdroj času bude lokální nebo vzdálený. Tato kapitola představí některé způsoby, jak generovat časové značky, a dále rozebere jejich výhody a problémy, kterým konkrétní volby elí.

3.6.1 Interní časovač

Nejjednodušším způsobem pro generování časových značek je využít interní časovač, který je běžně dostupný na většině mikrokontrolérů. Interní časovač pracuje na základě externího hodinového signálu, který je taktován z hodinového signálu, jenž je generován interním oscilátorem nebo zvoleným hodinovým zdrojem mikrokontroléru.

Schéma na následujícím obrázku 3.14 znázorňuje základní strukturu interního časovače. Na vstupu se nachází multiplexer (Mux), pomocí kterého je třeba zvolit vhodný zdroj hodinového signálu, na základě kterého bude časovač reagovat, tedy inkrementovat. Tuto reakci můžeme dále ještě upravit pomocí divíky kmitočtu (Prescaler). Pomocí prescaleru lze snížit rychlost příchodu pulzů do čítače, a tím ovlivnit rychlost, s jakou časovač bude inkrementovat svou hodnotu. Na výstupu z prescaleru je napojen čítač (Module Counter), který s každým přijatým impulzem zvýší svou hodnotu o jedničku. Tento čítač je navíc svázán s modulo registrem (MOD), který definuje mezní hodnotu čítače. Jakmile čítač dosáhne hodnoty uložené v registru MOD, dojde k jeho přetečení (overflow), čítač se automaticky vynuluje⁴ a je vygenerován příznak přetečení (TOF - Timer Overflow Flag). Pokud je zároveň nastaven příznak TOIE (Timer Overflow Interrupt Enable), tak je do procesoru odeslán požadavek na vyvolání přerušení. V rámci obslužné rutiny tohoto přerušení je následně možné aktualizovat čítač časových značek a udržovat tak aktuální hodnotu pro následné doplnění do záznamu.



Obrázek 3.14: Blokový diagram časovače

⁴V nejjednodušším případě je čítač vynulován, některé časovače, umožňují nastavit i jiné reakce, jakou je třeba dekrementace zpět na počáteční hodnotu.

3.6.2 Obvod reálného času

3.6.3 Bezdrátová komunikace (GPS/NTP)

3.7 Výběr prostředí řízení aplikace

Srovnání obecné bare-metal a RTOS.

3.7.1 Bare-Metal

3.7.2 RTOS

FreeRTOS

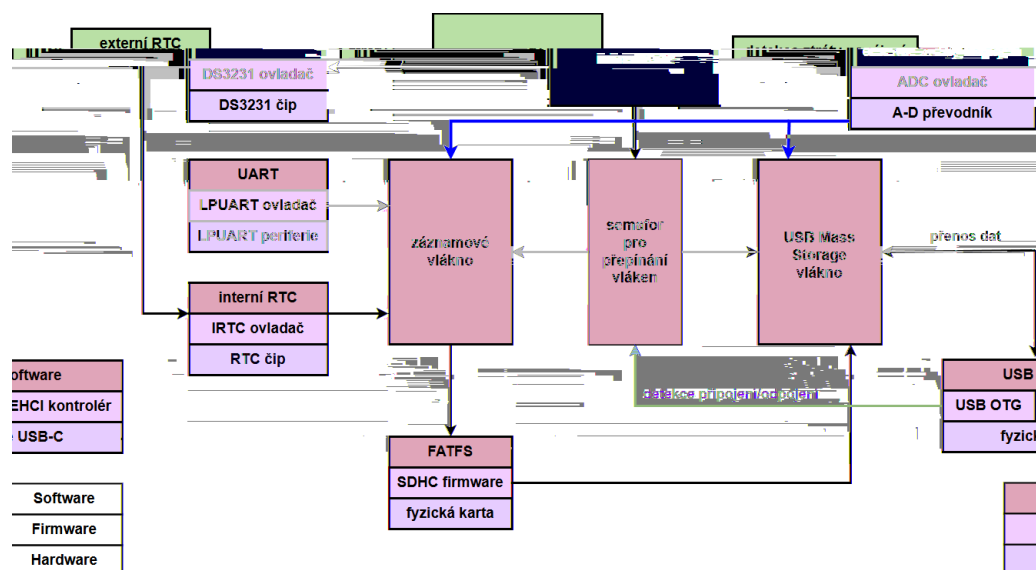
Konkretní výhody a nevýhody FreeRTOS

ZephyrRTOS

Konkretní výhody a nevýhody ZephyrRTOS

3.8 Architektura systému digitálního záznamníku

Popis architektury na základě vybraných komponent. Popis blokového diagramu.



