

Selection of the type of cooling for an overclocked Raspberry Pi 4B minicomputer processor operating at maximum load conditions

Wybór rodzaju chłodzenia dla przetaktowanego procesora mikrokomputera Raspberry Pi 4B pracującego w warunkach maksymalnego obciążenia

Jakub Machowski*, Mariusz Dzieńkowski

Department of Computer Science, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, Poland

Abstract

The Raspberry Pi is a computer platform that is widely used in education, has a very large user community and extensive documentation. Therefore, it can be a good and cheap alternative to a traditional computer, a TV streaming device or a console for less demanding games. In the case of observing a lower efficiency of the microcomputer, one of many possibilities of improvement which this device offers is overclocking the processor. It is associated with a proper selection of parameters (voltage, clocking) and software in order to achieve the highest possible performance of the dedicated Raspbian system. However, increasing the work efficiency causes the temperature rise up to the limit values. Therefore, an appropriate, i.e. effective, kind of cooling should be applied. Taking all these circumstances into account, an experiment was developed in which temperature measurements were taken during the maximum processor load on all cores at the clock setting that enabled reaching the highest performance. During the research three cases were considered: without the use of cooling, with passive cooling and with active cooling. The obtained results showed that only the use of active cooling noticeably improves the operating conditions of the device, due to lowering the temperature by about 15°C compared to the situation without cooling or with the use of a passive radiator.

Keywords: Raspberry Pi 4B; overclocking; cooling; stress testing

Streszczenie

Raspberry Pi jest platformą komputerową, która ma szerokie zastosowanie w edukacji, posiada bardzo dużą społeczność użytkowników i bogatą dokumentację. W związku z tym może być dobrą i tanią alternatywą dla tradycyjnego komputera, przystawki do telewizora czy konsoli dla mało wymagających gier. W przypadku odczucia mniejszej wydajności pracy mikrokomputera, jedną z wielu możliwości poprawy tego stanu, które oferuje urządzenie jest przetaktowanie (ang. overclocking) procesora. Wiąże się ono z odpowiednim doбором parametrów pracy (napięcia, taktowania) i oprogramowania dla uzyskania jak najwyższej wydajności działania dedykowanego systemu Raspbian. Jednak zwiększanie wydajności pracy urządzenia powoduje wzrost temperatury aż do osiągnięcia wartości granicznych. W związku z tym należy zastosować odpowiedni, tzn. skuteczny, rodzaj chłodzenia. Uwzględniając wszystkie wymienione okoliczności, opracowano eksperyment, w którym dokonano pomiarów temperatury podczas maksymalnego obciążenia procesora na wszystkich rdzeniach przy ustawieniu taktowania, które umożliwiło uzyskanie największej wydajności. Podczas badań rozpatrywano 3 przypadki: bez użycia chłodzenia, z chłodzeniem pasywnym oraz chłodzeniem aktywnym. Na podstawie uzyskanych wyników okazało się, że tylko zastosowanie chłodzenia aktywnego wyraźnie poprawia warunki pracy urządzenia, za sprawą obniżenia temperatury o około 15°C w stosunku do sytuacji bez chłodzenia czy z zastosowaniem radiatora pasywnego.

Słowa kluczowe: Raspberry Pi 4B; przetaktowanie; chłodzenie; testowanie warunków skrajnych

*Corresponding author

Email address: jakub.machowski@pollub.edu.pl (J. Machowski)

©Published under Creative Common License (CC BY-SA v4.0)

