

**ЛЕКЦІЯ № 4**  
з навчальної дисципліни  
**«Архітектура і технології IoT»**

**Тема лекції: Інтелектуальні кінцеві точки та живлення в IoT**

**Питання лекції**

1. Інтелектуальні кінцеві точки IoT
2. Відеосистема
3. Принципи злиття датчиків
4. Пристрої виведення (виконавчі пристрої)
5. Джерела енергії та управління живленням

**ВСТУП**

Інтернет речей (IoT) починається з джерел даних або виконавчих пристроїв. З погляду IoT як мережі, вони називаються **кінцевими точками**, і, маючи вихід в Інтернет, вони можуть бути об'єднані в єдину мережу. Під час обговорення IoT в цілому, розгляд фактичних джерел даних часто ігнорується. Що таке ці джерела? Це датчики, а дані, які вони надають, утворюють розподілені по часу потоки даних. Для таких потоків необхідно забезпечити можливість передачі, аналізу та збереження інформації.

При розгортанні IoT необхідно враховувати безліч аспектів: вартість, опціонально, розміри, тривалість безаварійної роботи і точність вимірювань. Крім того, в літературі по IoT потужність і енергія, що споживаються периферійними пристроями, розглядаються рідко, але саме ці показники мають вирішальне значення при створенні надійних і довговічних технологій.

**1. Інтелектуальні кінцеві точки IoT**

До сих пір ми розглядали дуже прості датчики, які просто повертали інформацію в двійковій або аналоговій формі, яку ще треба обробляти. Однак існують пристрої і датчики IoT, які мають значну обчислювальною потужністю і продуктивністю, достатньою для самостійного опрацювання даних і прийняття рішень. Інтелектуальні датчики мають в своєму складі такі пристрої, як відеокамери і навіть цілі системи відеоспостереження. Такі датчики можуть виробляти значні обсяги обчислень завдяки вбудованим процесорам цифрового сигналу: ПЛІС (програмована логічна інтегральна схема) і призначеним для користувача ASIC (application-specific integrated circuit - інтегральна схема спеціального призначення). У цьому розділі ми детально розглянемо одну з форм інтелектуального сенсора: відеосистему.

## 2. Відеосистема

На відміну від простих датчиків, розглянутих раніше, відеосистеми набагато складніше, оскільки вимагають серйозного апаратного забезпечення, оптики і світлочутливих матриць зображення. Такі системи починаються з об'єктива, за допомогою якого здійснюється спостереження. Об'єктив забезпечує не тільки різкість зображення, а й велику світлочутливість активного елемента. У сучасних системах відео використовується один з двох типів чутливих елементів: прилади із зарядним зв'язком (ПЗС) або комплементарні металооксидні напівпровідники (КМОП).

Різницю між КМОП і ПЗС можна виразити як:

ПЗС (CCD): сигнал від датчика до периферійного устаткування мікросхеми передається за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Ці датчики створюють зображення з високою роздільною здатністю і малим шумом. Зате вони споживають значну потужність (100х від КМОП) і складні у виготовленні;

КМОП (CMOS): зображення будується з окремих пікселів (точок), кожен піксель формується окремим транзистором, тобто кожен піксель зчитується окремо. КМОП більш сприйнятливий до шуму, але дуже енергетично економічний.

Більшість відеодатчиків, представлених на сучасному ринку, побудована за КМОП-технології. Такий датчик вбудований в кремнієву підкладку і виглядає як двовимірний матриця транзисторів, розташованих рядами і стовпцями. Кожен осередок такої матриці складається з трьох фотодіодів для трьох кольорів - червоного, зеленого і синього. Кожен фотодіод забезпечений мікролінзою, яка фокусує випадкові промені певного кольору, послаблюючи інші. Ці лінзи далеко не ідеальні, в них виникає хроматична аберация, тобто різні довжини хвиль заломлюються з різною швидкістю, що призводить до розмиття зображення. Лінзи можуть також викликати спотворення зображення внаслідок подушкоподібних спотворень.

Далі ми розглянемо дії, що вживаються для фільтрації шумів, нормалізації і оцифровки зображення, щоб надати йому форму зручну для використання. Основа процесу - це процесор відеосигналу зображення (image signal processor - ISP). Вся процедура може виконуватися в наступному порядку (див. рис. 3.13).

Зверніть увагу на численні перетворення на кожному етапі формування зображення: ці перетворення здійснюються для кожного пікселя. Для обробки такого обсягу даних потрібні значні обчислювальні потужності. Нижче перераховані функціональні блоки, необхідні для обробки зображення:

*аналого-цифрове перетворення:* посилення сигналу датчика з подальшим його перетворенням в цифрову форму (10 біт). Дані, що представляють захоплене зображення, зчитуються з матриці фотодіодів, як з двовимірної таблиці, що складається з рядків і стовпців;

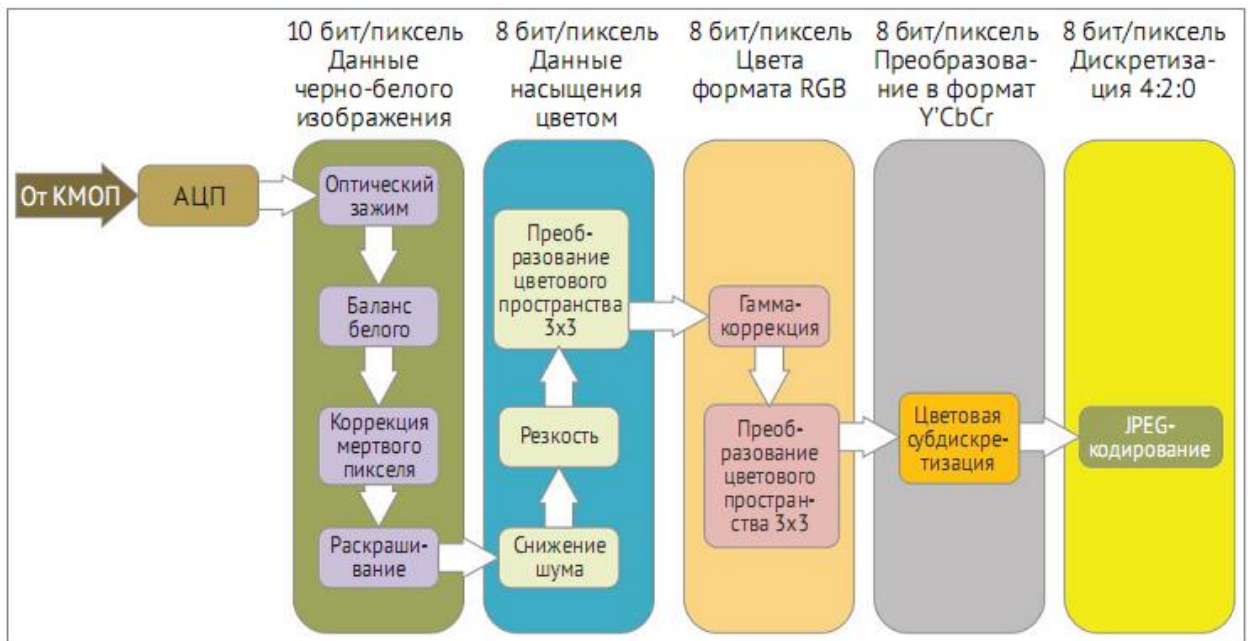


Рис. 3.13. Датчик зображення: типовий процесор відеосигналів зображення для створення кольорового відео

