

## Spotřeba jednodeskových počítačů Raspberry Pi pro bateriové napájení

Power consumption of one board computers Raspberry Pi for  
battery powering

*Jan Benedikt*

*xbened03@feec.vutbr.cz*

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně

DOI: -

**Abstract:** Paper is dealing with power consumption of chosen versions of one board computer Raspberry Pi. Comparing of power consumption was splitted into categories corresponding of basic activities. The main activities are idle state, sending data, load of central process unit and working with memory. In this paper are compared four versions of one board computer Raspberry Pi 2, 3B, 4B and ZeroW. The aim of the article is to estimate battery lifetime powering one board computer during model scenario. The results show that each new version of the Raspberry Pi means an increase in energy consumption. Model 4 requires the highest battery capacity. For one-month operation, a battery capacity of 2.077 Ah at 5 V (including a 15% reserve) is required. Vice versa the lower capacity of battery is required for model ZeroW (0.511 Ah including a 15% reserve).

# Spotřeba jednodeskových počítačů Raspberry Pi pro bateriové napájení

Jan Benedikt

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně  
Email: xbened03@feec.vutbr.cz

## Abstrakt –

Článek se zabývá spotřebou vybraných verzí jednodeskového počítače Raspberry Pi. Porovnání spotřeby bylo rozděleno do kategorií odpovídajících základním činnostem. Jedná se zejména o stav nečinnosti, odesílání dat, vytížení procesoru a práce s pamětí. V článku jsou porovnány čtyři verze jednodeskového počítače Raspberry Pi – 2, 3B, 4B a ZeroW. Cílem článku je odhad výdrže akumulátoru napájející jednodeskový počítač během modelového scénáře. Z výsledků vyplývá, že každá nová verze Raspberry Pi znamená nárůst spotřebované energie. Nejvyšší kapacitu akumulátoru vyžaduje model Raspberry 4. Pro provoz o délce jednoho měsíce vyžaduje kapacitu akumulátoru 398 Ah při napětí akumulátoru 5 V (včetně rezervy 15 %). Naopak nejnižší kapacitu akumulátoru (0,81 Ah včetně 15% rezervy) při stejných podmínkách lze zvolit pro model Raspberry Pi Zero W.

## 1 Úvod

V roce 2012 byla uvedena první verze vývojového jednodeskového počítače Raspberry Pi. Deska plošného spoje velikosti platební karty byla určena především studentům a žákům středních a základních škol pro výuku programování a základů elektrotechniky. První verze vývojové desky Raspberry Pi byla osazena procesorem ARM11 Broadcom BCM2835 s taktem 700 MHz a pamětí Synchronous Dynamic Random Access Memory (SDRAM) o velikosti 128 nebo 256 MB [1]. První verze dále nabízela kompozitní a High-Definition Multimedia Interface (HDMI) video výstup společně se zvukovým výstupem vyvedeným pomocí 3,5mm jack konektoru [1]. Po osmi letech od uvedení první verze získal jednodeskový počítač na velké popularitě jak ve školství, u amatérských kutilů, tak u odborné veřejnosti. Poslední model nese označení 4. Jedná se o průběžně vylepšovaný první model. Oproti první verzi má čtvrtý model výkonnější procesor Broadcom BCM2711 s taktem 1,5 GHz s podporou 64bit instrukcí. Kapacita paměti Random-Access Memory (RAM) byla navýšena až na 4 GiB (model 4 je prodáván ve třech verzích podle velikosti paměti RAM – 1 GiB, 2 GiB a 4 GiB). Navíc má nová verze dvě HDMI rozhraní umožňující připojení dvou zobrazovacích zařízení v jednu chvíli [1][2]. Raspberry Pi je dnes využíván v mnoha odvětvích lidské činnosti. Od školství, pro které bylo původně navrženo, přes prototypování

v průmyslu, až po akademický výzkum.

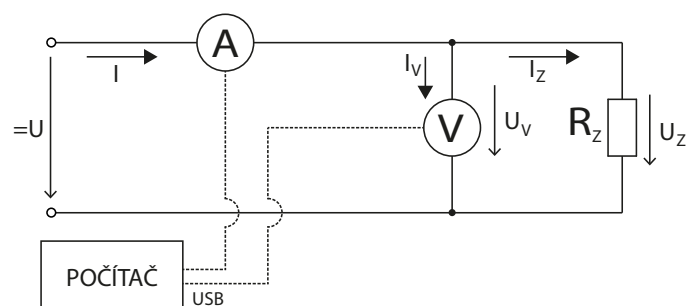
U využití výkonného hardware je předpoklad, že vývojová deska bude připojena k síťovému zdroji. Je však možné provozovat vývojovou desku i pomocí akumulátorového napájení [3]. Zde při využití jednodeskového počítače Raspberry Pi pro vývoj prototypů vzniká požadavek nízké spotřeby. I když jsou na trhu dostupnější a úspornější řešení, skýtá jednodeskový počítač Raspberry Pi výhodu v přítomnosti plnohodnotného operačního systému založeného na Linuxovém jádře [3]. Pro složitější výpočetní reakce je vývojová deska Raspberry Pi vhodnější díky osazenému procesoru typu Advanced Reduced Instruction Set Computer (RISC) Machine (ARM) [1].

## 2 Metodologie

Tato kapitola je věnována zvoleným měřicím přístrojům, postupu měření a výpočtu chyb v měření.

### 2.1 Systém měření

Měření probíhalo pomocí dvou měřicích přístrojů Agilent 34410A. První přístroj byl v módu měření proudu a druhý v módu měření napětí. Oba měřicí přístroje byly připojeny k počítači pomocí Universal Serial Bus (USB) rozhraní, kde byl spuštěn program BenchVue od společnosti Keysight, který prováděl samotné měření. Program BenchVue zajistil společnou synchronizaci měřicích přístrojů a stahoval naměřená data. Jako zdroj byl využit oficiální adaptér AC/DC, výstup: 5.1 V DC, 3 A, 15.3 W.



Obrázek 1: Schéma zapojení měřicí soustavy.

Pro měření stejnosměrného výkonu bylo použito měření nepřímou metodou typu  $AV$ . Celková frekvence vzorkování

činila 10 Hz. Vzorčky tedy byly měřeny s intervalem 100 ms.

## 2.2 Použitá zařízení a software

Pro potřeby měření byly využity vývojové desky Raspberry Pi. Konkrétně se jednalo o verze: Raspberry Pi 2B, Raspberry Pi 3, Raspberry Pi 4B a Raspberry Pi Zero W.

Hlavní rozdíly mezi verzemi jsou v použitém Central Process Unit (CPU), paměti RAM a přítomnosti síťového rozhraní (bezdrátové nebo drátové pro konektor RJ-45) [1].

Verze 2B disponuje procesorem „A 900MHz quad-core ARM Cortex-A7 CPU“, což je čtyřjádrový procesor architektury ARM, která je vylepšenou verzí rodiny RISC. Verze 2 je dále osazena 1 GiB paměti RAM. Verze 2B, jako jediná z testovaných, nedisponuje Wi-Fi bezdrátovým rozhraním. K dispozici je pouze síťová karta pro připojení kabelu standardu Ethernet s maximální propustností 100 Mb/s [4].

Verze 3B má osazen novější procesor „Quad Core 1,2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU“. Opět obsahuje čtyři jádra. Oproti verzi 2 má procesor o 300 MHz vyšší takt a nově také podporu adresace o velikosti 64 bitů. Paměť RAM má stejnou velikost 1 GiB jako předchozí model. Novinkou je zde přítomnost bezdrátového rozhraní Wi-Fi, o které se stará čip BCM43438. Součástí je také podpora Bluetooth. Síťová karta pro připojení kabelu má opět omezení v maximální propustnosti 100 Mb/s [5].