1. Wstęp

Raspberry Pi jest komputerem jednopłytkowym mającym szerokie spektrum zastosowań m.in. w edukacji. Pracuje on pod kontrolą dedykowanego systemu operacyjnego Raspbian, który bazuje na dystrybucji Debiana [1]. System ten jest wyposażony w prawie wszystkie niezbędne języki programowania takie jak: Python, Scratch oraz C [2, 3]. Zaletą tego mikrokomputera jest jego niska cena i łatwa dostępność dla użytkowników. Mikrokomputery jednopłytkowe pozwalają na budowanie w pełni funkcjonalnych komputerów przy użyciu

urządzeń peryferyjnych dołączanych do portów wyjściowych, którymi mogą być porty USB [2, 3]. Podłączyć do nich można myszkę, klawiaturę, słuchawkę i monitor. Raspberry Pi obsługuje także urządzenia Bluetooth. Do połączenia się z internetem można wykorzystać transmisję przewodową lub bezprzewodową. Komputer jednopłytkowy jest urządzeniem uniwersalnym, łatwym w użyciu i programowaniu, zawierającym niezbędne zasoby [2, 3]. W prosty sposób można zmienić jego konfigurację: zmniejszyć lub zwiększyć taktowanie czy napięcie procesora. Na rynku istnieje obecnie wiele firm zajmujących się projektowaniem i produkcją

tego typu miniaturowych komputerów, które różnią się wielkością, parametrami czy liczbą możliwych do zastosowania kompatybilnych akcesoriów. Dla firm zajmujących się wytwarzaniem mikrokomputerów jedno-płytkowych ich użytkownicy tworzą ważną społeczność, która wymieniając się doświadczeniami, jednocześnie wspiera producenta i wytycza dalsze ścieżki rozwoju tych urządzeń. Powoduje to rosnącą popularność istniejących już modeli oraz pojawianie się ich nowszych ulepszonych wersji. Najliczniejszą liczbę użytkowników ma Raspberry Pi, zaprojektowane i produkowane przez firmę Raspberry Pi Foundation.

Najnowszy i najmocniejszy model Raspberry Pi 4B poszerza paletę zastosowań. W porównaniu do popularnego mikrokontrolera Arduino, Raspberry Pi jest w pełni funkcjonalnym komputerem [2, 3]. Jest on wyposażony w podstawowe narzędzie programistyczne jakim jest powłoka sh. Języki skryptowe cechują się dużą uniwersalnością i nie wymagają dodatkowych narzędzi obciążających procesor, takich jak kompilator, dzięki czemu mogą skoncentrować się na dokładniejszych pomiarach. Popularnymi językami skryptowymi są Perl, oraz zyskujący coraz większą popularność Python. Natomiast język powłoki sh nie jest „pełnowartościowym” językiem, ponieważ ma tylko najprostsze typy danych i dość ograniczony zbiór instrukcji. Pozwala on w łatwy sposób scalić instrukcje unixowe do jednego pliku. Skrypt sh jest plikiem tekstowym, który wykonuje dowolne polecenia i wyrażenia języka sh. Wywołany skrypt będzie uruchomiony za pomocą właściwego interpretera, w momencie gdy w pierwszej linii znajdował się będzie następujący wpis: `#!/bin/sh`. Lekki język powłoki doskonale nadaje się do prostych zadań, na przykład do przeprowadzenia procesu obciążenia procesora, wykonania pomiarów temperatury i zapisu danych do pliku [4-6].

Popularność oraz uwarunkowania licencyjne Linuxa sprawiają, że ciągle powstają nowe dystrybucje tego systemu, które mogą być bezpośrednio uruchamiane z pamięci USB. Dzięki temu system jest mobilny i konfigurowalny, umożliwia zapis danych użytkownika i aplikacji oraz trwałe ich przechowywanie. Ponadto system operacyjny można uruchamiać z poziomu karty MicroSD [5, 7, 8].

Podzespoły komputerowe dostępne obecnie na rynku dysponują zapasem mocy. W związku z tym coraz częściej spotykanym zjawiskiem jest przetaktowanie, które zmusza procesor do stabilnej pracy z wydajnością większą od skonfigurowanej fabrycznie. Przetaktowanie można zrealizować w procesorze, karcie graficznej, pamięci RAM oraz płycie głównej. W przypadku Raspberry Pi zastosowano tę operację na procesorze. W przypadku procesorów AMD do przetaktowania wykorzystuje się oprogramowanie dołączane przez producentów płyt głównych, które upraszcza dokonanie zmiany taktowania [9-12]. Przetaktowanie może być również wykonane sprzętowo poprzez połączenie odpowiednich mostków na płycie głównej lub za pomocą BIOSu i ustawień programowych [9-12]. W Raspberry Pi do zmiany taktowania wykorzystuje się metodę pro-

gramową bez ingerencji w podzespoły mikrokomputera, poprzez modyfikację ustawień w pliku konfiguracyjnym.