*оптичний затиск*: видаляє ефекти затемнення, що виникають внаслідок засвічення окремих пікселів датчика (sensor black level);

*баланс білого*: імітує хроматичне сприйняття людським оком різних кольірних температур, в результаті чого нейтральні тони і виглядають нейтральними. Виконується з використанням перетворення матриць;

*корекція мертвого пікселя*: визначає пікселі, що вийшли з ладу, і компенсує їх втрату з використанням інтерполяції, значення мертвих пікселів замінюються усередненими значеннями сусідніх;

*розфарбовування (Debayer filtering) і збір мозаїчного зображення (demosaicing)*: надає монохромному зображенню кольору, причому насиченість зеленого кольору визначається як функція від рівнів червоного і синього кольорів. Створює плоске зображення за допомогою черзрядковості. Для отримання чіткіших зображень з чітко окресленими межами і контурами використовуються більш складні алгоритми;

*зниження шуму*: всі датчики створюють шум. Шум може бути пов'язаний з нерівномірністю чутливості пікселів на рівні транзистора або витоком фотодіода. Це явище утворює темні області. Існують і інші форми шуму. На даному етапі видаляються білий і когерентний шуми шляхом введення проміжного фільтра (масив 3x3) для всіх пікселів. В якості альтернативи іноді використовують фільтр плям (despeckle filter), що вимагає сортування пікселів, але існують і інші методи. Всі перераховані методи обробляють всі пікселі по всій матриці в цілому;

*різкість*: проводиться розмиття зображення з використанням матричного множення, а потім в поєднанні з деталізацією по окремих областях створюється ефект наведення різкості;

*перетворення колірного простору 3 × 3*: перетворення колірного простору в дані, що відповідають стандарту формату RGB;

*гамма-корекція*: виправляє нелінійний відгук датчика зображення КМОП на дані RGB для різної освітленості. Гамма-корекція використовує довідкову таблицю (lookup table - LUT) для інтерполяції та виправлення зображення;

*перетворення колірного простору 3 × 3*: додаткове перетворення колірного простору з формату RGB в формат Y'CbCr. YCC був обраний, оскільки Y можна зберігати з більш високою роздільною здатністю, ніж CbCr, без втрати візуальної якості. Структура дискретизації 4: 2: 2;

*колірна субдискретизація (Chroma subsampling)*: усуває нелінійність RGB-тонів, коригує зображення для імітації зображення на інших носіях, таких як плівка. Таким чином поліпшується відповідність тонів і якості;

*JPEG-кодування*: стандартний алгоритм стиснення JPEG.

Тут слід підкреслити, що це хороший приклад того, наскільки складним може бути датчик, який обсяг даних, обладнання та складності можна співвіднести з простою відеосистемою. Обсяг даних, які обробляються відеосистемою з частотою 60 кадрів в секунду при роздільній здатності 1080p, просто величезний. Припускаючи, що всі етапи обробки (крім стиснення JPEG) проводяться за допомогою ISP, а так як це одна мікросхема (ASIC) і всі етапи виконуються за один цикл, то загальний обсяг оброблених даних складе 1,368 ГБ/с. А з урахуванням стиснення JPEG, яке проводиться призначеним для користувача CPU/DSP (центральний процесор/співпроцесор), обсяг даних складе вже більше 2 ГБ/с. Ніхто і ніколи не передає необроблений відеопотік (raw Bayer) в хмару для обробки - ця робота повинна виконуватися як можна ближче до відеодатчика.

### **3. Принципи злиття датчиків**

До всіх сенсорних пристроїв, описаних в цій лекції, може бути застосована концепція злиття датчиків. Це процес об'єднання декількох різних датчиків з метою отримання більшого обсягу інформації, ніж може забезпечити один датчик. У просторі IoT це важливо, оскільки, наприклад, одиничний теплової датчик поняття не має про те, що саме викликає швидку зміну температури. Але в поєднанні з іншими датчиками, наприклад, датчиками PIR, що фіксують рух і інтенсивність освітленості, система IoT може зрозуміти, що в певній галузі зібралася велика кількість людей і яскраво світить сонце, на цій підставі вона може прийняти рішення про посилення циркуляції повітря. А один термодатчик просто зафіксує поточне значення температури без будь-якого усвідомлення того, що температура зростає через те, що зібралися люди і світить сонце.

На основі більшої кількості даних від більшої кількості датчиків, відповідно корелюється в часі, система може приймати більш зважені рішення. Це одна з причин того, що кількість датчиків, поміщених в хмару IoT, зростає, викликаючи зростання обсягів даних. Датчики стають

дешевшими, легше інтегруються, і на прикладі TISensorTag легко бачити, як комбінація датчиків полегшує спільне бачення.

*Існує два режими злиття датчиків:*

централізований: дані передаються в центральний офіс, де і відбувається їх злиття (приклад - хмарні технології);

децентралізований: кореляція даних безпосередньо в датчику (або поруч з ним).

В основі кореляції даних датчика лежить центральна гранична теорема, на підставі якої два незалежних вимірювання  $x_1$  і  $x_2$  об'єднуються з урахуванням їх дисперсій (відхилень від норми), щоб отримати третє значення  $x_3$ . Тобто, це просто розрахунок середньозваженого значення перших двох величин:

$$x_3 = (\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2})^{-1}(\sigma_1^{-2}x_1 + \sigma_2^{-2}x_2).$$

Іншими методами злиття датчиків є фільтри Калмана і Байєсовські мережі.

#### 4. Пристрої виведення (виконавчі пристрої)

Існує ще безліч типів датчиків, розгляду яких ми не торкаємося в цьому курсі. Це різні газові аналізатори, датчики вологості, датчики радіоактивного випромінювання, датчики диму, ультразвукові датчики і т.д.

До цього моменту ми обговорювали кінцеві точки, представлені датчиками. Ці пристрої відправляють постійний потік даних на центральний пристрій або в хмару. IoT будується на основі двонаправлених систем.

Вхідні дані можуть передаватися в кінцеву точку з хмари, або, навпаки, дані можуть бути відправлені кінцевою точкою іншим абонентам хмари. У цьому коротенькому питанні ми розглянемо основні приводи і виконавчі пристрої.

Вихідні пристрої в екосистемі IoT можуть бути практично будь-якими: від простого світлодіода до повноцінної відеосистеми. До інших типів вихідних сигналів відносяться *виконавчі механізми, крокові двигуни, гучномовці та аудіосистеми, промислові клапани* і т. д. Зрозуміло, ці пристрої потребують різних систем управління різної складності. Залежно від типу виходу та використовуваного варіанту використання, також слід очікувати, що велика частина контролю і управління повинна проводитися безпосередньо поблизу пристрою (на противагу повного контролю в хмарі). Наприклад, відеосистема може передавати дані хмарних провайдерів, але для цього потрібно обладнання виведення і буферизації.

У загальному випадку системам виведення потрібні значні обсяги електроенергії для її перетворення в механічний рух, теплову енергію або в світло. Наприклад, невеликий соленоїд для управління потоком рідини або газу при напрузі живлення 9-24 В споживатиме струм приблизно в 100 мА,

при цьому створить направлене зусилля всього в п'ять ньютонів. А промислові соленоїди працюють від напруги в сотні вольт.