Obrázek 3.15: Výsledná architektura digitálního záznamníku

3.9 Volitelné rozšíření

3.9.1 Měření teploty

3.9.2 Řešení problému synchronizace času

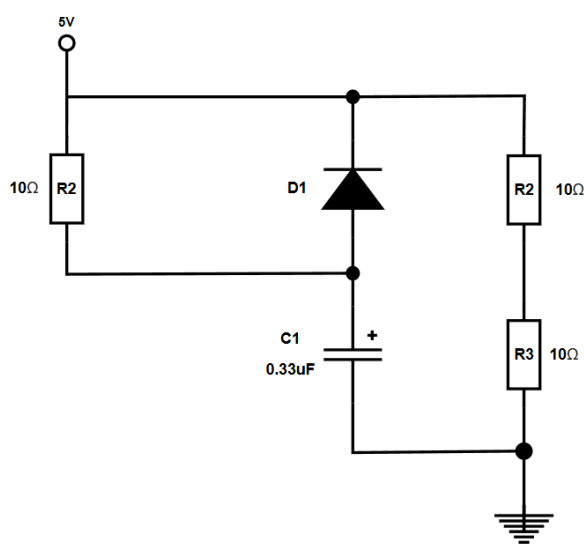
Kapitola 4

Realizace hardwaru

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

4.1 Základová deska

4.2 Expanzní deska



Obrázek 4.1: Obvod pro testování kondenzátoru

Na diodě je úbytek napětí 0.4V. Mění intervalu od 4.6V do 3.5V, jelikož ztráta napětí na diodě je 0.4V, tedy 4.6V (tedy $5V - 0.4V = 4.6V$) a výstupní napětí z LDO je 3.3V a dropout napětí je 0.2V (tedy $3.3V + 0.2V = 3.5V$).

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

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

4.3 Mechanická část

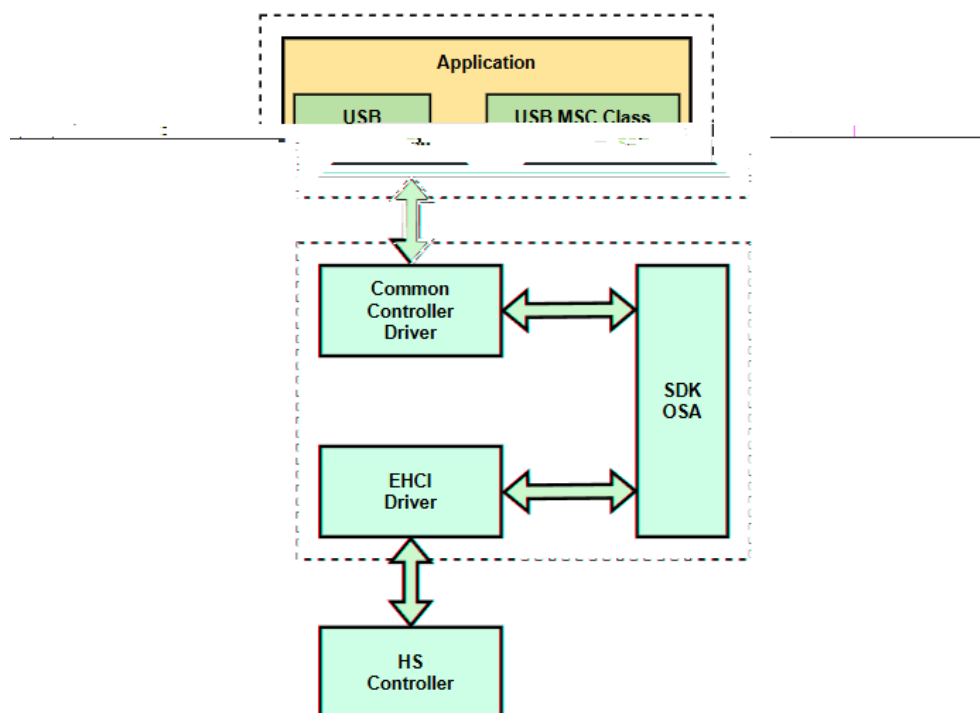
Jak jsem měl spotřebu, jak jsem spočítal hodnoty kondenzátor

Kapitola 5

Softwárová implementace

5.1 Záznamové vlákno

5.2 USB Mass Storage vlákno



Obrázek 5.1: Vzorová struktura aplikace využívající NXP USB Stack [19]

