

Зінченко Д.Д.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Маріяш Ю.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КООРДИНОВАНЕ КЕРУВАННЯ ЧАСТОТОЮ CPU ТА GPU ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА КОМФОРТУ КОРИСТУВАЧА МОБІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

У даній роботі розглядається одна з ключових проблем сучасної мобільної електроніки – перегрів корпусу пристроїв, що є прямим наслідком зростаючої обчислювальної потужності систем-на-кристалі та обмежених можливостей пасивного тепловідведення. Ця проблема виходить за рамки технічних недоліків, оскільки підвищення температури поверхні вище 45 °C викликає значний фізичний дискомфорт у користувача та суттєво погіршує загальний досвід експлуатації. Метою дослідження є розробка та експериментальна оцінка нового координованого підходу до динамічного регулювання температури, який би ефективно вирішував фундаментальний конфлікт між прагненням до максимальної продуктивності та необхідністю забезпечення комфорту. На відміну від поширених промислових рішень, що базуються на примітивних позиційних регуляторах або ігнорують внесок графічного процесора, запропоновано комплексну систему керування на основі цифрового Пропорційно-Інтегрально-Диференціального регулятора. Наукова новизна підходу полягає у впровадженні механізму координованого розподілу керуючої дії між центральним та графічним процесорами. Цей розподіл здійснюється динамічно, пропорційно до їхнього реального внеску в поточне навантаження, який оцінюється за допомогою більш точної метрики фактичного навантаження (*effective load*), а не спрощеної утилізації. Ефективність розробленої системи було перевірено на комерційному смартфоні в умовах різних сценаріїв навантаження (CPU-орієнтований бенчмарк *Whetstone* та графічно-інтенсивний *3DMark Wild Life*) та порівняно зі штатною системою регулювання. Результати експериментів продемонстрували значні переваги запропонованого методу: було досягнуто одночасного приросту середньої продуктивності на 3,5–8,2% та зменшення частки часу, протягом якої корпус пристрою був перегрітим, на 55–65%. Крім того, забезпечено значно вищу стабільність продуктивності, що є критичним для вимогливих додатків. Таким чином, доведено, що розроблений підхід дозволяє досягти кращого балансу між обчислювальною потужністю та тепловою безпекою, що має високу практичну цінність для підвищення якості користувацького досвіду сучасних мобільних пристроїв.

Ключові слова: динамічне керування тепловим режимом, ПІД-регулятор, регулювання температури корпусу, система-на-кристалі, мобільний пристрій, тротлінг продуктивності.

Постановка проблеми. Сучасні мобільні пристрої, що функціонують на базі складних систем-на-кристалі (англ. *system on a chip*, SoC), виконують дедалі більш ресурсомісткі обчислювальні завдання [1]. Поширення вимогливих додатків, таких як ігри з високою якістю графіки та застосунок доповненої реальності, стимулює постійне масштабування продуктивності мобільних процесорів [2]. Цей процес, що часто реалізується шляхом збільшення кількості обчислювальних ядер та підвищення їх тактових частот, неминуче призво-

дить до зростання концентрації потужності та, як наслідок, до значних теплових викликів [3].

Ключова проблема полягає в тому, що компактні корпуси мобільних пристроїв мають обмежені можливості для розсіювання тепла, що генерується високопродуктивними SoC. Ця неефективність тепловідведення є прямою причиною підвищення температури зовнішньої оболонки пристрою [4]. Нагрівання корпусу не є суто технічним недоліком; воно має прямий і вимірюваний вплив на користувача. Дослідження пока-

зують, що температура поверхні, яка перевищує 45 °C, викликає значний дискомфорт у понад 75% користувачів [5]. Більше того, перегрів призводить до негативних наслідків, включаючи фізичний біль та погіршення емоційного стану, що суттєво знижує загальну задоволеність від використання пристрою [6]. Відчуття дискомфорту може зберігатися до однієї години навіть після завершення роботи з пристроєм, що підкреслює довготривалий негативний вплив цієї проблеми [7]. Таким чином, виникає фундаментальний конфлікт між прагненням до максимальної обчислювальної продуктивності та необхідністю забезпечення фізичного комфорту та позитивного користувацького досвіду, що робить керування температурою корпусу критично важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення проблеми перегріву в мобільних системах активно розробляються та впроваджуються методи динамічного керування температурним режимом (Dynamic Thermal Management, DTM), огляд яких представлено в [8]. Історично, в промислових та вбудованих системах домінуючими підходами є використання позиційних (релейних) регуляторів та пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів [9]. Однак їх застосування в мобільних SoC стикається з низкою обмежень.