Сервоприводи



Кроковий двигун

### **Функціональні приклади (все разом)**

Набір датчиків досить марний, якщо дані, які вони збирають, не можуть передаватися і оброблятися. Незалежно від того, чи встановлений локальний або вбудований контролер або дані відправляються на більш високий рівень, для побудови повноцінної системи потрібно більший набір обладнання, ніж просто датчики і котроллер.

Найбільш поширені інтерфейси введення-виведення, що використовуються в датчиках, це I<sup>2</sup>C, SPI, UART, хоча існують і інші. Для таких пристроїв, як відеосистеми з високою роздільною здатністю і великою кадровою частотою, необхідні високошвидкісні ІО-інтерфейси, такі як MIPI, USB або навіть PCI Express. Датчики можуть також використовуватися з обладнанням бездротового зв'язку, таким як Bluetooth, Zigbee або 802.11. Все це вимагає додаткових компонентів.

### **Функціональний приклад - TI SensorTag CC2650**

Texas Instruments CC2650 SensorTag є хорошим прикладом сенсорного модуля IoT для розробки і проектування. Нижче наведено опис його функціоналу і вбудованих датчиків:

вхідні датчики:

- датчик освітленості (TI Light Sensor OPT3001);

- інфрачервоний датчик температури (TI Thermopile infrared TMP007);
- датчик температури навколишнього середовища (TI light sensor OPT3001);
- акселерометр (Invensense MPU-9250);
- гіроскоп (Invensense MPU-9250);
- магнітометр (Bosch Sensortec BMP280);
- альтиметр (датчик висоти) / Датчик тиску (Bosch Sensortec BMP280);
- датчик вологості (TI HDC1000);
- мікрофон MEMS (Knowles SPH0641LU4H);
- магнітний датчик (Bosch SensorTec BMP280);
- 2 інтерфейси GPIO;
- герконове реле (Meder MK24);

пристрої виведення:

- зумер/динамік;
- 2 світлодіоди;

комунікації:

- Bluetooth Low Energy (Bluetooth Smart);
- мережевий протокол - Zigbee;
- протокол взаємодії з бездротовими мережами - 6LoWPAN.

Весь комплект розрахований на живлення від однієї батареї-монети CR2032.

Пристрій може працювати в режимі маяка (iBeacon) або використовуватися як оповіщувач. На рис. 3.14 приведена блок-схема модуля CC2650 SensorTag.

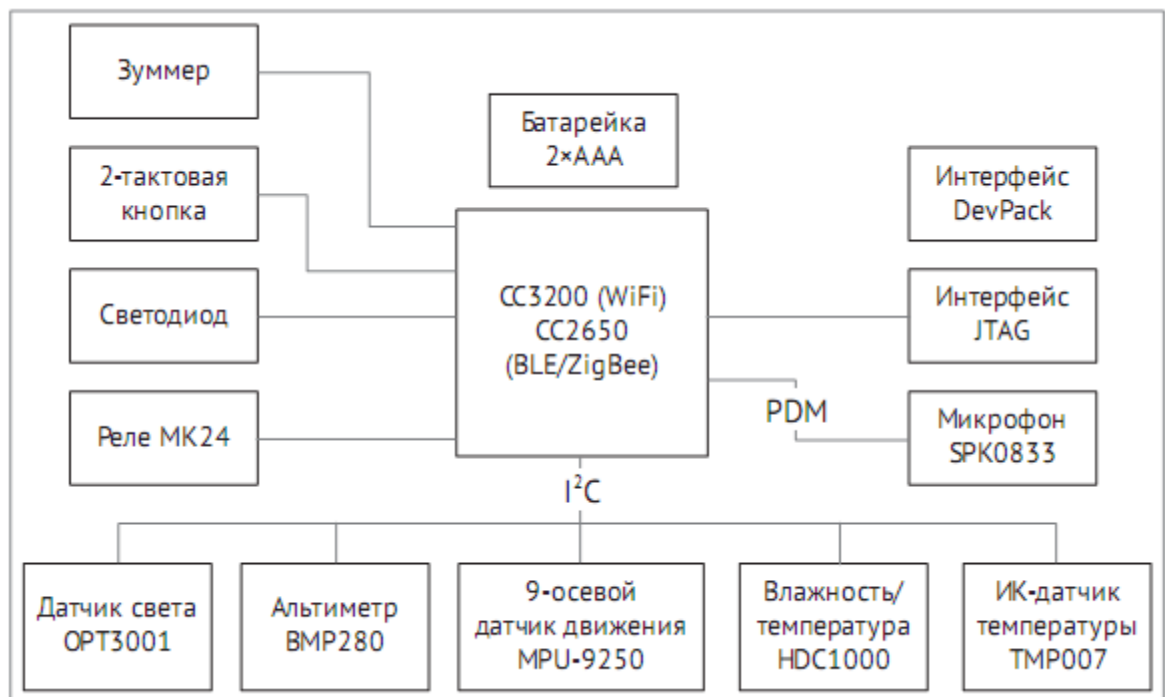


Рис. 3.14 TI CC2650 SensorTag.

Виробник Texas Instruments, TI Multi-Standard CC2650 SensorTag Design Guide.

Texas Instruments Incorporated, 2015

На рис. 3.15 приведена блок-схема пристрою для реалізації аудіо- і відеоконференцій (*Multipoint Control Unit - MCU*). MCU забезпечує можливість введення-виведення, сигнал обробляється з процесором ARM Cortex M4, для підключення датчиків має різні інтерфейси.

Пристрій оснащений декількома датчиками, системами зв'язку, інтерфейсами, але обчислювальна потужність невелика. У ньому використовується модуль обробки TI (MCU CC265), який включає в себе невеликий процесор ARM Cortex M3 з флеш-пам'яттю об'ємом 128 КБ і 20 КБ SRAM. володіє надзвичайно низьким енергоспоживанням. Але, не дивлячись на високу енергоефективність, обсяг оброблюваної інформації невеликий в силу обмеженості ресурсів. Як правило, такі пристрої супроводжуються шлюзами, маршрутизаторами, смартфонами або іншими інтелектуальними пристроями.

Сенсорні пристрої бюджетного виконання орієнтовані на низьке енергоспоживання і низьку ціну, не мають ресурсів для підтримки більш вимогливих додатків, таких як стеки протоколів MQTT, агрегація даних, стільниковий зв'язок або аналітика. Подібні пристрої призначені для стеження за польовими датчиками, вони розроблялися виключно в цілях економії коштів і зниження витрат.