Zwiększanie wydajności procesora pociąga za sobą wzrost zużycia energii [9-12], co wiąże się z większym wydzieleniem się ciepła i w rezultacie skutkuje przegrzewaniem się procesora oraz pozostałych układów znajdujących się na płycie mikrokomputera. Można temu przeciwdziałać stosując chłodzenie, które ma na celu odprowadzenie ciepła wydzielanego podczas pracy urządzenia. Do wyboru są trzy metody chłodzenia: pasywne, aktywne i hybrydowe będące połączeniem dwóch pierwszych. Temperatura Raspberry Pi potrafi osiągać bardzo duże wartości ze względu na gęste rozmieszczenie podzespołów elektronicznych i małe rozmiary samej płytki drukowanej. Temperatura ma wpływ na wydajność i niezawodność urządzeń elektronicznych. Wysoka temperatura może powodować powstawanie naprężeń w konstrukcjach wykonanych z materiałów, o różnych współczynnikach rozszerzalności, zanik naprężeń w kontaktach podzespołów stykowych oraz stopniowe pogarszanie właściwości izolacyjnych materiałów. Na przykład, rezystywność powierzchniowa laminatu szklano-epoksydowego, który stosuje się do produkcji płytek drukowanych, zmniejsza się około 14 razy przy wzroście temperatury o 50°C. Wpływ temperatury na pracę eksploatowanych urządzeń elektronicznych i wywołanych za jej sprawą uszkodzeń był zagadnieniem, które przez wiele lat nurtowało całe rzesze naukowców. Z przeprowadzonych badań i wieloletnich obserwacji dotyczących niezawodności urządzeń elektronicznych wynika wiele wniosków. Na przykład wzrost temperatury o 10°C dla tranzystorów, o 15°C dla kondensatorów, o 35°C dla rezystorów, dwukrotnie zwiększa ich awaryjność. Z kolei wytrzymałość połączenia lutowniczego maleje dwukrotnie przy zmianie temperatury z 27°C na 70°C [13-15]. Ze względu na tak duży wpływ temperatury na urządzenia elektroniczne, Raspberry Pi posiada wbudowany czujnik temperatury, który umożliwia jej monitorowanie w czasie rzeczywistym. Wytwarzane obecnie, coraz mniejsze i coraz mocniejsze podzespoły elektroniczne, wydzielają znacznie więcej ciepła, dlatego aby wydłużyć ich żywotność stosuje się różne metody chłodzenia.

2. Charakterystyka mikrokomputera Raspberry Pi 4B

Raspberry Pi 4B jest najnowszą generacją popularnego mikrokomputera, który ma rozmiar karty kredytowej. Czwarta generacja tego urządzenia oferuje trzy pojemności pamięci RAM LPDDR4: 1 GB, 2 GB oraz 4 GB. Zastosowano w nim nowszej generacji procesor i rdzeń z większym taktowaniem zegara, który oryginalnie wynosi 1,5 GHz. Liczba zastosowanych innowacyjnych zmian jest większa i obejmuje: procesor Broadcom BCM2711 64-bit, rdzeń Quad-Core ARM Cortex-A72, gniazdo zasilania USB C, dwa porty USB 3.0 gniazdo typu A, port Ethernet 100/1000 Mbps, Bluetooth 5.0, dwa złącza microHDMI ze wsparciem H.265 4K 60 kl/s, OpenGL ES 3.0 [16].

wiązujące ustawienia można wyświetlić za pomocą następujących poleceń:

- `vcgencmd get_config <config>` - wyświetlenie konkretnej wartości konfiguracji;
- `vcgencmd get_config int` - wyświetlenie listy wszystkich ustawionych opcji konfiguracji liczb całkowitych (różnych od zera);
- `vcgencmd get_config str` - wyświetlenie listy wszystkich ustawionych opcji konfiguracji łańcucha (różna od null).