Багато існуючих стратегій регулювання температури корпусу зосереджені виключно на керуванні частотою центрального процесора (CPU), ігноруючи внесок графічного процесора (GPU) у загальне тепловиділення [10]. Такий підхід є неповним, оскільки сучасні робочі навантаження, особливо ігрові, інтенсивно використовують обидва обчислювальні модулі. Дослідження [11] переконливо демонструє, що незалежне та неузгоджене «дроселювання» (throttling) CPU та GPU є недоречним для сучасних мобільних завдань. Подібна неузгодженість призводить до суттєвого погіршення продуктивності основного додатка, що прямо шкодить користувацькому досвіду [12].

Хоча необхідність у скоординованій стратегії керування CPU та GPU визнається, залишається відкритою критична проблема: як саме динамічно та інтелектуально розподіляти керуючий вплив між цими двома основними джерелами тепла. Сучасні підходи не мають механізму адаптації стратегії дроселювання залежно від специфіки активного робочого навантаження, де відносний внесок CPU та GPU може кардинально змінюватися.

В академічному середовищі існують більш досконалі методи керування, такі як керування з прогнозуючими моделями (Model Predictive Control) або концепція цифрових двійників, проте ці підходи ще не знайшли широкого застосування в комерційних мобільних пристроях через свою обчислювальну складність та вимоги до ресурсів. Таким чином, існує чітко окреслена науково-технічна прогалина у створенні ефективного, адаптивного та практичного для реалізації механізму спільного керування температурою ЦП та ГП.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та оцінка нового підходу до регулювання температури корпусу смартфона, який спільно керує частотами центрального та графічного процесорів, зважуючи і розподіляючи керуючу дію для CPU і GPU.

Виклад основного матеріалу.

1. Архітектура системи керування

Контур керування побудовано на принципі від'ємного зворотного зв'язку (Рисунок 1). У ролі контрольованої змінної (PV), виступає температура корпусу пристрою T_{shell} , значення якої зчитується з вбудованого датчика температури. Цей параметр зіставляється з уставкою (SP), що відповідає пороговому рівню температури, за якого користувач починає відчувати дискомфорт (тобто, 45 °C). Результатом порівняння є сигнал відхилення $e(t) = SP(t) - PV(t)$, що передається на вхід ПІД-регулятора.

У якості регулятора використано класичний ПІД-контролер (1), реалізований відповідно до стандарту ISA [13]. До його складу входить фільтр похідної складової, що зменшує вплив високочастотних коливань, типових для температурних сигналів, на ефективність системи. Налаштування регулятора включають коефіцієнт підсилення K_p , сталі часу інтегрування T_i та диференціювання T_d , а також параметр фільтру N , що представляє собою співвідношення між T_d і сталою часу додаткового фільтруючого кореня. У цій неперервній передатній функції s є комплексною змінною перетворення Лапласа, що використовується для представлення динаміки системи в частотній області.

$$W_{PID} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + (T_d s) / N} \right) \quad (1)$$

Дану стратегію керування було дискретизовано за допомогою методом білінійного перетворення (перетворення Тастіна) (2), у результаті чого отримано дискретну форму (3), придатну для використання в умовах реального середовища мобільного пристрою.

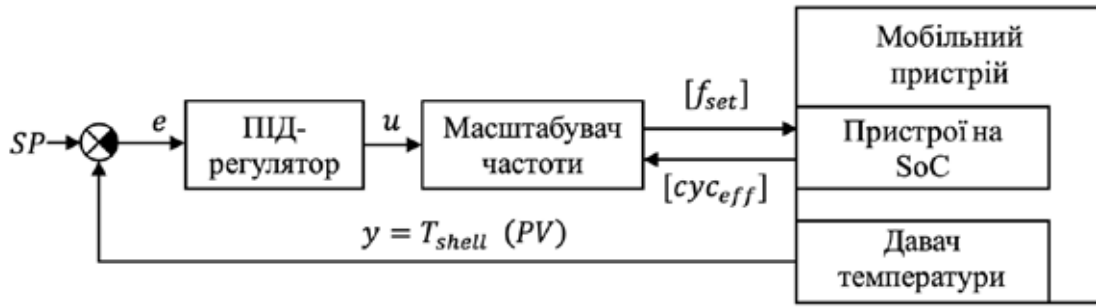


Рис. 1. Структура системи керування

$$s = \frac{2}{T_s} * \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (2)$$