Бездротовий MCU SimpleLink CC26xx



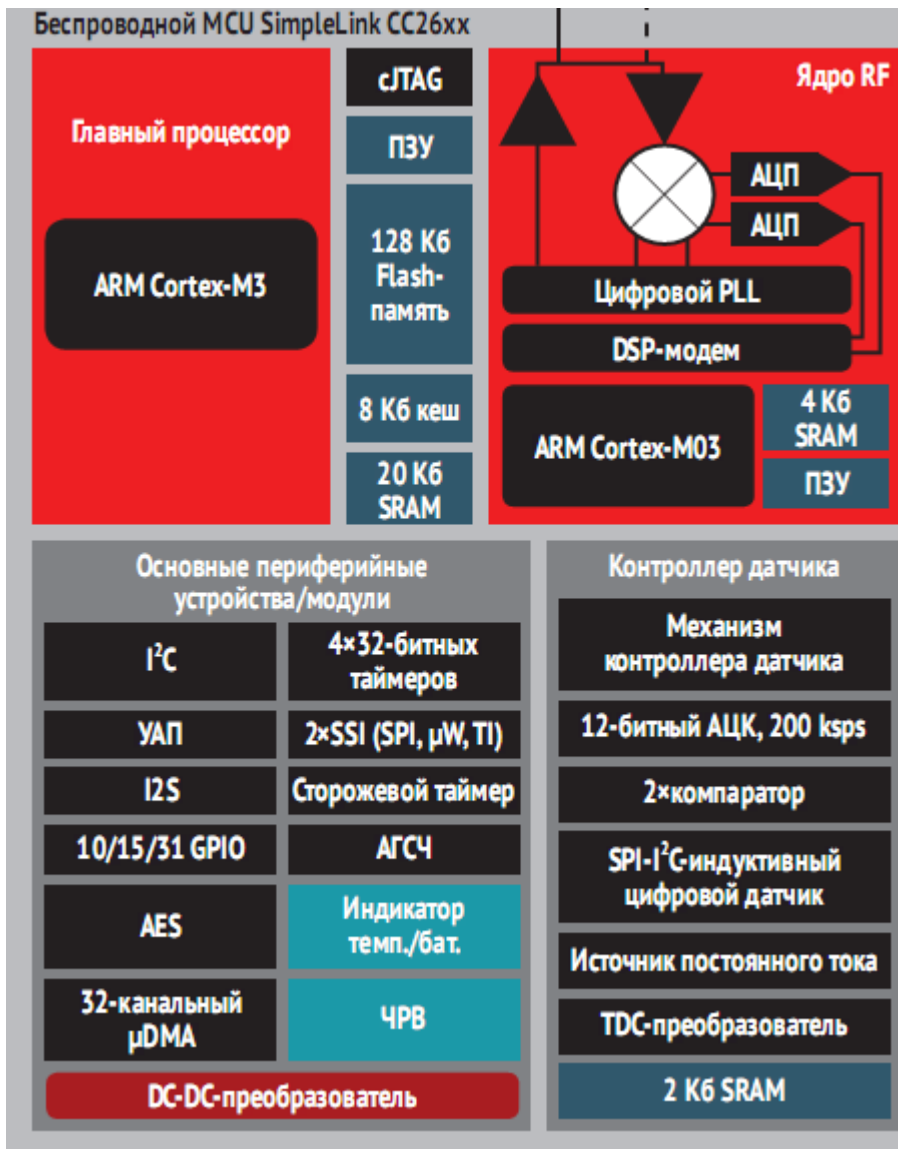


Рис. 3.15 TI CC2650. Блок-схема MCU.

Надано Texas Instruments, TI Multi-Standard CC2650 SensorTag Design Guide. Texas Instruments Incorporated, 2015

### Що ставиться між датчиком і контролером?

У багатьох попередніх прикладах сигнал датчика перед відправкою на наступний рівень вимагає посилення, фільтрації і калібрування. Крім цього, як правило, потрібно аналого-цифровий перетворювач. На рис. 3.16 наведено простий 24-розрядний АЦП з опорною напругою 5 В.

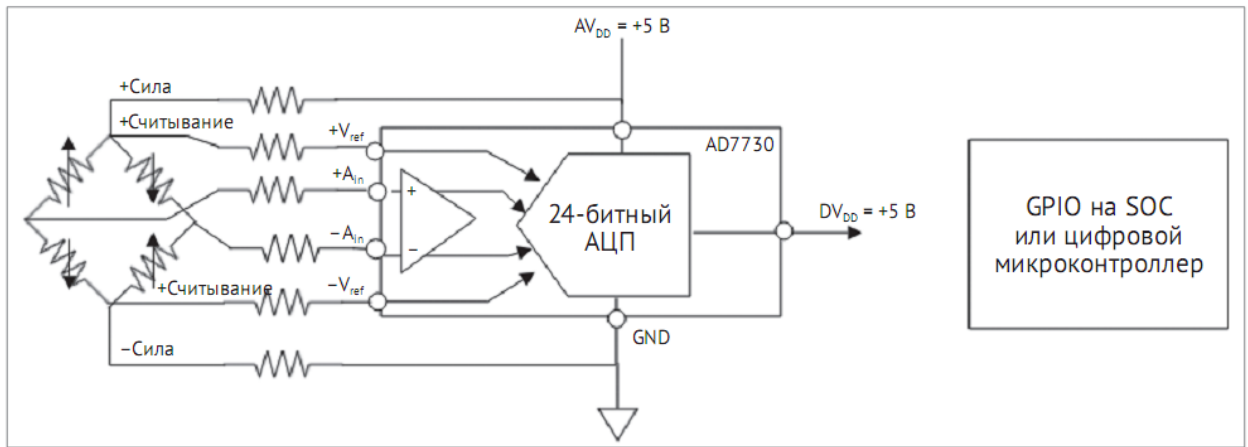


Рис. 3.16 Міст Уитстона: підключений до аналого-цифрового перетворювача AD7730, який виступає в якості входного пристрою для підключення до мікроконтролера або іншого входного перетворювача. Далі з виходу АЦП сигнал може надходити на вхід пристрою, який перетворює його в імпульсно-модульований сигнал або команди якого-небудь послідовного інтерфейсу, наприклад, I<sup>2</sup>C, SPI або UART, які вже і будуть передані безпосередньо мікроконтролеру або процесору цифрових сигналів. Хорошим прикладом всього вищесказаного може служити інфрачервоний термочутливий датчик Texas Instruments (TMP007). Це безконтактний MEMS-датчик температури, який поглинає інфрачервоне випромінювання і перетворює його в напругу. Він призначений для точного визначення температури навколишнього середовища в межах від -40 до +125 ° C. Всі компоненти, описані в цьому розділі, представлені на рис. 3.17.

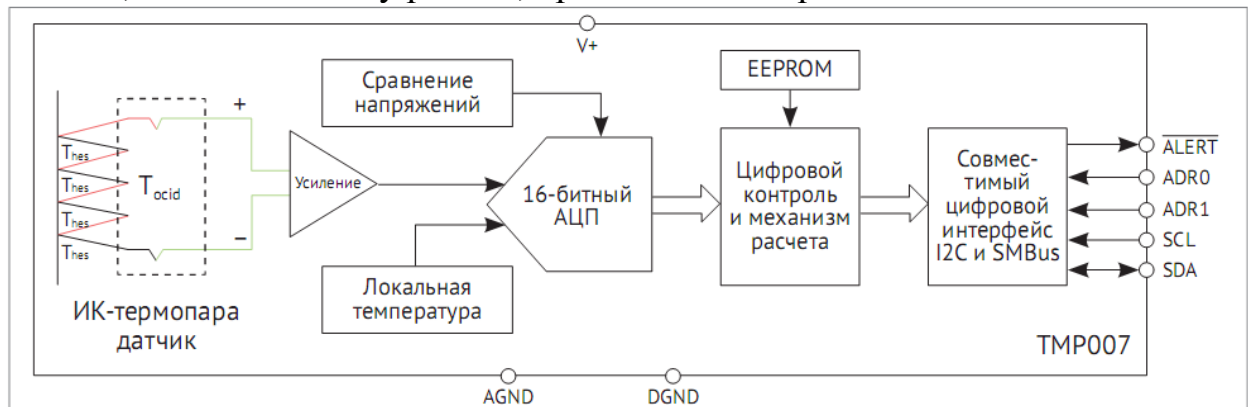


Рис. 3.17 ПІ TMP007. Надано Courtesy від Texas Instruments. Texas Instruments Incorporated, 2015