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] *9.2. Packet Dissection* online. Wireshark. Dostupné z: https://www.wireshark.org/docs/wsdg_html_chunked/ChDissectAdd.html. [cit. 2025-03-06].
- [2] *AirDrive RS-232 Recorder* online. Airdrivewifi. Dostupné z: <https://www.airdrivewifi.com/?page=AD065SGL0GGB>. [cit. 2025-03-01].
- [3] *AirDrive Serial Logger* online. Keelog. Dostupné z: <https://www.keelog.com/serial-logger/>. [cit. 2025-03-01].
- [4] *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].
- [5] *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].
- [6] *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].
- [7] *AntiLogPro Boxed* online. Anticyclone Systems. Dostupné z: <https://martelec.anticyclone-systems.co.uk/product/antilogpro-boxed/>. [cit. 2025-03-01].
- [8] *Getting Started with FRDM-MCXXN947* online. NXP Semiconductors. Dostupné z: <https://www.nxp.com/document/guide/getting-started-with-frdm-mcxn947:GS-FRDM-MCXXNX>. [cit. 2025-03-07].
- [9] *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].
- [10] *Logging temperature, humidity and pressure* online. Anticyclone Systems. Dostupné z: https://www.anticyclone-systems.co.uk/product_antilog_env.php. [cit. 2025-03-01].
- [11] *MCUXpresso SDK API Reference Manual Rev. 0: The design of the little filesystem* online. NXP Semiconductors. Dostupné z: https://mcuxpresso.nxp.com/api_doc/dev/1620/a00014.html. [cit. 2025-03-11].

- [12] *MCX Nx4x Reference Manual* online. NXP Semiconductors. Dostupné z: <https://www.nxp.com/design/design-center/development-boards-and-designs/FRDM-MCXX947>. [cit. 2025-03-07].
- [13] *NX1117C; NX1117CE series - Low-dropout linear regulators: Low-dropout linear regulators* online. NXP Semiconductors. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/products/detail/nxp-usa-inc/NX1117CE33Z-115/2765130>. [cit. 2025-03-06].
- [14] *Openlog Hookup Guide* online. Sparkfun. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/openlog-hookup-guide/all>. [cit. 2025-02-27].
- [15] *SPI Speed Configurability for writing to SD card* online. Arduino.cc. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/t/spi-speed-configurability-for-writing-to-sd-card/700412>. [cit. 2025-03-06].
- [16] *Universal Serial Bus Mass Storage Class: Device Class Definition for Human Interface Devices (HID)* online. USB. Dostupné z: <https://www.usb.org/document-library/device-class-definition-hid-111>. [cit. 2025-03-13].
- [17] *Universal Serial Bus Mass Storage Class: UFI Command Specification* online. USB. Dostupné z: <https://www.usb.org/document-library/mass-storage-ufi-command-specification-10>. [cit. 2025-03-11].
- [18] *USB Device HID Class* online. Silicon Labs. Dostupné z: <https://docs.silabs.com/protocol-usb/1.4.1/protocol-usb-hid/>. [cit. 2025-03-13].
- [19] *USB Device MSC Class* online. Silicon Labs. Dostupné z: <https://docs.silabs.com/protocol-usb/1.3.0/protocol-usb-msc-scsi/#usb-device-msc-class>. [cit. 2025-03-11].
- [20] *Chapter 13 –File and Database Systems* online. Virginia Tech, 2004. Dostupné z: https://courses.cs.vt.edu/~cs3204/spring2004/Notes/OS3e_13.pdf. [cit. 2025-03-08].
- [21] *What is Structured and Unstructured Data* online. NXP Semiconductors, ervenec 2020. Dostupné z: <https://www.weka.io/learn/glossary/file-storage/what-is-structured-and-unstructured-data/>. [cit. 2025-03-08].
- [22] *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=AfmB0ooMqIXNP8LYlII8itclRzgEKo1N0c6G0eVfD3ckKHGC0dteTkGe>. [cit. 2025-02-14].
- [23] *FAT Filesystem* online. ELM, 2024. Dostupné z: http://elm-chan.org/docs/fat_e.html. [cit. 2025-03-09].
- [24] *FatFs - Generic FAT Filesystem Module* online. ELM, 2024. Dostupné z: <http://elm-chan.org/fsw/ff/>. [cit. 2025-03-09].