Ve verzi 4 došlo k řadě vylepšení s příchodem nového procesoru „Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1,5 GHz“. Oproti verzi 3 došlo opět ke zvýšení taktu na 1,5 GHz. V případě testovaného modelu byla deska osazena pamětí RAM o velikosti 4 GiB, což je čtyřnásobný nárůst oproti předchozí verzi. Vylepšené jsou také periferie síťového rozhraní. Fyzické rozhraní ethernet disponuje maximální rychlostí 1 Gb/s. U bezdrátového rozhraní došlo k přidání podpory sítí na frekvenci 5 GHz [2].

Poslední testovaný model Zero W. Písmeno „W“ v označení znamená „Wireless“, v překladu bezdrátový. Verze Zero je oproti předchozím verzím rozdílná v konstrukci, která je poloviční oproti plnohodnotným modelům. Verze Zero definována jako model s nízkým odběrem, který je přizpůsoben pro běh na akumulátoru. Nízký odběr je i důvodem pro méně výkonný procesor „Broadcom BCM2835 1 GHz, single-core CPU“. Jedná se o jedno-jádrový procesor, taktovaný na 1 GHz. Výkon je tedy v porovnání všech použitých modelů nejnižší. Zařízení disponuje pouze bezdrátovým rozhraním Wi-Fi. Deska tedy není osazena síťovou kartou pro připojení fyzického kabelu [1][6].

Pro účely srovnání byla využita externí síťová karta s připojením přes USB. Jednalo se o model „Surface USB 3.0 Gigabit Ethernet Adapter“. Externí síťová karta byla využita pouze u modelu Zero W, který rozhraním pro připojení síťového kabelu nedisponuje.

Každé Raspberry bylo osazeno microSD kartou, od výrobce SanDisk, o velikosti 16 GiB. Na kartě byl nahrán

operační systém Raspbian, což je derivát distribuce Debian [7]. Raspbian je přizpůsoben pro běh na jednodeskových počítačích Raspberry Pi. Celý systém je zkompileován pro běh na architektuře ARM. Systém dále obsahuje podpůrné programy pro snadnější nastavení celého zařízení, včetně ovládání jeho periferií.

## 2.3 Zvolené testující scénáře

Pro změření vypovídajících dat byly zvoleny obvyklé scénáře, které byly zobecněny na nejnižší možnou úroveň. Při běžném využití vývojových desek Raspberry Pi z hlediska softwaru jsou využívány komponenty jako: CPU, paměť RAM a síťová karta [8]. Na základě předpokladu o běžném využívání bylo vytvořeno sedm scénářů.

První scénář obsahuje záznam okamžitého příkonu při nečinnosti. Nečinnost je v tomto scénáři chápána, jako stav, kdy Operační systém (OS) nezpracovává žádné uživatelem zadané úlohy. V OS tedy běží běžné procesy nezbytné pro jeho fungování. Scénář byl rozdělen na podscénáře, které definují, zdali je aktivní jedno ze síťových rozhraní. Každý scénář byl měřen po dobu 5 minut. Měření na každém zařízení bylo spuštěno až třikrát v závislosti na jeho hardwarové výbavě.

Druhý scénář se týká zatížení procesoru na 100 %. Pro zatížení CPU byl využit program s názvem *stress* [9]. Jedná se o program pro testování systémů a zjišťování reakcí na kompletní vytížení všech dostupných výpočetních prostředků. V případě tohoto testovacího scénáře byl využit nástroj *stress* k vytížení procesoru a tím zvýšení odběru celého zařízení. Ukázka použití programu *stress* je uvedena ve výpisu č. 1. Mód pro vytížení CPU je definován prepínačem *-c* s parametrem o počtu vláken, která budou spuštěna. Parametr *-t* definuje délku vytížení. V případě ukázky 1 se jedná o 5 minut.

Výpis 1: Spuštění programu *stress* pro vytížení CPU.

```
1 pi@raspberrypi:~$ stress -c 4 -t 5m
```

Třetí scénář opět využívá program *stress* [9]. Kromě vytěžování CPU program *stress* dokáže také zatížit paměť RAM. Při vytěžování paměti RAM se využívá systému alokování a dealokace. K alokaci bloku paměti je použita metoda *malloc* a pro dealokaci metoda *free*, které jsou známé z programovacího jazyka C. Změnou v příkazu je použití prepínače *-m*, který definuje vytížení paměti. Argument pro prepínač *-m* je stejně, jako u prepínače *-c* počet vláken, která budou obstarávat alokaci a dealokaci paměti. Ukázka použití programu *stress* pro testování paměti RAM je uvedena ve výpisu č. 2.

Výpis 2: Spuštění programu *stress* pro vytížení RAM.

```
1 pi@raspberrypi:~$ stress -m 4 -t 5m
```

Čtvrtý scénář je zaměřen na komunikaci pomocí protokolu User Datagram Protocol (UDP). Protokol UDP je bezstavový a nedochází tedy k potvrzování příjmu datagramů. Protože nedochází k potvrzování příjmu, nebyl

vytvořen skript pro příjem zasílaných datagramů. Ověření příchodu datagramu bylo realizováno programem Wireshark. Realizace scénáře byla řešena pomocí skriptu v jazyce Python verze 3. Obsah skriptu je zobrazen ve výpisu č. 3.

Výpis 3: Skript pro odesílání dat na server (UDP).

```

1 import socket
2 import time
3
4 UDP_IP = "147.229.146.116"
5 UDP_PORT = 5005
6 MESSAGE = "Hello, World!"
7
8 print("UDP target IP:", UDP_IP)
9 print("UDP target port:", UDP_PORT)
10 print("message:", MESSAGE)
11
12
13 while(True):
14     sock = socket.socket(socket.AF_INET,
15                          socket.SOCK_DGRAM)
16     sock.sendto(bytes(MESSAGE, "utf-8"),
17                 (UDP_IP, UDP_PORT))

```

Pátý scénář je založen na protokolu Transmission Control Protocol (TCP). Scénář je opět rozdělen na dva podscénáře, jeden pro bezdrátovou komunikaci a druhý pro komunikaci po fyzickém médiu, konkrétně po síťovém kabelu. Scénář měří spotřebu při odesílání dat z měřeného zařízení na server. Scénář tedy neřeší příjem dat. Přijímaná data jsou pouze režijního charakteru. Stejně jako u čtvrtého scénáře pro protokol UDP byla komunikace realizována za pomoci skriptu v jazyce Python 3. Celý použitý skript je uveden ve výpisu č. 4.

Výpis 4: Skript pro odesílání dat na server (TCP).

```

1 #!/usr/bin/env python3
2
3 import socket
4
5 HOST='192.168.1.17' # IP adresa serveru
6 PORT=65432 # Port využívaný serverem
7
8 def send():
9     s = socket.socket(socket.AF_INET,
10                       socket.SOCK_STREAM)
11     s.connect((HOST, PORT))
12     for i in range(601000):
13         s.sendall(bytes("message {}".format(i),
14                          'utf-8'))
15         data = s.recv(1024)
16         s.sendall(b"exit")
17         s.close()
18
19 send()

```

Komunikace vyžaduje i stranu serveru. Jako server byl využit stolní počítač. Klientská část (Raspberry Pi) byla připojena přímo síťovým kabelem a pomocí lokální sítě mezi klientským zařízením a stolním počítačem bylo možné navázat komunikaci. Na straně serveru byl vytvořen skript, který stejně jako na straně klienta, byl napsán v jazyce Python verze 3. Jeho ukázka je zobrazena ve výpisu č. 5.