## 5. Джерела енергії та управління живленням

Використання потужних датчиків і периферійних пристроїв пов'язано з однією проблемою. Коли ми говоримо про мільярди елементів IoT, зрозуміло, що деякі з них будуть встановлені в дуже віддалених районах, і тоді їх живлення стає дуже проблематичним. Крім того, при розгортанні IoT деякі датчики можуть розташовуватися під водою або вбудовуватися в

існуючі інфраструктури, що ще більше ускладнює питання живлення. У цьому питанні ми розглянемо концепції виробництва електроенергії та управління живленням. Обидві ці концепції надзвичайно важливі в плані IoT.

### **Управління живленням**

Управління живленням - дуже широка тема, яка стосується як програмного, так і апаратного забезпечення. При розгортанні IoT дуже важливо розуміти роль ефективного управління енергоспоживанням віддалених пристроїв і пристроїв довготривалої експлуатації та володіти прийомами управління їми.

*Проектувальник повинен будувати бюджет енергоспоживання, з огляду на наступні фактори:*

активна потужність датчика;

частота збору даних;

споживана потужність бездротового радіозв'язку, необхідна для забезпечення покриття заданої площі;

частота зв'язку;

потужність мікропроцесора або мікроконтролера в залежності від тактової частоти ядра;

потужність пасивної складової;

втрати енергії від витоків або неефективності живлення;

резервування електроенергії для живлення приводів і двигунів.

Бюджет просто відображає сумарне енергоспоживання цих споживачів, що забезпечується джерелом живлення (батареї). З плином часу режим роботи батареї не лінійний. Оскільки батарея втрачає енергоємність при розрядці, її напруга падає криволінійно. Це створює проблеми для систем бездротового зв'язку. Якщо акумулятор розрядиться до деякого критично мінімальної напруги, радіо або мікропроцесор, не маючи порогової напруги живлення, просто відключиться.

Наприклад, TI SensorTag C2650 має наступні характеристики потужності:

режим очікування: 0,24 мА;

робота з усіма відключеними датчиками: 0,33 мА;

світлодіоди;

всі датчики зі швидкістю 100 мс/вимір і ширококомвні пристрої BLE: 5,5 мА:

- датчик температури: 0,84 мА;

- датчик освітленості: 0,56 мА;

- акселерометр і гіроскопи: 4,68 мА;

- барометричний датчик: 0,5 мА.

TI SensorTag використовує стандартну акумуляторну батарею CR2032, розраховану на 240 мА/год. Тому очікується, що її максимальний термін служби складе близько 44 годин. Але швидкість зниження енергоємності (і, відповідно, напруги), для батарейних пристроїв, величина нелінійна, в цьому ми переконуємося при розгляді ємності Пейкєрта.

Методи управління живленням різноманітні. Це і *використання неелектронних реле часу, зниження тактової частоти процесорів або мікроконтролерів, регулювання частоти, обмеження ширини смуги радіомовлення, стратегії відстрочки сеансів зв'язку і різні режими сну*. Ці методи широко використовуються, а в обчислювальній техніці вже стали загальноприйнятною практикою.

Вищеописані методи вже стали класикою. Вони мінімізують енергоспоживання за допомогою динамічного управління напругою, частотного регулювання та інших схем. Але існують і нові методи, з якими слід познайомитися: це *наближений розрахунок та імовірнісне проектування*. Обидві ці схеми засновані на тому факті, що абсолютна точність в показаннях датчика не завжди необхідна, особливо якщо сигнал підлягає обробці для передачі за допомогою бездротового зв'язку. Округлення обчислень може виконуватися на апаратному або програмному рівні простим округленням до цілого. Це тим більш прийнятно, коли мова йде про адреси або про множення чисел (наприклад, значення 17,962 досить близько до 17,970). *Імовірнісне проектування* передбачає лише задану ступінь надійності, а не максимально можливу, що знімає багато конструктивних обмежень. Обидва методи в сукупності здатні знизити енергоспоживання майже експоненціально в порівнянні зі звичайними схемами.

### **Відтворення електроенергії**

Відтворення електроенергії, концепція не нова, але в плані IoT дуже важлива. По суті, будь-яка система, що стежить за змінами умов навколишнього середовища (наприклад, від спеки до холоду, отримання бездротових сигналів, освітленість), може перетворювати форми енергії, що спостерігаються, в електричну. У деяких пристроях це використовується як єдине джерело енергії, а є і гібридні системи, які використовують таке перетворення для підзарядки батарей і продовження їх терміну служби. З іншого боку, вироблена таким чином енергія може зберігатися і використовуватися ощадливо для живлення низькоенергетичних пристроїв, наприклад датчиків в IoT. У будь-якому випадку, системи повинні бути ефективні при перетворенні і збереженні енергії. Це вимагає розширених можливостей в управлінні живленням. Наприклад, якщо система виробництва електроенергії використовує технологію п'єзоелектричної підкладки, вбудованої в тротуар, то повинна бути передбачена компенсація на випадок, коли пішохідний рух буде недостатнім. Постійний зв'язок з перетворювачами енергії теж веде до збільшення енергоспоживання, яке також треба компенсувати.

При розгортанні IoT, як правило, використовуються передові технології управління живленням, що виключають повну втрату функціональності систем. Часто використовуються такі методи, як очікування в режимі зниженого енергоспоживання, скорочення втрат, періодичні включення і виключення з використанням реле часу. На рис. 3.18 нижче показана область

енергоспоживання, яка ідеально підходить для живлення від перетворювачів, а також технології, які можуть це забезпечити. Проектувальник повинен подбати про те, щоб система не відчувала дефіциту в електроенергії, але і не мала її в надлишку.

Системи перетворення і відтворення електроенергії, в цілому, мають низький потенціал і ефективність. Тому питання про відтворення електроенергії доцільно розглядати лише в умовах дійсного надлишку невикористаної, енергії, наприклад, в умовах промислового виробництва.