$$W(z) = K_p \left(1 + \frac{T_s(z+1)}{2T_i(z-1)} + \frac{2T_d N(z-1)}{z(2T_d + NT_s) + (NT_s - 2T_d)} \right), \quad (3)$$

де T_s позначає період дискретизації. Застосоване перетворення здійснює відображення неперервної площини s у дискретну площину z . В отриманій дискретній моделі змінна z виступає у ролі комплексної змінної Z -перетворення, а вираз z^{-1} розглядається як оператор одиничного часового зсуву (затримки на один такт).

Для розрахунку керуючої дії, прикладеної до кожного з пристроїв на SoC, у контур керування введено масштабувач частоти. Реалізація асиметричного координованого керування полягає в масштабуванні керуючої дії відносно поточного теплового внеску окремого пристрою, який можна опосередковано оцінити за його навантаженням. Зазвичай, поточне навантаження вимірюється метрикою утилізації (utilization), що розраховується як частка часу, коли елемент виконував роботу – був не у стані простою:

$$util = 1 - \frac{t_{idle}}{t_{total}}, \quad (4)$$

де t_{idle} – відрізок часу, протягом якого процесор знаходився у стані простою, t_{total} – відрізок часу всього виміру.

Але, утилізація не показує реального навантаження на систему: навіть якщо процесор очікує відповідь від периферійного пристрою, таке очікування вважається активним і не класифікується як простій [14]. Більше того, ця метрика є залежною від встановленої частоти конкретного пристрою: при збільшенні частоти, утилізація зменшиться через зменшення часу виконання процесів, що може призвести до нестабільностей під час керування.

Для більш точної оцінки поточного навантаження системи було застосовано метрику effective

load – фактичного навантаження на елемент (5), що визначається як пропорція корисних тактових циклів cyc_{eff} – циклів які були витрачені на проведення розрахунків, до загального числа тактових циклів пристрою cyc_{total} за деякий період часу.

$$EL = \frac{cyc_{eff}}{cyc_{total}} \quad (5)$$

Для координованого керування в умовах асиметрії SoC, кожному елементу системи надається зважений коефіцієнт впливу, що визначає силу керуючої дії для цього пристрою. Зваження здійснюється пропорційно до нормованої метрики навантаження:

$$w_i = \frac{EL_i}{\sum_{j=0}^n EL_j}, \quad (6)$$

де w_i – вага керуючої дії для i -го пристрою, EL_i – фактичне навантаження цього пристрою, n – кількість керованих пристроїв.

Оскільки кожен із керованих обчислювальних блоків підтримує власний набір частот, що не є неперервним, модуль масштабування частоти також виконує перетворення зваженої керуючої дії на частоту до встановлення на елементи системи. Для цього, зважена керуюча дія $u \cdot w_i$ лінійно масштабується в допустимому діапазоні частот $[f_{min}, f_{max}]$, для отримання цільової частоти f_{target} (7). Після цього з наявного дискретного набору підтримуваних частот $f_{supported}$, обирається найближче значення f_{set} , яке й подається на пристрій (8).

$$f_{target,i} = f_{min,i} + u \cdot w_i \cdot (f_{max,i} - f_{min,i}) \quad (7)$$

$$f_{set,i} = \operatorname{argmin}_{f \in f_{supported,i}} |f_{target,i} - f| \quad (8)$$

Таким чином, пристрої з вищим реальним внеском у поточне навантаження та потенційно більшим тепловиділенням отримують пропорційно сильнішу корекцію керуючої дії, що дозволяє більш ефективно розподіляти теплові обмеження.