Výpis 5: Skript pro přijímání dat na serveru (TCP).

```

1 #!/usr/bin/env python3
2
3 import socket
4
5 HOST='0.0.0.0'
6 PORT=65432
7
8 def listen():
9     with socket.socket(socket.AF_INET,
10                        socket.SOCK_STREAM) as s:
11         s.bind((HOST, PORT))
12         s.listen()
13         conn, addr = s.accept()
14         with conn:
15             print('Connected by', addr)
16             while True:
17                 data = conn.recv(1024)
18                 print(data)
19                 conn.sendall(data)
20                 if str(data, "utf-8") == "exit":
21                     s.close()
22                     break
23 listen()

```

Skript klienta je koncipován jako konečná smyčka, která zasílá pakety na stranu serveru. Celkově se jedná o 601000 paketů, což přibližně odpovídá času 5 minut.

V šestém scénáři bylo prováděno měření spotřeby při stahování binárního souboru ze vzdáleného serveru. Pro potřeby scénáře byly zvoleny binární soubory s pevně danou velikostí 1 GB. Potřebné soubory jsou dostupné na adrese <https://speed.hetzner.de>. Stažení probíhalo pomocí programu *wget*. Ukázka příkazu, který byl pro scénář použit, je zobrazena ve výpisu č. 6.

Výpis 6: Příkaz pro stažení 1 GB souboru.

```

1 pi@pi:~$ wget https://speed.hetzner.de/1GB.bin

```

Stejně jako u předešlých scénářů, je šestý scénář rozdělen na dva podscénáře. Každý podscénář odpovídá dostupným perifériím na konkrétním modelu. Pátý scénář nemá pevně danou dobu trvání. Jakmile je soubor stažen, tak je testování u konce.

### 3 Výsledky měření

V této kapitole budou prezentovány výsledky měření včetně jejich vzájemného porovnání. Výsledky jsou členěny do kategorií odpovídajících jednotlivým scénářům.

#### 3.1 Scénář odběru při nečinnosti

V prvním scénáři bylo změřeno zařízení při nečinnosti. Samotný scénář byl rozdělen na několik podscénářů. Pro model Raspberry Pi 2 byly využity dva podscénáře. První podscénář byl změřen s neaktivní síťovou kartou. Následovaný druhým podscénářem se zapnutou síťovou kartou společně s aktivním síťovým připojením, kdy nedocházelo k žádné řízené výměně dat. V Tabulce č. 1 jsou uvedeny

průměrné hodnoty (označeny symbolem  $\varnothing$ ) a mediány naměřené spotřeby.

Tabulka 1: Hodnoty spotřeby při nečinnosti.

	Nečinnost	Ethernet	Wi-Fi
Raspberry 2			
$\varnothing I$ [A]	0,237	0,247	-
medián I [A]	0,207	0,245	-
$\varnothing P$ [W]	1,089	1,297	-
medián P [W]	1,089	1,286	-
Raspberry 3B			
$\varnothing I$ [A]	0,239	0,281	0,264
medián I [A]	0,239	0,280	0,264
$\varnothing P$ [W]	1,258	1,476	1,387
medián P [W]	1,255	1,470	1,386
Raspberry 4			
$\varnothing I$ [A]	0,439	0,514	0,463
medián I [A]	0,438	0,514	0,462
$\varnothing P$ [W]	2,301	2,688	2,428
medián P [W]	2,295	2,688	2,421
Raspberry Zero W			
$\varnothing I$ [A]	0,088	0,256	0,113
medián I [A]	0,088	0,256	0,113
$\varnothing P$ [W]	0,466	1,344	0,596
medián P [W]	0,464	1,344	0,596

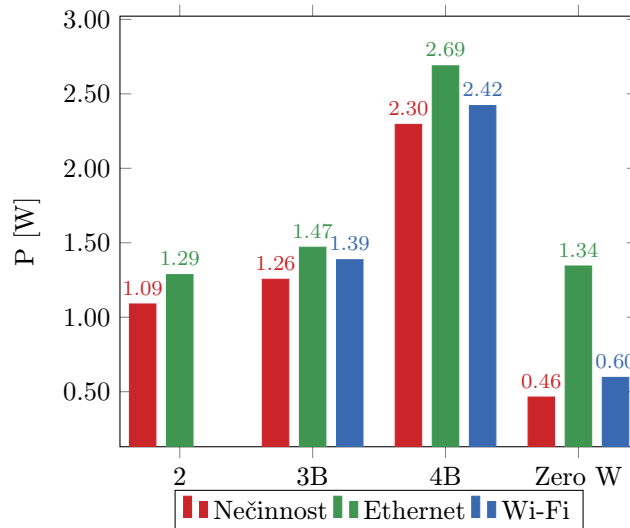
Z naměřených údajů lze vyčíst, že medián hodnoty výkonu při spotřebě s aktivní síťovou kartou je o 0,197 W vyšší, než při nečinnosti bez aktivní síťové karty.

Následoval model 3B, u kterého byla spotřeba v průměru o 0,170 W vyšší, než u předešlého modelu při neaktivní síťové kartě. U modelu 3B byla naměřena vyšší spotřeba s aktivní síťovou kartou. S aktivním připojením standardu Ethernet byla spotřeba o 0,215 W vyšší oproti stavu, kdy byla síťová karta vypnutá. Rozdíl u aktivní Wi-Fi síťové karty byl 0,128 W.

Třetím modelem s označením 4, byla naměřena spotřeba pro nečinnost bez aktivní síťové karty 2,295 W a celkově 2,688 W při aktivní síťové kartě. U posledního modelu Zero W byla využita externí síťová karta pro připojení Ethernet standardu, značky Microsoft model 1663, s udávaným maximálním odběrem 2,5 W. Externí síťová karta využívala pro připojení k desce rozhraní USB. Při neaktivitě bez připojené externí síťové karty byl odběr 0,464 W. Při připojené síťové kartě byl odběr 1,344 W, kde je celkový rozdíl 0,878 W, což při napájení z akumulátoru není energeticky výhodné. Nižší odběr byl zaznamenán při aktivní Wi-Fi síťové kartě. Celkový odběr byl až 7x nižší, oproti externí síťové kartě. Celkový odběr Wi-Fi síťové karty byl 0,129 W.

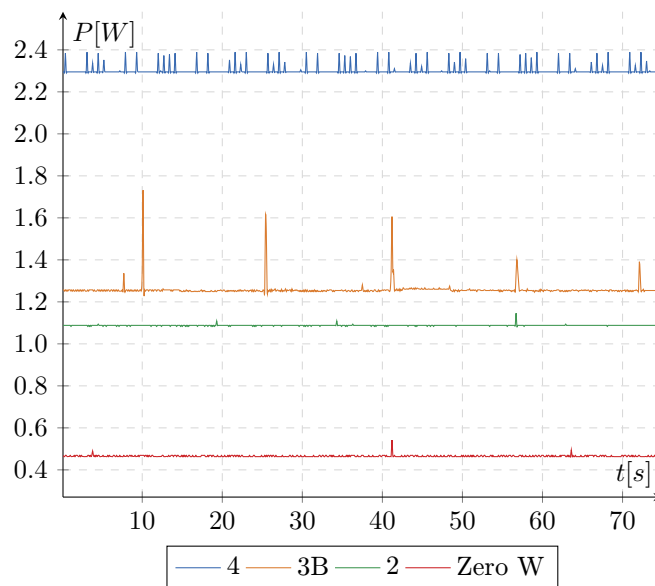
Na grafu č. 2 lze vidět porovnání mediánů spotřeby testovaných verzí Raspberry Pi, kdy modré sloupce označují spotřebu při nečinnosti bez aktivní síťové karty a červené sloupce značí spotřebu při aktivní síťové kartě. U verze 2 je nárůst 0,197 W. Pro verzi 3B je nárůst 0,215 W. U verze 4 byl zaznamenán nárůst o 0,393 W. U verze Zero W je nárůst nejvyšší, a to 0,88 W. Nejvyšší nárůst byl však způsoben externí síťovou kartou. Z údajů tedy vyplývá, že nejúspornější je verze 2.