Istnieje także kilka ustawień konfiguracyjnych, których nie można wyświetlić za pomocą polecenia `vcgencmd`, ponieważ ono ich nie obsługuje. Plik `config.txt` jest odczytywany przez oprogramowanie rozruchowe na wczesnym etapie uruchamiania się systemu Raspbian i z tego względu posiada on prostą budowę. Każde polecenie jest pojedynczą, jednoliniową instrukcją, która wygląda następująco:

właściwość = wartość

W pliku `config.txt` istnieje możliwość dodawania komentarzy oraz wyłączenia wartości konfiguracyjnych bez konieczności usuwania linii, rozpoczynając wiersz znakiem `#` [16, 17].

Na potrzeby eksperymentu w pliku konfiguracyjnym zmodyfikowano dwa parametry, a resztę pozostawiono bez zmian z wartościami domyślnymi. Pierwszy parametr odpowiada za regulację napięcia rdzenia procesora w zakresie wartości od -16 do 8, które odpowiadają napięciom z przedziału od 0,8V do 1,4V, z interwałem 0,025V.

`over_voltage = 6`

Drugi parametr służy do ustalenia częstotliwości pracy procesora ARM, wyrażonej w megahercach (MHz). Wartość domyślna dla Raspberry Pi 4B to 700 MHz. W eksperymencie dla tego parametru przypisano najwyższą wartość 2147 Hz, stanowiącą maksymalną częstotliwość taktowania.

`arm_freq = 2147`

4.3. Opis środowiska testowego

W eksperymencie skupiono się na testowaniu procesora, który był obciążany wykonywaniem obliczeń liczb pierwszych w zakresie do 25 000. Pomysł wykorzystania tego algorytmu zaczerpnięto od autora aplikacji SysBench. Operację tą zrealizowano za pomocą poniższego polecenia:

```
sysbench --test=cpu --cpu-max-prime=25000 run
W przypadku Raspberry Pi testy należało wykonać w
wszystkich czterech rdzeniach za pomocą polecenia:
sysbench --test=cpu --cpu-max-prime=25000
--num-threads=4 run
```

Wykonywanie testu wiązało się z obciążeniem procesora w 100%, co skutkowało wzrostem jego temperatury.

5. Wyniki badań

5.1. Bez zastosowania chłodzenia

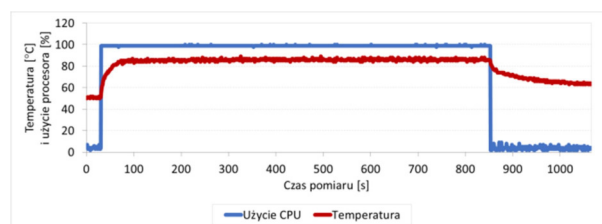
Z powodu braku szybkiego i efektywnego odprowadzenia ciepła, podczas pracy w warunkach dużego obciążenia, procesor potrafi osiągać bardzo wysokie temperatury. W momencie przekroczenia granicznej wartości

temperatury ustawionej przez oprogramowanie, następuje restart urządzenia. Ponowne uruchomienie lub całkowite wyłączenie Raspberry Pi zabezpiecza podzespoły przed ich trwałym uszkodzeniem. Rysunek 3 przedstawia mikrokomputer bez chłodzenia, użyty w tej części eksperymentu.



Rysunek 3: Mikrokomputer Raspberry Pi 4B bez chłodzenia.

Skrypt testowy został wykonany pomyślnie, obciążając maksymalnie procesor, co przedstawia rysunek 4. W tym przypadku oś X przedstawia kolejne 10660 pomiarów wykonanych w odstępie jednej 1/10 sekundy.



Rysunek 4: Temperatura i użycie procesora bez chłodzenia.

Na wykresie widoczne są wyraźny wzrost i spadek wykorzystania procesora, które odpowiadają momentom rozpoczęcia i zakończenia testu. W spoczynku użycie procesora wynosiło od 2 do 7%. W warunkach dużego obciążenia wykorzystanie procesora wahało się między 98 a 100%.