Для коректного налаштування регулятора було проведено ідентифікацію об'єкта керування. Його динаміку було апроксимовано моделлю другого порядку з запізненням і нулем:

$$W_m = K \frac{T_2 s + 1}{T_1^2 s^2 + 2\xi T_1 s + 1} e^{-\tau s}, \quad (9)$$

де K – коефіцієнт передачі, T_1 та T_2 – сталі часу, ξ – коефіцієнт демпфування та τ – час запізнення. В результаті ідентифікації ці параметри набули значень $K = 0.805 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$, $T_1 = 338.82 \text{ c}$, $T_2 = 291.31 \text{ c}$, $\xi = 1.69$ і $\tau = 5 \text{ c}$. На основі отриманої моделі параметри ПД-регулятора було розраховано за експрес-методом, запропонованим Chien et al. (2003) (15) для даного типу систем, що дало змогу визначити такі налаштування: $K_p = 9.587 \text{ } \%/^\circ\text{C}$, $T_i = 1136 \text{ c}$, $T_d = 82.75 \text{ c}$, $N = 10$.

2. Експериментальна платформа

Для експериментальної валідації було обрано мобільний пристрій серійного виробництва ZTE Nubia RedMagic 7s Pro, оснащений системою на кристалі Qualcomm SM8450 Snapdragon 8 Gen 1. Ця SoC широко представлена в сучасних комерційних смартфонах, що дозволяє екстраполювати результати дослідження на досить широкий спектр пристроїв. Вона вміщає в собі центральний процесор, графічний процесор, та набір різноманітних апаратних модулів.

Центральний процесор цієї системи має три-кластерну архітектуру, що включає енергоефективний кластер «Little», продуктивний кластер «Big» та високопродуктивне ядро «Prime». У рамках реалізації системи керування, активне регулювання охоплювало лише кластери «Big» та «Prime», оскільки тепловий вплив «Little» кластеру на загальну температуру корпусу був визнаний неістотним за результатами попереднього аналізу. Крім центрального процесора, керуючий вплив також поширювався на графічний процесор, який є значним джерелом тепловиділення під час виконання графічно-інтенсивних обчислень.

Для реалізації зчитування даних та накладення керуючих дій було використано стандартні механізми, доступні в середовищі Android. Зокрема, для моніторингу та зміни тактових частот центрального і графічного процесорів застосовувалися інтерфейси файлової системи «sysfs», які забезпечують доступ до керування енергетичними параметрами апаратних компонентів. Зчитування температури корпусу здійснювалося через відповідний віртуальний сенсор, також доступний через «sysfs». Для отримання інформації про кількість корисних (активних) тактових циклів

використовувалася системна утиліта «perf», яка забезпечує доступ до апаратних лічильників продуктивності системи на кристалі.

Оцінку ефективності запропонованої системи керування було здійснено шляхом її порівняння з штатною системою регулювання температури корпусу у смартфоні. Ця система реалізує позиційний регулятор, який накладає обмеження на тактові частоти CPU та GPU при досягненні температурою корпусу порогу $46 \text{ } ^\circ\text{C}$ та скасовує їх при зниженні температури до $44 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Усі експериментальні дослідження проводилися в стандартизованих контрольованих умовах, що забезпечували відтворюваність результатів та коректність порівняння. Температура навколишнього середовища підтримувалася на постійному рівні $25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Перед кожним запуском тестів пристрій охолоджувався до температури корпусу $35 \text{ } ^\circ\text{C}$, яка визначалася як початкова точка вимірювання.

3. Методика експерименту

З метою об'єктивного аналізу впливу різних алгоритмів керування на продуктивність та теплову стабільність пристрою було проведено тестування у двох сценаріях з різним комплексом навантажень на компоненти SoC.

Перший сценарій передбачав вимірювання обчислювальної потужності центрального процесора. Для цього застосовувався бенчмарк Whetstone, який реалізує стандартизований набір обчислень з використанням як цілочисельної арифметики, так і операцій з плаваючою комою. Цей тест дозволяє оцінити пікову продуктивність CPU у вигляді кількості виконаних інструкцій Whetstone за одиницю часу (WIPS). З урахуванням гетерогенної архітектури процесора, програмне забезпечення було адаптовано таким чином, щоб забезпечити збалансований розподіл операційного навантаження між потоками, тим самим мінімізуючи вплив внутрішньої конфігурації на результати.