Rozdíly ve spotřebě naměřených dat při prvním scénáři



Obrázek 2: Graf mediánů spotřeby verzí Raspberry Pi.

jsou viditelné v grafu č. 3. Graf č. 3 znázorňuje pouze data pro scénář bez aktivní síťové karty. Jak lze v grafu č. 3 vidět, nejúspornější verzí je Raspberry Pi Zero W. Dále platí pravidlo, že čím je verze novější, tím má i vyšší spotřebu. Nejvyšší spotřebu má verze 4.



Obrázek 3: Graf spotřeby při nečinnosti.

### 3.2 Scénář při 100% zátěži CPU

Z hlediska spotřeby je CPU nejnáročnější komponentou na Raspberry Pi, což dokazují naměřené hodnoty v tabulce č. 2. Z výsledků je patrné, že každý zkoumaný model má jinou hodnotu rozdílu celkového odběru mezi stavem při nečinnosti a stavem aktivního vytížení procesoru na 100%. Zmiňované rozdíly jsou viditelné na grafu č. 4.

Opět platí pravidlo, kdy nejnovější model má nejvyšší spotřebu. Pravidlo spotřeby je aplikovatelné i na rozdíly

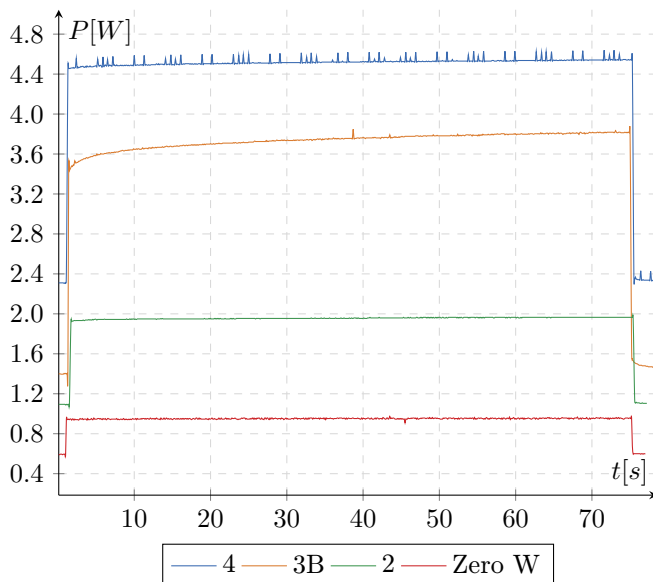
Tabulka 2: Hodnoty spotřeby při využití CPU na 100%.

100% využití CPU	
Raspberry 2	
$\bar{I}$ [A]	0,371
medián I [A]	0,371
$\bar{P}$ [W]	1,944
medián P [W]	1,944
Raspberry 3B	
$\bar{I}$ [A]	0,693
medián I [A]	0,693
$\bar{P}$ [W]	3,611
medián P [W]	3,611
Raspberry 4	
$\bar{I}$ [A]	0,871
medián I [A]	0,872
$\bar{P}$ [W]	4,523
medián P [W]	4,526
Raspberry Zero W	
$\bar{I}$ [A]	0,181
medián I [A]	0,181
$\bar{P}$ [W]	0,949
medián P [W]	0,949

hodnot odběru. Největší rozdíl je u verze 3. Rozdíl odběru při vytížení CPU na 100 % činí 2,356 W. U Raspberry Pi verze 4 je rozdíl 2,231 W, což je o 0,125 W méně než u předchozí verze 3. Verze 2 měla rozdíl v hodnotách 0,855 W. Nejúspěšnější verzí je opět Raspberry Pi Zero W, kde rozdíl byl nejmenší. Celkově se jednalo o 0,485 W.

Verze Zero W vykazovala celkově při tomto scénáři nejnižší odběrové hodnoty viz tabulka č. 2.

V grafu č. 4 lze vidět, že většina testovaných modelů měla odběr konstantního charakteru.



Obrázek 4: Graf spotřeby při 100% vytížení CPU.

U modelu 4 jsou v průběhu patrné mírné špičky. Výkonové špičky nemají s testujícím scénářem přímou souvislost. Jako příklad lze uvést průběh v grafu č. 3, který zobrazuje průběhy testovaných desek v klidovém stavu. I zde

lze vidět u modelu 4 výkonové špičky.

U verze 3 se navíc projevila postupný nárůst spotřeby. To mohlo být způsobeno postupným zahříváním procesoru. V době měření model 3B nedisponoval žádným přídatným aktivním ani pasivním chladičem.

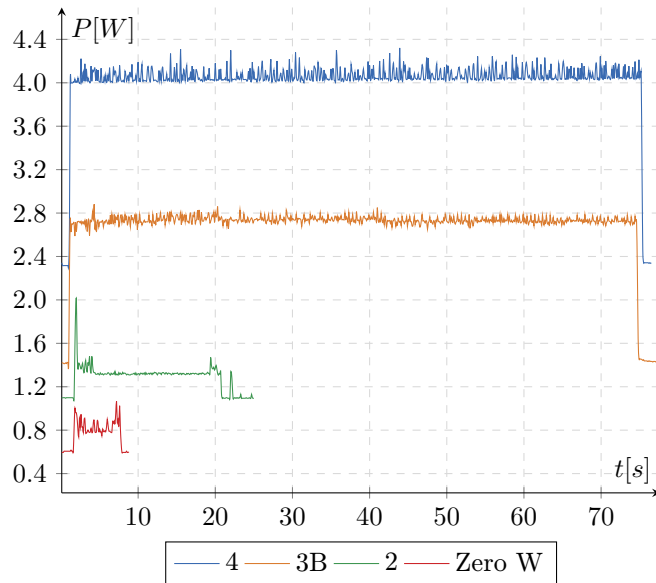
### 3.3 Scénář zátěže paměti RAM

Třetí scénář se zaměřil na spotřebu při práci s pamětí RAM. Testované modely mají rozdílnou velikost paměti RAM a liší se i v technologii paměti. Tři ze čtyř testovaných modelů mají paměť RAM založenou na technologii Low-Power Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory (LPDDR) verze 2 [4][5][6]. Pouze model verze 4 má novější verzi LPDDR4 [2]. Samotná paměť je napájena přímo na desce a není možné ji nijak modifikovat či rozšiřovat bez přímého zásahu do zapojení tiskového spoje na desce. Velikosti paměti jednotlivých modelů jsou popsány v sekci č. 2. Protože se při měření postupovalo stejně jako u předchozích scénářů, i výsledné hodnoty jsou podobného charakteru. Nejúspěšnější model byl opět typ Zero W. Při testování zápisu na paměť RAM byl medián spotřeby 0,815 W. Druhý nejúspěšnější model byl typ 2. Jeho medián spotřeby byl 1,331 W, což je o 38,767 % více, než u modelu Zero W. U modelu 4 byla zaznamenána v mediánu až čtyřnásobná spotřeba oproti modelu Zero W. Třetina spotřeba oproti modelu 4 byla změřena u modelu 3B. Model 3B měl medián spotřeby 2,73 W. Více dat je uvedeno v Tabulce č. 3.