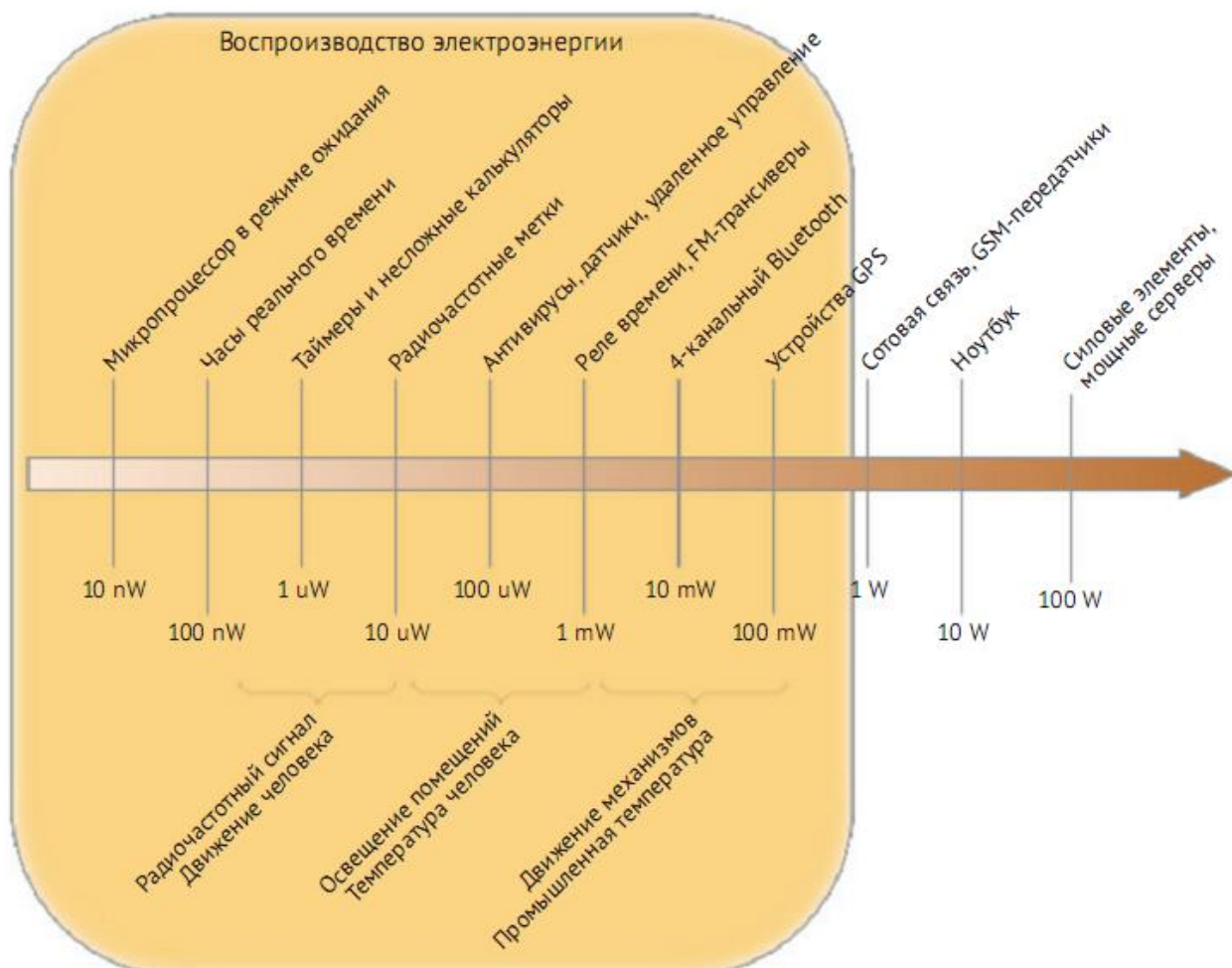


Рис. 3.18 Область энергоспоживання, підходяща для живлення відтвореною електроенергією. На малюнку показано типове споживання енергії для різних пристроїв

### Перетворення сонячної енергії

Енергія світла, природного або штучного, легко може бути використана як джерело електроенергії. На попередній лекції ми вже розглядали фотодіоди. Такі діоди, але в більших кількостях, можна використовувати для створення традиційних сонячних батарей. Їх здатність генерувати енергію безпосередньо залежить від їх площі. Найбільш ефективні батареї,

встановлені під прямими сонячними променями, а не в умовах штучного освітлення.

Класифікуються такі панелі по максимально можливій потужності на вході, що оцінюється у Вт.

Ефективність перетворення сонячної енергії залежить від сонячної активності, яка змінюється сезонно і географічно. Наприклад, на Південно-Заході США фотоелектрика становить значну частку загального електроспоживання. Національною лабораторією з поновлюваних джерел енергії при Міністерстві енергетики США ([www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)) була випущена карта Сполучених Штатів із зазначенням обсягів фотоелектричних ресурсів.

Ця карта показана на рис. 3.19.

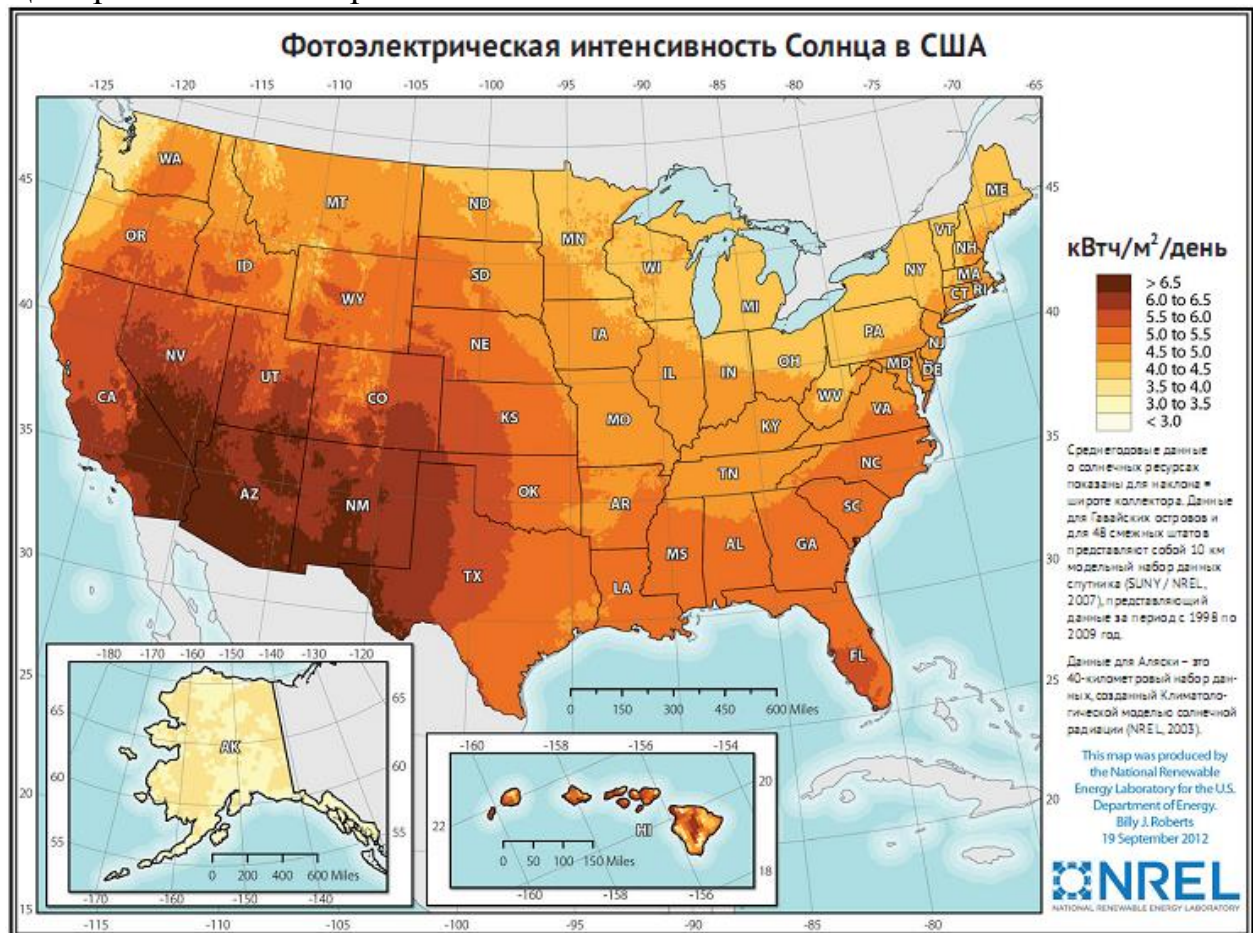


Рис. 3.19 Карта Сполучених Штатів із зазначенням щільності сонячної енергії кВт год/м<sup>2</sup> 1998-2009 рр.