Другий сценарій був орієнтований на моделювання реального користувацького навантаження в умовах високої графічної інтенсивності. Для цього використовувався Wild Life Extreme Stress Test із пакету 3DMark, який є галузевим стандартом для стрес-тестування мобільних графічних підсистем. Він виконує тривалий рендеринг складних 3D-сцен із високою частотою оновлення кадрів, залучаючи як CPU, так і GPU. Основною метрикою, що фіксувалася під час проходження тесту, була частота кадрів (FPS, к/с), яка безпосередньо характеризує здатність системи забезпечу-

вати стабільний рівень продуктивності в умовах тривалого теплового навантаження.

4. Оцінка ефективності та результати

На рисунку 2 представлено температуру корпусу T_{shell} , обмеження тактових частот графічного процесора ($f_{lim, GPU}$), а також кластерів «Big» ($f_{lim, Big}$) та «Prime» ($f_{lim, Prime}$) центрального процесора під час виконання запланованих сценаріїв з штатною та запропонованою системами керування. З цих рисунків помітно, що запропонована система значно зменшила перегрів корпусу пристрою та забезпечила ефективний розподіл керуючої дії між керованими компонентами. Це розподілення дозволило запобігти агресивному зменшенню частоти компонентів, які не виконують велику кількість роботи, аби зберегти їх у режимі підвищеної готовності для обслуговування фонових або майбутніх процесів.

Як видно з даних, наведених у таблиці 1, використання запропонованої системи керування під час виконання бенчмарку Whetstone забезпечило

приріст продуктивності на 3,5% порівняно зі штатним підходом. Окрім цього, було досягнуто суттєвого покращення теплових характеристик: частка часу, протягом якого температура корпусу перевищувала комфортний рівень у 45 °C, зменшилася на 64,6%, а максимальне температурне значення також знизилася.

У випадку бенчмарку 3DMark спостерігалось ще виразніше поліпшення. Продуктивність зросла на 8,2%, тоді як частка часу перегріву скоротилася на 55,8%, що свідчить про більший потенціал покращення теплових характеристик пристрою за умов інтенсивнішого навантаження. Пікова температура корпусу при цьому також виявилася нижчою, ніж у випадку застосування штатної системи регулювання.

Крім того, дані на рисунку 3 свідчать, що застосування плавного регулювання дозволило досягти значно вищого рівня стабільності продуктивності в часі, що є результатом усунення агресивних спадів частоти, викликаних логікою позиційного керування.

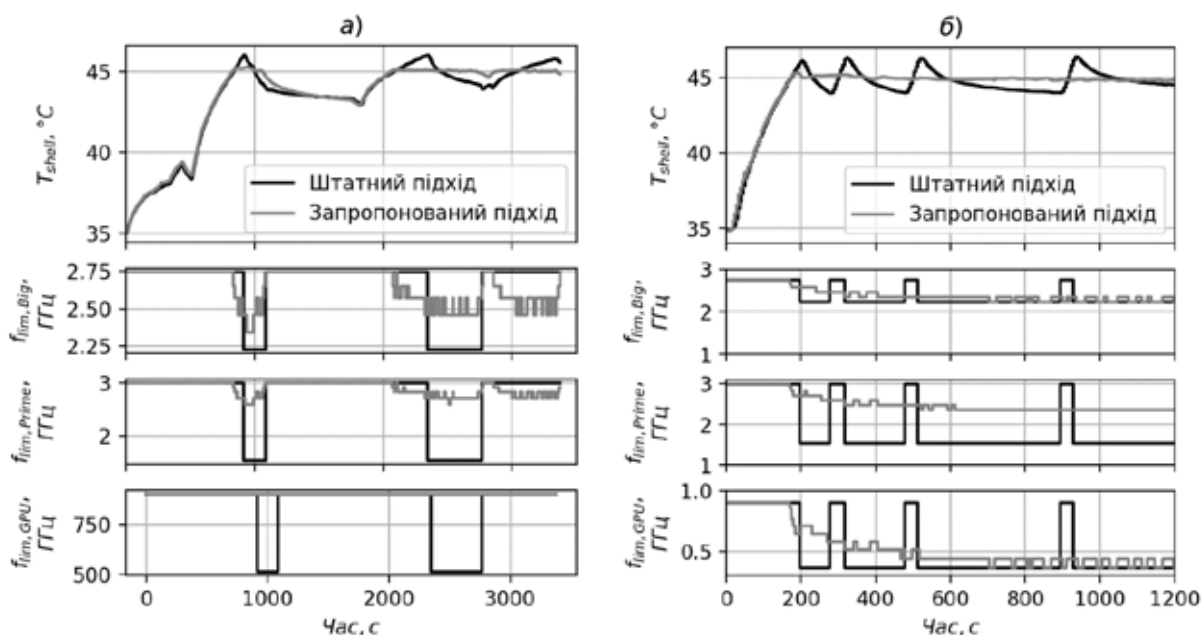


Рис. 2. Порівняння експлуатаційних показників смартфона під час оцінки стратегій керування на бенчмарках Whetstone (а) та 3DMark (б)