Tabulka 3: Hodnoty spotřeby při aktivitě paměti RAM.

Aktivní využití paměti RAM	
Raspberry 2	
$\bar{I}$ [A]	0,253
medián I [A]	0,253
$\bar{P}$ [W]	1,331
medián P [W]	1,331
Raspberry 3B	
$\bar{I}$ [A]	0,523
medián I [A]	0,522
$\bar{P}$ [W]	2,734
medián P [W]	2,730
Raspberry 4	
$\bar{I}$ [A]	0,782
medián I [A]	0,777
$\bar{P}$ [W]	4,067
medián P [W]	4,040
Raspberry Zero W	
$\bar{I}$ [A]	0,159
medián I [A]	0,155
$\bar{P}$ [W]	0,840
medián P [W]	0,815

V grafu č. 5 lze vidět průběhy spotřeby při testování scénáře se zápisem a čtením z paměti RAM. V tomto scénáři docházelo k problémům s délkou testování. Zmíněný problém je viditelný právě v grafu č. 5. Nejkratší test proběhl u modelu Zero W, který je značen červeným průběhem. Na vině krátkého testu bylo samotné jádro. Při běhu testu byl



Obrázek 5: Graf spotřeby při využití paměti RAM.

běžící proces ukončen jádrem pomocí příkazu *kill*. Test byl ukončen výpisem č. 7.

Výpis 7: Výpis při neúspěšném testu paměti RAM.

```

1 info:dispatching hogs: 0 cpu, 0 io, 4 vm, 0 hdd
2 FAIL:(415) <-- worker 614 got signal 9
3 WARN:(417) now reaping child worker processes
4 FAIL:(451) failed run completed in 8s

```

Stejný problém byl zaznamenán také u modelu 2, který stejně jako Zero W má oproti zbylým dvěma modelům starší a méně výkonný hardware.

### 3.4 Scénář UDP komunikace

Předposlední scénář byl věnován UDP komunikaci. Zde dochází k malému zkreslení u modelu Zero W, kdy byla použita externí síťová karta. Samotná karta má udávaný odběr 500 mA. Při testování na modelu Zero W byl naměřený odběr při nečinnosti 168 mA. Při aktivní UDP komunikaci se odběr zvýšil na 343 mA, respektive 1,797 W. Po odečtu odběru při nečinnosti je medián výkonu 1,333 W. Více než poloviční medián spotřeby byl zaznamenán u bezdrátového přenosu pomocí Wi-Fi. Medián bezdrátového přenosu po odečtu spotřeby při nečinnosti činí 0,488 W. Pro určení orientační hodnoty spotřeby UDP komunikace byl z naměřeného mediánu odečten medián spotřeby (uveden v Tabulce 2), který činí 0,464 W. Kompletní přehled naměřených hodnot je uveden v Tabulce 4.

Z grafu č. 6 lze vyčíst, že nejúspornější model scénáře pro UDP komunikaci, co do komunikace po síti Ethernet, byl model 2 (zelený průběh). Model 2 při odečtení hodnoty mediánu při nečinnosti měl medián spotřeby 0,554 W. Což je 41 % hodnoty u modelu Zero W, který v ostatních scénářích vycházel jako nejúspornější.

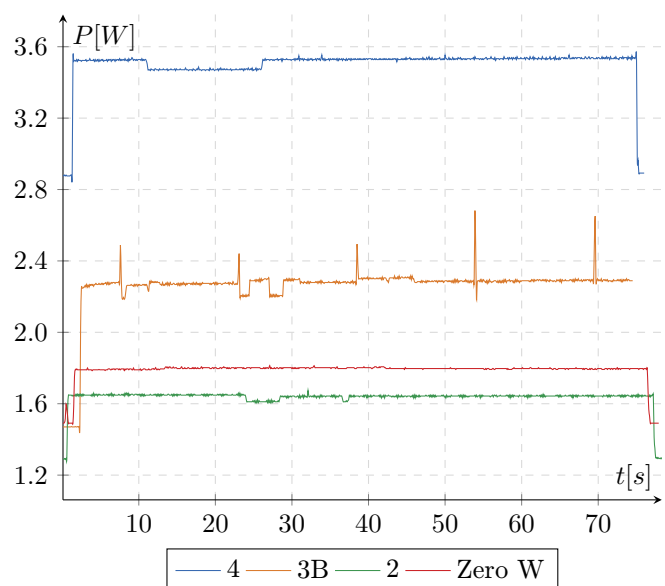
Bezdrátová UDP komunikace po Wi-Fi ukazuje, že nejúspornější model je opět Zero W. Medián spotřeby u bez-

Tabulka 4: Hodnoty spotřeby při UDP komunikaci.

	Ethernet	Ethernet samotně	Wi-Fi	Wi-Fi samotně
Raspberry Pi 2				
$\varnothing I$ [A]	0,312	-	-	-
medián I [A]	0,313	-	-	-
$\varnothing P$ [W]	1,635	0,546	-	-
medián P [W]	1,643	0,554	-	-
Raspberry Pi 3B				
$\varnothing I$ [A]	0,431	-	0,465	-
medián I [A]	0,436	-	0,473	-
$\varnothing P$ [W]	2,258	1,000	2,435	1,178
medián P [W]	2,285	1,027	2,474	1,216
Raspberry Pi 4				
$\varnothing I$ [A]	0,671	-	0,684	-
medián I [A]	0,676	-	0,695	-
$\varnothing P$ [W]	3,501	1,200	3,567	1,266
medián P [W]	3,529	1,228	3,626	1,325
Raspberry Pi Zero W				
$\varnothing I$ [A]	0,341	-	0,179	-
medián I [A]	0,343	-	0,181	-
$\varnothing P$ [W]	1,787	1,321	0,939	0,473
medián P [W]	1,797	1,333	0,952	0,488

drátové komunikace byl po odečtu mediánu nečinnosti 0,488 W. Z hodnot v Tabulce 4 vyplývá, že pro komunikaci se sítí je vhodné využít bezdrátovou Wi-Fi kartu, která je zabudovaná přímo na desce plošného spoje. Data ukazují, že spotřeba bezdrátové komunikace je 36,6 % z 1,333 W při komunikaci po metalické síti Ethernet s externí síťovou kartou.

U zbylých dvou modelů (3B a 4) je vidět, že bezdrátová komunikace spotřebuje více energie, než drátová komunikace. Konkrétně u modelu 3B je nárůst v mediánu spotřeby o 0,189 W. U modelu 4 je nárůst 0,097 W. U modelů 3B a 4 je naopak úspornější použití metalické sítě.



Obrázek 6: Graf spotřeby při UDP komunikaci pomocí rozhraní Ethernet.

### 3.5 Scénář TCP komunikace

Poslední scénář byl věnován TCP komunikaci. Scénář byl rozdělen do dvou podscénářů. První podscénář se věnuje jednoduché komunikaci klient server. Druhý podscénář testoval spotřebu při stahování souboru ze sítě Internet. Více o způsobu provedení obou podscénářů je uvedeno v podkapitole 2.3.

Při TCP komunikaci, kdy byl využit jednoduchý Python3 skript, který zasilal pakety se zprávou na server, bylo nejúspornější řešení u modelu 3B se spotřebou 0,312 W pro komunikaci skrze metalickou síť. Při TCP komunikaci po bezdrátové síti byl nejúspornější model Zero W, který má medián spotřeby 0,151 W. Více v Tabulce č. 5.