W spoczynku temperatura procesora oscylowała w pobliżu 51°C. W momencie uruchomienia skryptu obciążającego procesor jego temperatura szybko zaczęła wzrastać i utrzymywać się na stałym poziomie 85°C. Dla Raspberry Pi 4B taka temperatura jest wartością krytyczną, o czym informowany jest użytkownik poprzez wyświetlenie w rogu ekranu ikony termometru. Powrót temperatury do stanu początkowego następował bardzo powoli. Temperaturę, która ustabilizowała się na poziomie 64°C, uznano za moment zakończenia pomiaru.

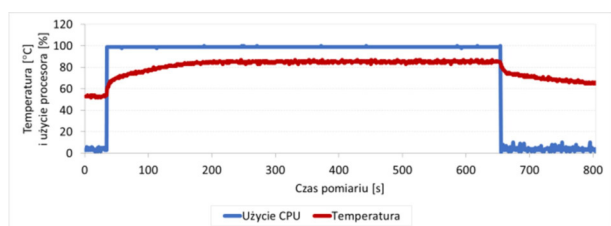
5.2. Chłodzenie pasywne

Pierwszym sposobem, mającym na celu obniżenie zbyt wysokiej temperatury procesora, było zastosowanie chłodzenia pasywnego zrealizowanego za pomocą radiatora wykonanego z tworzywa sztucznego, który umożliwiał łatwiejszą wymianę ciepła z otoczeniem. Na rysunku 5 przedstawiono urządzenie wyposażone w tego typu radiator.



Rysunek 5: Mikrokomputer Raspberry Pi 4B wyposażony w radiator.

Także w tym przypadku do maksymalnego obciążenia procesora wykorzystano skrypt testowy. Tym razem wykonano 8040 pomiary (rysunek 6). W spoczynku użycie procesora osiągało wartości od 2 do 6%, natomiast w warunkach obciążenia wahało się w granicach od 98 do 100%. Wzrost wykorzystania procesora objawił się emitowaniem dużej ilości ciepła.



Rysunek 6: Temperatura i użycie procesora z chłodzeniem pasywnym.

W spoczynku temperatura procesora oscylowała w granicach 37°C. W chwili, gdy został uruchomiony skrypt obciążający temperatura procesora zaczęła wzrastać i utrzymywała się na poziomie 83°C. W przypadku zastosowania chłodzenia pasywnego osiągnięcie temperatury krytycznej, która dla Raspberry Pi 4B wynosi 85°C, następowało wolniej niż w sytuacji bez użycia chłodzenia. Wskazuje na to mniejsze nachylenie krzywej temperatury od rozpoczęcia maksymalnego obciążenia procesora. Natomiast należy zauważyć, że po wyłączeniu obciążenia, podobnie jak to było w przypadku bez zastosowania chłodzenia, procesor schładzał się wolno.

5.3. Chłodzenie aktywne

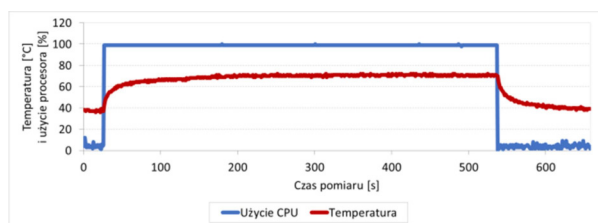
Skuteczną metodą obniżenia temperatury procesora jest chłodzenie aktywne przy użyciu wentylatora. W badaniu zastosowano chłodzenie aktywne dedykowane dla danego modelu Raspberry Pi. Wentylator powoduje wdmuchiwanie chłodnego strumienia na powierzchnię procesora, natomiast gorące powietrze jest rozpraszane w otoczeniu przez pęd powietrza. Budowę urządzenia z zamontowanym wentylatorem prezentuje rysunek 7.

W tym scenariuszu badawczym wykonano 6580 pomiarów i użyto tego samego skryptu testowego, który maksymalnie obciążał procesor.