У південно-західних регіонах Сполучених Штатів сонячна активність висока, зазвичай немає хмарних бар'єрів і переважають хороші атмосферні умови. А ось на Алясці щільність сонячної енергії мала. Сонячні фотоелектричні елементи зазвичай неефективні. Зазвичай їх ККД коливається в межах від 8% до 20%, при цьому показник в 12%, є найбільш типовим. Проте, сонячна батарея площею 25 см<sup>2</sup> при максимально можливій освітленості може генерувати потужність до 300 мВт. Іншим фактором, що впливає на генерується потужність, є кут падіння сонячних променів. Максимальної ефективності сонячний колектор досягає при

перпендикулярному розташуванні щодо сонячного світла. При зміні кута падіння, у міру руху Сонця, ефективність батареї падає. Наприклад, колектор з максимальним ККД в 12% при нахилі променів в 60 ° працюватиме з ККД в 9,6%.

Основа сонячного колектора - це сонячний елемент, який представляє собою простий напівпровідник з р-п-переходом і повністю аналогічний раніше описаним фотоелектричним датчикам. Як пояснювалося вище, в такому елементі при опроміненні світлом між областями р і п генерується електричний потенціал.

### **П'єзомеханічне перетворення**

Як уже згадувалося раніше, п'єзоелектричні ефекти можуть використовуватися в якості датчиків, але вони ж можуть бути використані і для генерації енергії. Механічні деформації, викликані рухом, вібрацією і навіть звуком можуть бути перетворені в електроенергію. Такі генератори можуть використовуватися в розумних дорогах, навіть якщо вони вбудовані в бетон. Подібні пристрої генерують потужність порядку міліватт і, отже, підходять для дуже невеликих систем, призначених для збору і зберігання енергії. Весь процес може бути виконаний із застосуванням п'єзомеханічних пристроїв MEMS, електростатичних і електромагнітних систем.

Принцип дії електромагнітної системи заснований на законі Фарадея, що стверджує, що зміна магнітного потоку через котушку з проводом індукуює в ній електричний струм. Щоб забезпечити такі зміни, вібрація передається або на котушку, або на магніт. На жаль, така схема забезпечує занадто малу напругу.

Електростатичні системи використовують ефект, що виникає при зміні відстані між двома ємнісними пластинами, на яких підтримується постійна напруга або заряд. Будь-яка вібрація пластин викликає зміну відстані між ними, енергія (E), що виникає при цьому, може бути проілюстрована за допомогою наступної моделі:

$$E = \frac{1}{2} QV^2 = \frac{Q^2}{2C}$$

Тут Q - постійний заряд на пластинах, V - постійна напруга, C - електрична ємність. Ємність може бути виражена через довжину пластини  $L_w$ , відносну діелектричну проникність  $\epsilon_0$  і відстань між пластинами d наступним співвідношенням:

$$C = \epsilon_0 L_w / d.$$

Перевага електростатичного перетворення полягає в тому, що воно може бути масштабованим і економічно доцільним в умовах мікромашинобудівництва і виробництва напівпровідників.

Останній метод механіко-електричного перетворення - це п'єзомеханічний метод, про який вже згадувалося. Ця ж базова концепція, що використовується в датчиках, застосовується і при відтворенні електроенергії.

П'єзомеханічний пристрій MEMS, протидіючи прикладеному до нього зусиллю, генерує електричну енергію.

Ще одним аспектом перетворення механічної енергії в електричну є необхідність випрямлення і згладжування отриманої напруги. Зазвичай для цих цілей використовується пасивний випрямляч з підключеним конденсатором великої ємності в якості згладжуючого фільтра. Інші форми відтворення електроенергії не потребують таких перетворень.

### **Перетворення радіочастот**

Бездротове енергопостачання за допомогою радіочастот (RF) ведеться вже протягом багатьох років, тому приклад радіопозначки (RFID tags). RFID, як правило, знаходиться в безпосередній близькості від приймача, який не тільки обмінюється з нею інформацією, а й постачає її енергією.

Але віддаленим пристроям потрібно відтворювати електроенергію з ширококомовних трансляцій. Передача в ширококомовному діапазоні ведеться майже повсюдно: це і телебачення і сигнали стільникового зв'язку, і радіо.

Відтворення електроенергії з радіочастот - це найбільш важке завдання в порівнянні з іншими формами генерації, оскільки радіочастотні сигнали мають найменшу щільність енергії. Прийом радіочастотних сигналів проводиться за допомогою антени, яка налаштована на певну смугу частот. Типовий діапазон частот, що використовується для радіомовлення, становить від 531 до 1611 кГц (діапазон радіочастот AM).

### **Перетворення тепла**

У електроенергію може бути перетворена теплова енергія будь-якого пристрою, якому потрібне відведення теплоти. Зазвичай для цього використовуються два основні процеси:

термоелектричний: пряме перетворення теплової енергії в електричну енергію внаслідок ефекту Зеебека;

термічний: також відомий як термотунелювання. Електрони викидаються (емітуються) з нагрітого електрода і в напрямку холодного.

Термоелектричний ефект (ефект Зеебека) виникає в провідних матеріалах при наявності градієнта температур. Потік носіїв з гарячою в холодну область між двома несхожими електричними провідниками створює різницю потенціалів. Термопара, або термоелектричний генератор (ТЕГ), може ефективно генерувати напругу навіть внаслідок різниці температури людського тіла і температури навколишнього середовища. Різниця



температур в  $5^{\circ}\text{C}$  може генерувати потужність в 40 мкВт при напрузі 3 В. Коли тепло передається від гарячого електрода до холодного, гаряча сторона індукує потік електронів в напрямку холодного електрода. В сучасних термоелектричних пристроях, в основному, використовується телурид вісмуту, n- і р-типу. У таких пристроях один електрод елемента (теж званого термопарою) піддається впливу джерела тепла, а інший ізольований. Енергія, вироблена термопарою, пропорційна квадрату напруги і різниці температур між електродами. Математично це можна виразити таким рівнянням:

$$V = \int_{T_L}^{T_H} [S_1(T) - S_2(T)]dT.$$

Тут  $S_1$  і  $S_2$  - коефіцієнти Зеєбека для кожного з двох матеріалів (n- і р-типу), з яких побудована термопара;  $T_H - T_L$  - різниця температур.

Оскільки коефіцієнт Зеєбека - це функція температури і існує різниця температур, то результатом є різниця напруги. Ця напруга, як правило, дуже мала, тому для утворення термоелемента послідовно з'єднується кілька термопар.