Таблиця 1
Порівняння продуктивності та теплових характеристик при виконанні бенчмарків Whetstone та 3DMark для штатної та запропонованої систем керування

Сценарій	Підхід	Результат бенчмарку	Частка часу перегріву, %	Пікова температура, °C
Whetstone	Штатний	4340.2 MWIPS	23.05	46.0
	Запропонований	4491.8 MWIPS	8.16	45.2
3DMark	Штатний	38.93 к/с	23.16	46.3
	Запропонований	42.13 к/с	10.22	45.2



Рис. 3. Порівняння середньої частоти кадрів за раундами бенчмарку 3DMark

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу як з погляду підвищення обчислювальної продуктивності, так і з огляду на покращення теплових характеристик пристрою. Таким чином, впровадження системи інтелектуального керування дає змогу досягти кращого балансу між продуктивністю та тепловою безпекою під час виконання ресурсоємних задач на мобільних пристроях.

Висновки. У даній роботі було вирішено актуальну науково-технічну проблему керування температурою корпусу мобільних пристроїв, що виникає через конфлікт між зростаючою продуктивністю систем-на-кристалі та обмеженими можливостями тепловідведення. Метою дослідження була розробка та оцінка нового підходу до спільного керування частотами центрального та графічного процесорів, який би адаптувався до поточного навантаження.

Запропонований підхід базується на ПІД-регуляторі, ключовою особливістю якого є координованій розподіл керуючої дії між CPU та GPU. На відміну від стандартних методів, які використовують неточну метрику утилізації, розроблена система застосовує показник фактичного навантаження (effective load). Це дозволяє динамічно зва-

жувати вплив на кожен процесор пропорційно до його реального внеску в поточне обчислювальне завдання та, відповідно, у загальне тепловиділення.

Експериментальна валідація на комерційному смартфоні продемонструвала значні переваги розробленої системи порівняно зі штатною логікою позиційного регулювання.

- У сценарії з інтенсивним навантаженням на CPU (бенчмарк Whetstone) було досягнуто приросту продуктивності на 3,5% при одночасному зменшенні часу перегріву корпусу вище 45 °C на 64,6%.

- У змішаному сценарії, що імітує сучасні ігри (бенчмарк 3DMark), переваги були ще більш вираженими: продуктивність зросла на 8,2%, а частка часу перегріву скоротилася на 55,8%.

- Запропонований плавний метод регулювання забезпечив значно вищу стабільність продуктивності, усунувши різкі просідання частоти кадрів, характерні для штатних систем.

Таким чином, розроблена система керування ефективно вирішує поставлене завдання, забезпечуючи кращий баланс між обчислювальною потужністю та комфортом користувача. Вона дозволяє мобільному пристрою підтримувати вищий рівень продуктивності протягом тривалого часу, не допускаючи дискомфортного нагрівання корпусу.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення системи для охоплення всіх значущих джерел тепла на SoC, включно з нейронним процесором та контролером пам'яті. Ключовим етапом стане перехід від реактивного до проактивного керування шляхом розробки предиктивних алгоритмів, які дозволять прогнозувати та нейтралізувати теплові навантаження ще до їхнього виникнення, що виведе ефективність терморегуляції на якісно новий рівень.

Список літератури:

1. Review of task-scheduling methods for heterogeneous chips / Z. Miao et al. Electronics. 2025. Vol. 14, no. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics14061191>.
2. Li X., Li G. An adaptive CPU-GPU governing framework for mobile games on big.little architectures. IEEE transactions on computers. 2021. Vol. 70, no. 9. P. 1472–1483. URL: <https://doi.org/10.1109/TC.2020.3012987>.
3. Panchal V. Thermal and power management challenges in high-performance mobile processors. International journal of innovative research in science, engineering and technology. 2024. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2024.1311014>.
4. An overview of thermal challenges and opportunities for monolithic 3D ics / P. Shukla et al. Proceedings of the 2019 great lakes symposium on VLSI. New York, NY, USA, 2019. P. 439–444. URL: <https://doi.org/10.1145/3299874.3319485>.
5. Fire in your hands: understanding thermal behavior of smartphones / S. Kang et al. The 25th annual international conference on mobile computing and networking. New York, NY, USA, 2019. URL: <https://doi.org/10.1145/3300061.3300128>.