Rysunek 7: Mikrokomputer Raspberry Pi 4B z zamontowanym wentylatorem.

Na rysunku 8 widać wyraźne momenty rozpoczęcia i zakończenia testu. W spoczynku użycie procesora osiągało wartości od 1 do 12%. W warunkach obciążenia procesora wartości wahały się od 98 do 100%.



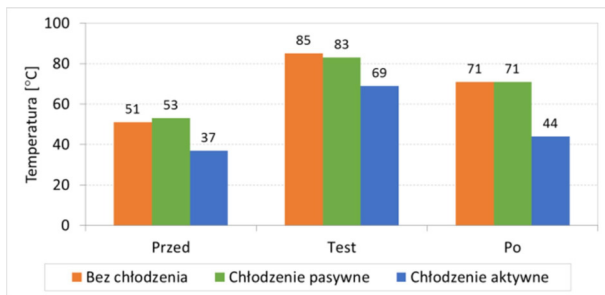
Rysunek 8: Temperatura i użycie procesora z chłodzeniem aktywnym.

W spoczynku temperatura procesora oscylowała w granicach 37°C. W momencie, gdy został uruchomiony skrypt obciążający, jego temperatura zaczęła wzrastać i utrzymywała się w okolicach 71°C. Jest to o 14°C mniej niż wynosi temperatura krytyczna dla Raspberry Pi 4B. Po zaprzestaniu obciążania procesora temperatura ustabilizowała się na poziomie 40°C i dlatego w tym momencie przerwano wykonywanie dalszych pomiarów. Procesor schłodził się dostatecznie szybko do poziomu zbliżonego przed uruchomieniem testu obliczającego liczby pierwsze.

5.4. Dyskusja wyników

Rysunek 9 przedstawia średnie temperatury procesora w trzech fazach: przed obciążeniem, w trakcie testu, po wyłączeniu obciążenia. Z wyników przedstawionych na wykresie można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Chłodzenie pasywne nie poprawiło dostatecznie wyraźnie warunków pracy procesora - podczas maksymalnego obciążenia średnia temperatura była zaledwie o 2°C niższa niż w przypadku pomiarów wykonywanych bez użycia chłodzenia.
2. Chłodzenie aktywne wyraźnie obniżyło temperaturę we wszystkich fazach działania procesora. Zaobserwowano spadek o około 14°C w fazie spoczynku przed uruchomieniem testu oraz spadek o około 16°C podczas intensywnej pracy. Po wyłączeniu obciążenia procesor schłodził się bardzo szybko, zmniejszając temperaturę o około 27°C w stosunku do temperatury zmierzonej bez użycia chłodzenia.



Rysunek 9: Zestawienie wyników pomiarów temperatury dla trzech scenariuszy badawczych.

Z wykresów przedstawionych na rysunkach 4, 6 i 8 można wyciągnąć dodatkowe wnioski:

1. Zastosowanie radiatora powodowało wolniejsze nagrzewanie się procesora w czasie pracy pod obciążeniem niż w sytuacji bez zastosowania chłodzenia. Natomiast jego schładzanie po zakończeniu testu obciążeniowego przebiegało w obu przypadkach w podobnym tempie.
2. Użycie wentylatora przyczyniło się do bardzo szybkiego obniżenia temperatury po zaprzestaniu testowania obciążeniowego.

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu i uzyskanych wyników okazało się, że maksymalne osiągi urządzenia można uzyskać po zastosowaniu chłodzenia aktywnego. W fazie przed testem, w trakcie jego trwania i po zakończeniu obciążania procesora zaobserwowano w tym przypadku wyraźnie niższą temperaturę niż w dwóch pozostałych scenariuszach badawczych.