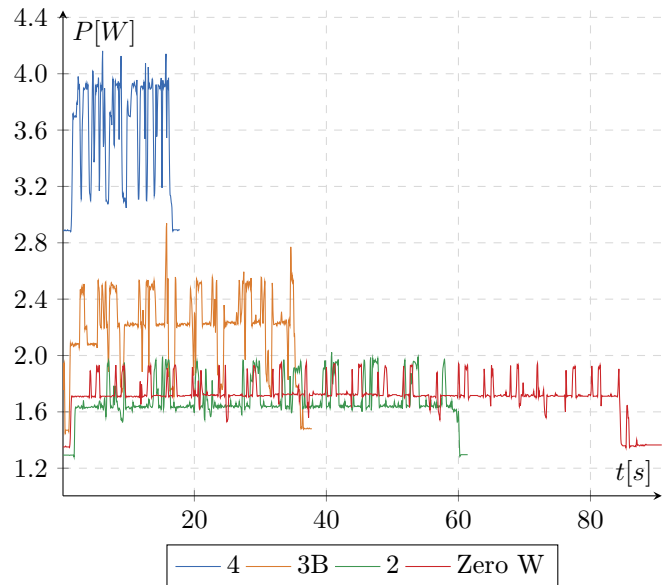
Tabulka 5: Hodnoty spotřeby při TCP komunikaci.

	Ethernet	Ethernet samostatně	Wi-Fi	Wi-Fi samostatně
Raspberry 2				
$\varnothing I$ [A]	0,272	-	-	-
medián I [A]	0,275	-	-	-
$\varnothing P$ [W]	1,428	0,338	-	-
medián P [W]	1,444	0,354	-	-
Raspberry 3B				
$\varnothing I$ [A]	0,299	-	0,270	-
medián I [A]	0,299	-	0,270	-
$\varnothing P$ [W]	1,570	0,312	1,416	0,158
medián P [W]	1,570	0,312	1,418	0,160
Raspberry 4				
$\varnothing I$ [A]	0,606	-	0,470	-
medián I [A]	0,617	-	0,469	-
$\varnothing P$ [W]	3,170	0,870	2,462	0,161
medián P [W]	3,227	0,926	2,458	0,157
Raspberry Zero W				
$\varnothing I$ [A]	0,328	-	0,118	-
medián I [A]	0,330	-	0,117	-
$\varnothing P$ [W]	1,722	1,256	0,620	0,154
medián P [W]	1,729	1,265	0,617	0,153

### 3.6 Scénář stažení binárního souboru o velikosti 1 GB

Následoval scénář, který stahoval binární soubor o pevně dané délce ze sítě Internet. V grafu č. 8 lze vidět porovnání spotřeby jednotlivých modelů, ale také dobu stahování jednoho souboru. Nejrychleji byl soubor o celkové velikosti 1 GB stažen na modelu 4. Model 4 disponuje gigabitovým portem, zapojeným do USB 3 řadiče a byl tedy plně využit potenciál poskytnutého připojení k síti Internet. U ostatních modelů byl k dispozici pouze stomegabitový adaptér a stahování trvalo déle. U modelu Zero W byla využita externí gigabitová síťová karta, která však byla připojena pomocí USB 2 řadiče a nebylo možné plně využít její rychlost. Nejnižší spotřebu měl pro metalické připojení model 2. Medián spotřeby byl 0,551 W. Více v Tabulce 5.

U bezdrátového Wi-Fi připojení při stahování 1 GB souboru, byl opět nejúspornější model Zero W. Medián spotřeby při komunikaci byl 0,514 W. Stažení souboru však



Obrázek 7: Graf spotřeby při stažení 1GB souboru pomocí rozhraní Ethernet.

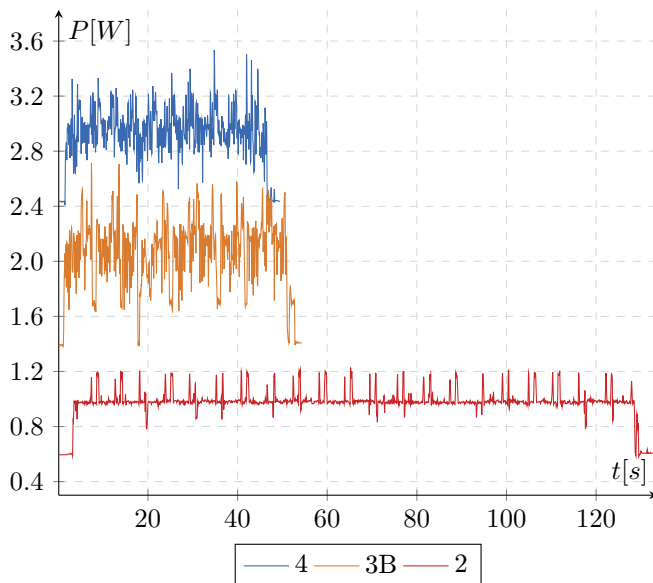
u modelu Zero W trvalo nejdéle ze všech modelů. Nejrychleji byl soubor stažen u modelu 4. Druhý nejrychlejší byl model 3B, u kterého se rozdíl v času stahování lišil v řádech sekund. U modelu Zero W byla délka stahování více, jak dvojnásobná, což mohl způsobit řadič USB s připojenou externí síťovou kartou. Více dat v Tabulce 6.

Tabulka 6: Hodnoty spotřeby při stahování 1GB souboru.

	Ethernet	Ethernet samostatně	Wi-Fi	Wi-Fi samostatně
Raspberry 2				
$\varnothing I$ [A]	0,320	-	-	-
medián I [A]	0,313	-	-	-
$\varnothing P$ [W]	1,677	0,588	-	-
medián P [W]	1,640	0,551	-	-
Raspberry 3B				
$\varnothing I$ [A]	0,415	-	0,389	-
medián I [A]	0,424	-	0,402	-
$\varnothing P$ [W]	2,172	0,915	2,041	0,783
medián P [W]	2,222	0,964	2,106	0,849
Raspberry 4				
$\varnothing I$ [A]	0,682	-	0,559	-
medián I [A]	0,709	-	0,565	-
$\varnothing P$ [W]	3,559	1,259	2,925	0,624
medián P [W]	3,701	1,400	2,955	0,654
Raspberry Zero W				
$\varnothing I$ [A]	0,325	-	0,184	-
medián I [A]	0,327	-	0,186	-
$\varnothing P$ [W]	1,708	1,242	0,970	0,504
medián P [W]	1,717	1,253	0,978	0,514

Samotné stahování zahrnuje několik úkonů, mezi které patří: příjem dat po síti, jejich následné uložení do paměti RAM a následný zápis na disk. Jak v grafu č. 7, tak i v grafu č. 8 jsou jmenované úkony viditelné. Jednotlivé úkony jsou v grafech rozeznatelné v úsecích s konstantní úrovní prou-

dového odběru, kdy probíhá pouze síťová aktivita v podobě příjmu dat a zápisu do paměti RAM. Konstatní úroveň odběru je následována rychlým nárůstem odběru. Náhlý nárůst proudového odběru značí zápis z paměti RAM na pevný disk – v případě Raspberry Pi je to microSD karta. Ve většině průběhů je zapisování na disk viditelné i na konci, kde lze zaznamenat prudké snížení proudového odběru, který značí konec síťové aktivity a následný nárůst odběru při zápisu dat na disk.



Obrázek 8: Graf spotřeby při stažení 1GB souboru pomocí rozhraní Wi-Fi.