- [25] *FatFs Module Application Note* online. ELM, 2024. Dostupné z: <http://elm-chan.org/fsw/ff/doc/appnote.html>. [cit. 2025-03-09].
- [26] *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].
- [27] AUFRANC, J.-L. *LittleFS is an Open Source, Low Footprint, Resilient File System Designed for Tiny Devices* online. CNX Software, leden 2018. Dostupné z: <https://www.cnx-software.com/2018/01/02/littlefs-is-an-open-source-low-footprint-resilient-file-system-designed-for-tiny-devices/>. [cit. 2025-03-09].
- [28] 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].
- [29] 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.
- [30] CHANDRASEKARAN, S. *Implementing Circular Buffer in C* online. Embed Journal. Dostupné z: <https://embedjournal.com/implementing-circular-buffer-embedded-c/>. [cit. 2025-02-18].
- [31] 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].
- [32] CLIFFORD, J. *MQTT vs Kafka: An IoT Advocate's Perspective (Part 3 - A Match Made in Heaven)* online. Influxdata, erven 2022. Dostupné z: <https://www.influxdata.com/blog/mqtt-vs-kafka-iot-advocate%E2%80%99s-perspective-part-3/>. [cit. 2025-02-21].
- [33] CLINTON, D. *Linux in Action*. 1. vyd. Manning, 2018. 229–251 s. ISBN 9781617294938.
- [34] FLORIÁN, J. T. *Transformace simulátorů z analogové do digitální podoby s důrazem na rozvoj digitální formy a využití virtuální reality pro aplikace simulací v odvětví bezpečnostních složek*. Brno, CZ, 2018. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně, Filozofická fakulta. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/p1bg7/>.
- [35] 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.; ZÁVODSZKY, G.; LEES, M. H.; DONGARRA, J. J.; SLOOT, 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.
- [36] 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.

- [37] HOŘÁK, 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].
- [38] 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>.
- [39] JORDAN, L. *What Is FAT32 File System – A Detailed Guide* online. Recoverit, 2023. Dostupné z: <https://recoverit.wondershare.com/file-system/fat32-file-system.html>. [cit. 2025-03-09].
- [40] KOLHE, A. *What is RingBuffer?* online. Medium. Dostupné z: <https://medium.com/@kolheankita15/what-is-ringbuffer-7b6b808f33e0>. [cit. 2025-02-18].
- [41] KUMAR, D. A Study about Non-Volatile Memories. *Preprints*. Preprints, July 2016. Dostupné z: <https://doi.org/10.20944/preprints201607.0093.v1>.
- [42] 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.
- [43] 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].
- [44] 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>.
- [45] 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.
- [46] 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>.
- [47] 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>.

- [48] PETERSON, D. A. *Program pacer* online. 1980. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US4333084>. [cit. 2025-02-14].
- [49] PETRUNGARO, D. *Data Structure - Circular buffer* online. damianopetrungaro. Dostupné z: <https://www.damianopetrungaro.com/posts/data-structure-circular-buffer/>. [cit. 2025-02-18].
- [50] 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].
- [51] REDON, M. *Strategies for Choosing the Appropriate Microcontroller when Developing Ultra Low Power Systems* online. embedded, b ezen 2012. Dostupné z: <https://www.embedded.com/understanding-mcu-sleep-modes-and-energy-savings/>. [cit. 2025-02-18].
- [52] 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>.
- [53] RINALDI, J. Local Vs. Cloud: Are You Going About Data Logging All Wrong? online. Real Time Automation, ijén 2020. Dostupné z: <https://www.rtautomation.com/local-vs-cloud-are-you-going-about-data-logging-all-wrong/?srsltid=AfmB0oqrdj1qC47hR-VZagW2sKvRgDJkqru8xxEqag66zC36aXIztNvj>. [cit. 2025-02-20].
- [54] 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>.
- [55] SHEEPARAMATTI, R.; SHEEPARAMATTI, B.; BHARAMAGAUDAR, M. a AMBALI, N. Simulink Model for Double Bu ering. In: *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. 2006, s. 4593–4597.
- [56] 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].
- [57] 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.
- [58] UMER, M. *Architecture and Design of the Linux Storage Stack*. Packt Publishing, 2023. 57 s. ISBN 9781837639960.
- [59] 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].

- [60] WAEHNER, K. *Internet of Things (IoT) and Event Streaming at Scale with Apache Kafka and MQTT* online. Confluent, říjen 2019. Dostupné z: <https://www.confluent.io/blog/iot-with-kafka-connect-mqtt-and-rest-proxy/>. [cit. 2025-02-21].
- [61] WINPCAP.ORG. *WinPcap internals* online. Dostupné z: https://www.winpcap.org/docs/docs_40_2/html/group__internals.html. [cit. 2025-02-23].