Zastosowanie radiatora do chłodzenia procesora nie przyniosło spodziewanych korzyści. Zarówno w sytuacji bez użycia chłodzenia oraz z chłodzeniem pasywnym wyniki tylko nieznacznie się od siebie różniły. W obu tych przypadkach podobne było także tempo schładzania się procesora od chwili zaprzestania obciążania. Pełniejszą wiedzę na ten temat mógłby przynieść pomiar czasów od momentu wyłączenia testu do chwili kiedy procesor osiągnie temperaturę sprzed fazy obciążania. Jednak wykonanie takich badań byłoby trudne w realizacji, ze względu na zjawisko magazynowania ciepła i powolny proces jego oddawania do otoczenia. Przyczyną niewielkiej skuteczności radiatora mogła być niska jakość zastosowanego materiału użytego do zamocowania radiatora na procesorze. Choć zamontowany był on prawidłowo, za pomocą fabrycznie dołączonej taśmy termoprzewodzącej, to przewodność cieplna tego połączenia mogła być zbyt niska.

Zrealizowany eksperyment miał na celu weryfikację hipotez postawionych w niniejszej pracy. Na podstawie wyników można stwierdzić, że hipoteza pierwsza nie została potwierdzona, ponieważ zastosowanie chłodzenia pasywnego nie poprawiło warunków działania urządzenia. Natomiast hipoteza druga została potwierdzona, z tego względu, że zastosowanie chłodzenia aktywnego znacznie poprawiło warunki pracy, obniżając temperaturę podczas intensywnej działania procesora o około 16°C i zapobiegło resetowaniu się urządzenia.

Badania wykonane w ramach tej pracy mają pewne ograniczenia. Małe wymiary płytki Raspberry Pi 4B nie pozwalały na zastosowanie większych i cięższych radiatorów lub wentylatorów. Pewnym problemem były również małe rozmiary samego procesora, co uniemożliwiało zastosowanie radiatorów takich, jakie są montowane na typowych procesorach popularnych komputerów. W tej sytuacji w przeprowadzonych badaniach ograniczono się więc tylko do akcesoriów dedykowanych dla Raspberry Pi.

Literatura

- [1] Raspbian, <https://www.raspbian.org>, [21.02.2020].
- [2] S. Szablowski, Raspberry Pi jako środowisko edukacyjne, Uniwersytet Rzeszowski, 2018.
- [3] A. Pajankar, Raspberry Pi Supercomputing and Scientific Programming, 2017.
- [4] G. J. Nalepa, Podstawy programowania skryptów Sh, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2000.
- [5] R. Blum, C. Bresnahan, Linux Command Line and Shell Scripting Bible, USA, 2008.
- [6] C. Johnson, Shell Scripting Recipes. A Problem-Solution Approach, 2005.
- [7] J. Kaczmarek, M. Wróbel, Funkcjonalność systemu operacyjnego Linux uruchamianego z pamięci USB, Zeszyty Naukowe Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 28 (2010) 81-84.
- [8] D. Norris, Raspberry Pi: niesamowite projekty: miniaturowy komputer i jego wielka moc!, Helion, Gliwice, 2014.
- [9] K. Gązwa, P. Gązwa, A. Sprawka, Overclocking a zużycie energii, Zeszyty Naukowe WSEI. Seria Transport i Informatyka 4 (2014) 19-27.
- [10] T. Walsh, How to overclock your PC's CPU, PCWorld, 2017.
- [11] PCWorld, Free Speed: Overclocking Your PC, PCWorld, 2005.
- [12] E. Rohou, M. D. Smith, Dynamically Managing Processor Temperature and Power, In In 2nd Workshop on Feedback-Directed Optimization (1999).
- [13] J. Ćwirko, R. Ćwirko, Skaning temperatury jako narzędzie diagnostyczne modułów elektronicznych, Diagnostyka 4 (40) (2008) 77-80.
- [14] B. Chacos, How to check your PC's CPU temperature, PC World, 2005.
- [15] Praca zbiorowa pod kier. J. Kijaka, Odporność klimatyczna i wytrzymałość mechaniczna sprzętu elektronicznego, WKiŁ, 1963.
- [16] Raspberry Pi, <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>, [12.02.2020].
- [17] W. Gay, Advanced Raspberry Pi. Raspbian Linux and GPIO Integration, 2018.
- [18] config.txt, <https://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/config-txt/README.md>, [16.03.2020].