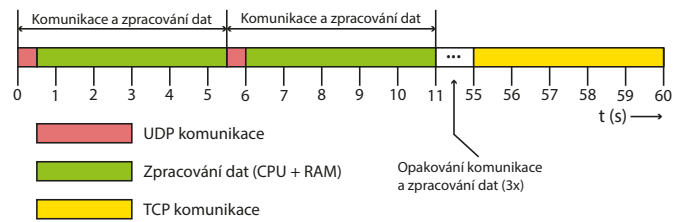
### 3.7 Aplikace výsledků na vzorový příklad

Z naměřených výsledků byly zjištěny hodnoty spotřeby v rámci jednotlivých scénářů. Pro testované modely je možné za pomoci publikovaných výsledků vytvořit vzorový příklad použití.

V rámci vzorového příkladu se uvažuje, že bude využit Lithium-polymerový akumulátor. U Lithium-polymerového akumulátoru je předpoklad samovybíjení při pokojové teplotě 20 °C méně než 5% za měsíc [10].

Jako vzorový příklad lze využít situaci, kdy bude jednodeskový počítač sloužit jako koncentrátor dat ze sensorové sítě. Předpokládaná životnost na akumulátoru je jeden měsíc. V případě vzorového příkladu je měsíc unifikován na délku 31 dní. Celkem 744 hodin. Počítač bude komunikovat s deseti zařízeními pomocí bezdrátové sítě Wi-Fi. Každá komunikace bude trvat 0,5 sekundy a bude probíhat pomocí protokolu UDP. Po každé komunikaci bude probíhat zápis do paměti RAM a zpracování dat, které bude trvat 5 sekund. Po dokončení zpracování bude výsledek odeslán na vzdálený server pomocí protokolu TCP. Celá komunikace se vzdáleným serverem bude trvat 5 sekund. Celý scénář komunikace se senzory společně s vyhodnocením a odesláním dat se bude opakovat každou hodinu. Grafické

znázornění vzorového příkladu pomocí časové osy je uvedeno v Obrázku č. 9.



Obrázek 9: Časová osa vzorového příkladu.

Pro výpočet požadované kapacity akumulátoru lze využít vzorec:

$$E = (P[W] \cdot t[h]) [Wh]$$

$$E = \frac{(P[W] \cdot t[s])}{3600} [Wh] \quad (1)$$

Kde  $P [W]$  představuje medián hodnoty spotřeby požadovaného testovaného scénáře.

Vzorec 1 bude využit pro každou akci odpovídající naměřenému scénáři. V případě vzorového příkladu se jedná o scénáře: komunikace pomocí bezdrátové sítě Wi-Fi (TCP i UDP), zápis na paměť RAM, výpočet dat pomocí CPU a nečinný stav. Vzorec bude využit celkem pětkrát.

Tabulka 7: Energie spotřebovaná za hodinu provozu.

Název činnosti	Raspberry 3B	Raspberry 4	Raspberry ZeroW
Wi-Fi UDP [Wh]	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$5,04 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$
RAM [Wh]	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$4,53 \cdot 10^{-3}$
CPU [Wh]	$3,01 \cdot 10^{-2}$	$3,77 \cdot 10^{-2}$	$7,91 \cdot 10^{-3}$
Wi-Fi TCP [Wh]	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$3,41 \cdot 10^{-3}$	$8,57 \cdot 10^{-4}$
Nečinnost [Wh]	1,23	2,26	0,46
Celkem [Wh]	1,28	2,33	0,47

Vypočtené hodnoty odpovídají spotřebě energie za jednu hodinu. Je tedy nutné hodnoty vynásobit číslem 744, které odpovídá počtu hodin v měsíci ( $31 \text{ dní} \cdot 24 \text{ hodin} = 744 \text{ hodin}$ ). Všechny hodnoty je nutné sečíst. Po sečtení a vynásobení představuje výsledná hodnota celkovou energii spotřebovanou za jeden měsíc. Posledním krokem je převést hodnoty z  $Wh$  na  $Ah$ , ve kterých se běžně uvádí kapacita baterií a akumulátorů. K převodu slouží vzorec:

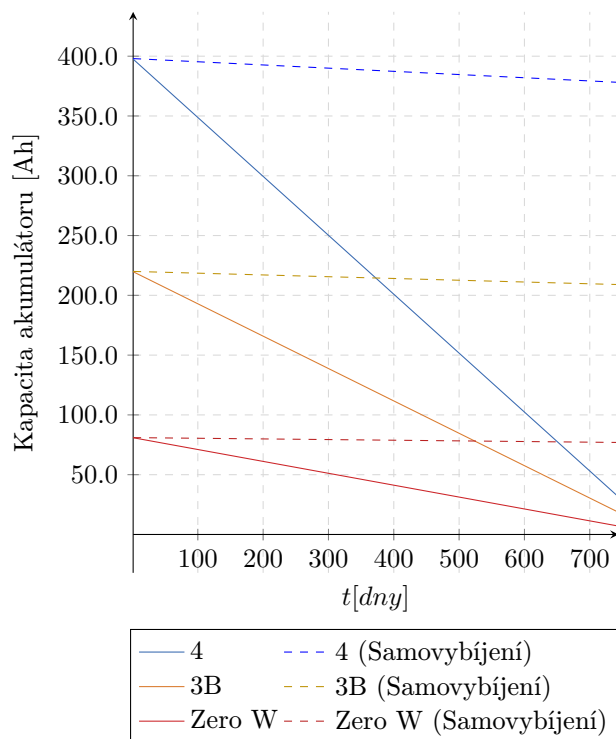
$$E = \frac{E[Wh]}{U[V]} [Ah] \quad (2)$$

Z tabulky 8 vyplývá, že pro Raspberry 4 je potřeba akumulátor s nejvyšší kapacitou, a to necelých 400 Ah, konkrétně 398 Ah. S rozdílem 178 Ah je potřebná kapacita 220 Ah akumulátoru pro model Raspberry 3B. Akumulátor s kapacitou 81 Ah je možné použít pro model Raspberry Zero W. Z výsledků vyplývá, že model Raspberry Zero W má při stejných podmínkách až pětinašobnou výdrž.

Tabulka 8: Vypočtená velikost akumulátoru s napětím 5 V.

	Předpokládaná kapacita [Ah]	Předpokládaná kapacita s rezervou +15 % [Ah]
Raspberry 3B	191,17	220
Raspberry 4	346,01	398
Raspberry ZeroW	70,07	81

V Grafu č. 10 jsou uvedeny teoretické průběhy vybíjení akumulátorů pro testované verze Raspberry Pi. V rámci průběhů je uvažované i samovybíjení akumulátoru zmiňované na začátku kapitoly. V případě samovybíjení byl aplikován model ztráty 5 % z celkové energie obsažené v akumulátoru za jeden měsíc. Model samovybíjení je znázorněn čárkovaným průběhem a je aplikován i průbězích teoretického modelu vybíjení akumulátoru spotřebou připojeného zařízení.



Obrázek 10: Graf předpokládané spotřeby ukázkového případu včetně uvažovaného samovybíjení akumulátoru.

Výpočet teoretického modelu vybíjení akumulátoru byl aplikován vždy na celou hodinu, čímž došlo k vyhlazení průběhu. Model je tedy čistě teoretický a nevychází z reálného měření.

## 4 Závěr

Tento článek se zabýval spotřebou jednodeskového počítače Raspberry Pi. Konkrétně čtyř modelů - 2, 3B, 4 a Zero W. Článek obsahoval celkem pět testovacích scénářů.

Scénáře byly vytvořeny s ohledem na činnosti jako jsou: zatížení CPU, práce s pamětí RAM a síťová komunikace. V sekci č. 2 byl stanoven systém měření včetně schéma zapojení viz Obrázek 1. Dále byly určeny nejistoty a případné odchylky měření. V podsekcí 2.2 byl popsán měřený hardware a jeho rozdíly. Ve vytvořených scénářích byly využity skripty napsané v jazyce Python3. Dále byl využit testující nástroj *stress* pro test zátěže CPU a paměti RAM.