6. Does heat matter in phone usage? Antecedents and consequences of mobile thermal satisfaction / A. Zhang et al. Cross-Cultural design. culture and society / ed. by P.-L. P. Rau. Cham, 2019. P. 421–431.
7. The influence of smartphones' operation modes on the superficial temperature distribution in the human auricle region / J. Bauer et al. Journal of thermal analysis and calorimetry. 2018. Vol. 133, no. 1. P. 559–569. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7047-8>.
8. A survey on energy management for mobile and iot devices / S. Pasricha et al. IEEE design & test. 2020. PP. P. 1–1. URL: <https://doi.org/10.1109/MDAT.2020.2976669>.
9. Stepanets O., Mariiash Y. Analysis of influence of technical features of a PID-controller implementation on the dynamics of automated control system. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2018. Vol. 3. P. 60–69. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132229>.
10. Chetoui S., Reda S. CasCon: cascaded thermal and electrical current throttling for mobile devices. IEEE embedded systems letters. 2021. PP. P. 1–1. URL: <https://doi.org/10.1109/LES.2021.3079707>.
11. Integrated CPU-GPU power management for 3D mobile games / A. Pathania et al. 2014. URL: <https://doi.org/10.1145/2593069.2593151>.
12. Adaptive thermal property control technique for holistic thermal management of mobile devices / K. Lee et al. IEICE electronics express. 2018. Vol. 15. URL: <https://doi.org/10.1587/elex.15.20180187>.
13. ISA TR5.9-2023. Proportional integral derivative (PID) algorithms and performance / ISA Subcommittee 5.9. International society of automation, 2023.
14. Cockcroft A. Utilization is virtually useless as a metric!. 2006. P. 557–562.
15. O'dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd edition). World Scientific Publishing Company, 2009.

Zinchenko D.D., Mariiash Yu.I. COORDINATED CONTROL OF CPU AND GPU FREQUENCIES TO ENHANCE PERFORMANCE AND USER COMFORT IN MOBILE DEVICES

This paper addresses a key challenge in modern mobile electronics: device shell overheating, a direct consequence of the escalating computational power of Systems-on-Chip and constrained passive thermal dissipation. This issue extends beyond a mere technical drawback, as a surface temperature exceeding 45 °C causes significant physical discomfort for the user and substantially degrades the overall user experience. The objective of this study is to develop and experimentally evaluate a novel coordinated approach to dynamic thermal management that effectively resolves the fundamental trade-off between maximizing performance and ensuring user comfort. In contrast to prevalent industry solutions, which often rely on rudimentary threshold-based controllers or neglect the contribution of the graphics processing unit, we propose a comprehensive control system based on a digital Proportional-Integral-Derivative controller. The scientific novelty of this approach lies in the implementation of a mechanism for intelligent allocation of the control action between the central and graphics processing units. This allocation is performed dynamically, in proportion to their respective contributions to the current workload, which are assessed using a more precise “effective load” metric instead of conventional utilization. The efficacy of the proposed system was evaluated on a commercial smartphone under various workload scenarios (the CPU-intensive Whetstone benchmark and the graphically intensive 3DMark Wild Life) and compared against the stock thermal management system. The experimental results demonstrated the significant advantages of the proposed method: a simultaneous increase of 3.5–8.2% in average performance and a 55–65% reduction in the duration of overheating events were achieved. Furthermore, the system provided significantly higher performance stability, which is critical for demanding applications. Thus, the proposed approach is demonstrated to achieve a superior balance between computational power and thermal safety, holding significant practical value for improving the user experience on contemporary mobile devices.

Key words: dynamic thermal management (DTM), PID controller, skin temperature control, System-on-Chip (SoC), mobile device, performance throttling.

Дата надходження статті: 22.07.2025

Дата прийняття статті: 31.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025