V sekci Výsledky (3) byly popsány výsledky měření. První scénář testoval všechny modely ve stavu nečinnosti. Stav nečinnosti byl definován jako čerstvě nainstalovaný systém Raspbian bez jediného zásahu. Vše tedy běželo ve standardním módu a žádná služba nebyla nijak modifikována či vypnuta. První scénář byl rozdělen na tři podscénáře. První podscénář měřil stav nečinnosti bez připojení k datové síti. Druhý podscénář zaznamenával hodnoty spotřeby s připojením do datové sítě pomocí rozhraní Ethernet. Třetí podscénář obsahoval měření spotřeby pro připojení k bezdrátové datové síti Wi-Fi. Ze všech tří podscénářů vychází model Zero W jako nejúspornější.

Druhý scénář testoval všechny modely při plném vytížení CPU. U modelu 3B byl v grafu 4 zaznamenán mírný nárůst spotřeby v průběhu testování. Tento nárůst mohl být způsoben zahříváním čipu. Nejúspornější model byl opět Zero W.

Třetí scénář se věnoval zatížení paměti RAM. Fungoval na principu alokace a dislokace paměťových sektorů. Zde docházelo na omezení v rámci hardwarových prostředků. Méně výkonné modely (2 a Zero W) ukončovaly test předčasně. Předčasné ukončení lze pozorovat v grafu 5. Samotné předčasné ukončení bylo způsobeno zásahem jádra systému, kdy test byl přerušeno pomocí příkazu *kill*. Textový výstup, který doprovázel předčasné ukončení je uveden ve výpisu č. 7.

Čtvrtý scénář se zabýval spotřebou při komunikaci pomocí UDP protokolu. Měření spotřeby při aktivní komunikaci pomocí UDP protokolu bylo rozděleno na dva podscénáře. První podscénář byl zaměřen na komunikaci pomocí síťového rozhraní Ethernet. V prvním podscénáři byl nejúspornější model 2. Model Zero W zaznamenal v prvním podscénáři nejvyšší spotřebu. Ta byla způsobena připojením externí síťové karty skrze rozhraní USB. Druhý podscénář měřil spotřebu při UDP komunikaci pomocí bezdrátové sítě Wi-Fi. V druhém podscénáři nebyl testován model 2 kvůli absenci bezdrátového síťového rozhraní (viz podkapitola o hardware 2.2). Nejúspornější byl v druhém podscénáři opět model Zero W.

Pátý a poslední scénář byl podobný jako předchozí scénář. Namísto UDP protokolu však využíval protokol TCP. Poslední scénář obsahoval dohromady čtyři podscénáře. První dva podscénáře využívaly pro komunikaci pomocí TCP protokolu skript v jazyce Python3, který zasilal na server jednoduchou textovou zprávu. V prvním podscénáři, který pro komunikaci využíval metalické datové sítě Ethernet, jako nejúspornější vyšel model 3B. Druhý podscénář využíval pro komunikaci, stejně jako první, skript. V druhém podscénáři pro TCP komunikaci vyšel nejúspornější

model Zero W. Třetí a čtvrtý podscénáře se zakládaly na měření spotřeby při stahování binárního souboru o pevné velikosti ze sítě Internet. V případě metalické datové sítě Ethernet byl nejúspornější model 2. A pro případ bezdrátové datové sítě Wi-Fi byl nejúspornější model Zero W.

Z naměřených dat vyplývá, že nejúspornější model nese označení Zero W. Pro jednoduché operace je model Zero W vhodný. Jeho omezený výkon však může v některých případech narážet na své limity. V případě požadavku na vysoký výkon je vhodná volbou model 4. Model 4 dosahoval ze všech modelů nejvyšší spotřeby. Záleží na požadavcích aplikace, pro kterou má být jednodeskový počítač zvolen. Výkonnostně náročnější aplikace budou narážet na vyšší spotřebu a menší výdrž připojeného akumulátoru. Pokud v požadované aplikaci není důležitý výpočetní výkon je vhodné zvolit úspornou verzi Zero W.

Pro modely podporující připojení pomocí Wi-Fi byl vytvořen modelový příklad použití. Na základě vytvořeného modelu byla vypočítána teoretická kapacita akumulátoru, která je nezbytná pro plynulý chod po dobu jednoho měsíce bez dodatečného dobíjení. Pro model Raspberry Pi 4, byla vypočtená kapacita akumulátoru 398 Ah při napětí na akumulátoru 5 V. Poloviční kapacitu pro stejné podmínky modelového příkladu lze použít pro akumulátor určený k napájení modelu Raspberry Pi 3B. Konkrétně se vypočtená kapacita rovnala 220 Ah. Téměř pětinová kapacita akumulátoru dostává pro model Raspberry Pi Zero W. Nejúspornější model Zero W je možno napájet akumulátorem o kapacitě 81 Ah.

## Literatura

- [1] *Raspberry Pi FAQs*. *RaspberryPi.org* [online]. Cambridge, United Kingdom: Raspberry Pi Foundation, 2020 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <<https://www.raspberrypi.org/documentation/faqs/>>
- [2] *Raspberry Pi 4 Computer Model B: Datasheet*. Cambridge, United Kingdom, 2019. Dostupné také z: <<https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-4-Product-Brief.pdf>>
- [3] *ARDITO, Luca a Marco TORCHIANO. Creating and Evaluating a Software Power Model for Linux Single Board Computers*. In: 2018 IEEE/ACM 6th International Workshop on Green And Sustainable Software (GREENS) [online]. Gothenburg, Sweden: ACM, 2018, s. 1-8 [cit. 2020-03-04].
- [4] *Raspberry Pi 2B: Datasheet*. Cambridge, United Kingdom, 2015. Dostupné také z: [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <<https://cdn-shop.adafruit.com/pdfs/raspberrypi2modelb.pdf>>
- [5] *Raspberry Pi 3B: Datasheet*. Cambridge, United Kingdom, 2016. Dostupné také z: [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <[https://www.inet.se/files/pdf/1974044\\_0.pdf](https://www.inet.se/files/pdf/1974044_0.pdf)>
- [6] **Raspberry Pi Zero v1.3 Raspberry Pi Zero W v1.1**. Niwot, 2018. Dostupné také z: [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <[https://cdn.sparkfun.com/assets/learn\\_tutorials/6/7/6/PiZero\\_1.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/6/7/6/PiZero_1.pdf)>
- [7] **HARRINGTON, William. Learning Raspbian**. Birmingham: Packt Publishing, 2015. ISBN 978-1784392192.
- [8] **BEKAROO, Girish a Aditya SANTOKHEE. Power consumption of the Raspberry Pi: A comparative analysis**. In: 2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech) [online]. Baclava: IEEE, 2016, s. 361-366 [cit. 2019-11-17]. DOI: 10.1109/EmergiTech.2016.7737367. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7737367&isnumber=7737292>>
- [9] **Peter Pessl, Daniel Gruss, Clémentine Maurice, Michael Schwarz, & Stefan Mangard (2016). DRAMA: Exploiting DRAM Addressing for Cross-CPU Attacks**. In 25th USENIX Security Symposium (USENIX Security 16) (pp. 565–581). USENIX Association.
- [10] **SALAMEH, Z. M. a B. G. KIM. Advanced lithium polymer batteries** [online]. IEEE, 2009, 2009, , 1-5 [cit. 2020-06-24]. DOI: 10.1109/PES.2009.5275404. ISBN 978-1-4244-4241-6. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5275404/>>