Однією з істотних проблем сучасних термопар є їх низька ефективність перетворення енергії (менше 10%). Однак і їх переваги очевидні: це і невеликі розміри, і простота виготовлення, і невисока вартість. Тривалість терміну їх служби - більше 100 000 годин.

Основна ж проблема полягає в знаходженні щодо постійного джерела теплової дисперсії (різниці температур). Використання такого пристрою протягом декількох сезонів з різними температурами є складним завданням. Потужність таких пристроїв IoT, що генерується, зазвичай лежить в діапазоні 50 мВт.

### **Сховища енергії**

Типовим сховищем енергії для датчика IoT служать батарея або суперконденсатор (іоністор). При розгляді архітектури потужного датчика необхідно враховувати кілька аспектів:

енергія, необхідна для живлення силової підсистеми: чи зуміє батарея її забезпечити;

енергоємність акумулятора;

доступність: якщо пристрої замуровані в бетон, чи буде доцільна дорога заміна, якщо вони вийдуть з ладу, тим більше, що їх можливості регенерації енергії вельми скромні;

вага: цей параметр дуже критичний, якщо пристрій призначений, наприклад, для безпілотного літального апарату;

як часто буде заряджатися акумулятор;

чи є відновлювальна форма енергії постійно доступною або епізодичною, як, наприклад, сонячна;

характеристики потужності батареї: як енергія батареї буде змінюватися з часом, в процесі розрядки;

встановлений датчик в термічно обмеженою середовищі, що може вплинути на термін служби батареї і її надійність;

чи гарантує батарея мінімально допустимий струм.

### **Моделювання енергії і потужності**

Ємність акумулятора вимірюється в ампер-годинах. Спрощене рівняння для оцінки терміну служби джерела живлення можна записати так:

$$t = \frac{C_p}{I^n}.$$

Тут  $C_p$  - ємність Пейкерта;  $I$  - струм розряду;  $n$  - показник Пейкерта. Ефект Пейкерта, як відомо, допомагає передбачити термін служби батареї, коли ємність батареї зменшується з різною швидкістю зі збільшенням розряду. Рівняння показує, що більш швидке розрядження забирає у акумулятором більше енергії. І, навпаки, розрядження з низькою швидкістю збільшує ефективний час роботи батареї. Наведемо приклад цього явища.

Акумулятор, розрахований виробником на ємність в 100 А год, повністю розряджається через 20 годин (при силі струму - 5А). Якщо його розрядити швидше (скажімо, за 10 годин), його реальна ємність виявилася б нижче. Але, якщо розряджати той же акумулятор повільніше (наприклад, більше 40 годин), його реальна ємність виявилася б більше. Однак, як показано на графіку нижче, цей зв'язок є нелінійним. Показник Пейкерта зазвичай лежить між 1,1 і 1,3. Чим більше батарея відрізняється від ідеальної, чим швидше вона розряджається зі збільшенням струму розрядки, тим вище її показник  $n$ . Крива Пейкерта застосовна до свинцево-кислотної батареї, характеристики якої, для прикладу, наведені на рис. 3.20.

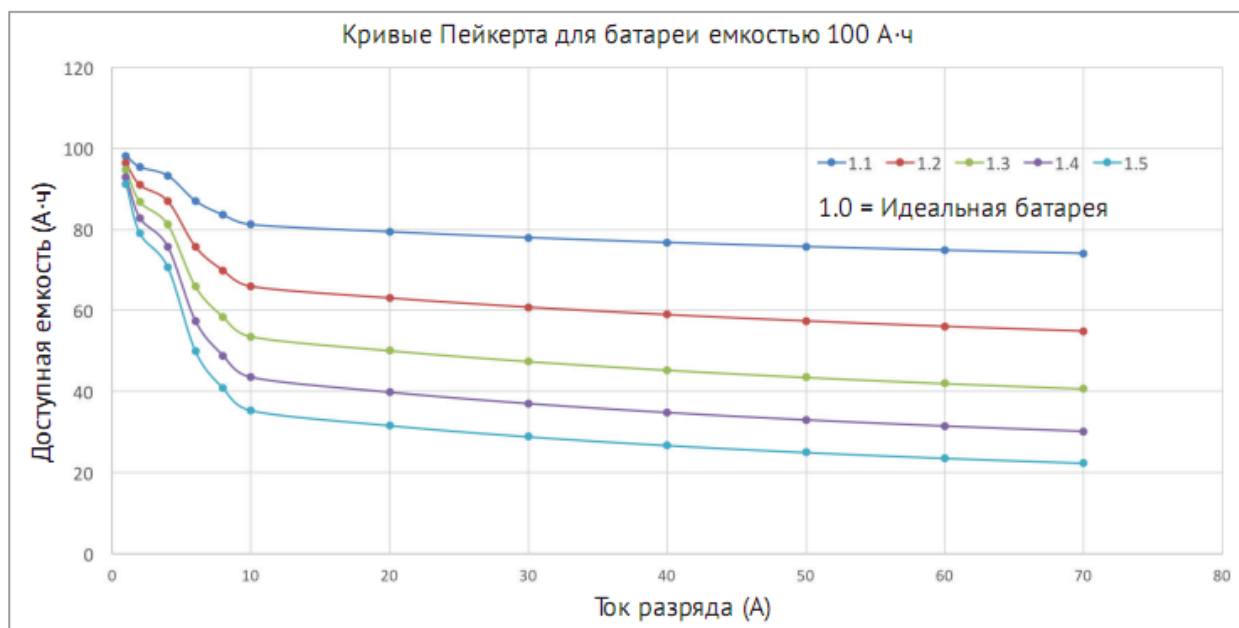


Рис. 3.20 Криві Пейкерта з показником  $n$  від 1,1 до 1,5 для батареї, розрахованої на струм 100 А протягом 20 годин. Криві показують зниження потужності в міру збільшення коефіцієнта Пейкерта

Різниця в швидкості розряду для різних типів батарей очевидна. Одним з переваг лужних батарей є те, що швидкість розряду майже лінійна на великій частині графіка. Літій-іонна батарея має ступінчасту функцію продуктивності, що ускладнює прогнозування її розряду.

Проте, літій-іонні елементи забезпечують стійкий рівень напруги протягом тривалого періоду часу і дуже зручні для живлення електроніки протягом всього терміну служби (рис. 3.21).

Графік також ілюструє, що кислотно-свинцеві і нікель-кадмієві батареї мають менший потенціал, плавне падіння потужності, які можна надійно обчислити. Наведені криві зветься ємності Пейкерта.

Температура значно впливає на термін служби батареї, змінюючи характеристики електроактивних носіїв. У міру збільшення температури внутрішній опір батареї зменшується. Навіть коли батареї зберігаються, вони саморозряджаються, що впливає на загальний термін служби батареї.

Графік Ругон - зручний спосіб порівняння різних систем зберігання енергії за показниками тривалості забезпечення енергопостачання і запасу потужності, яку система може видати. На логарифмічній шкалою по осі ординат відкладається значення щільності енергії (Вт год/кг), по осі абсцис значення щільності потужності (Вт/кг). Це співвідношення наочно демонструє відмінності між пристроями, призначеними для тривалого енергозабезпечення (батареї) і пристроями, орієнтованими на збереження великих обсягів енергії (іоністори) (рис. 3.22).

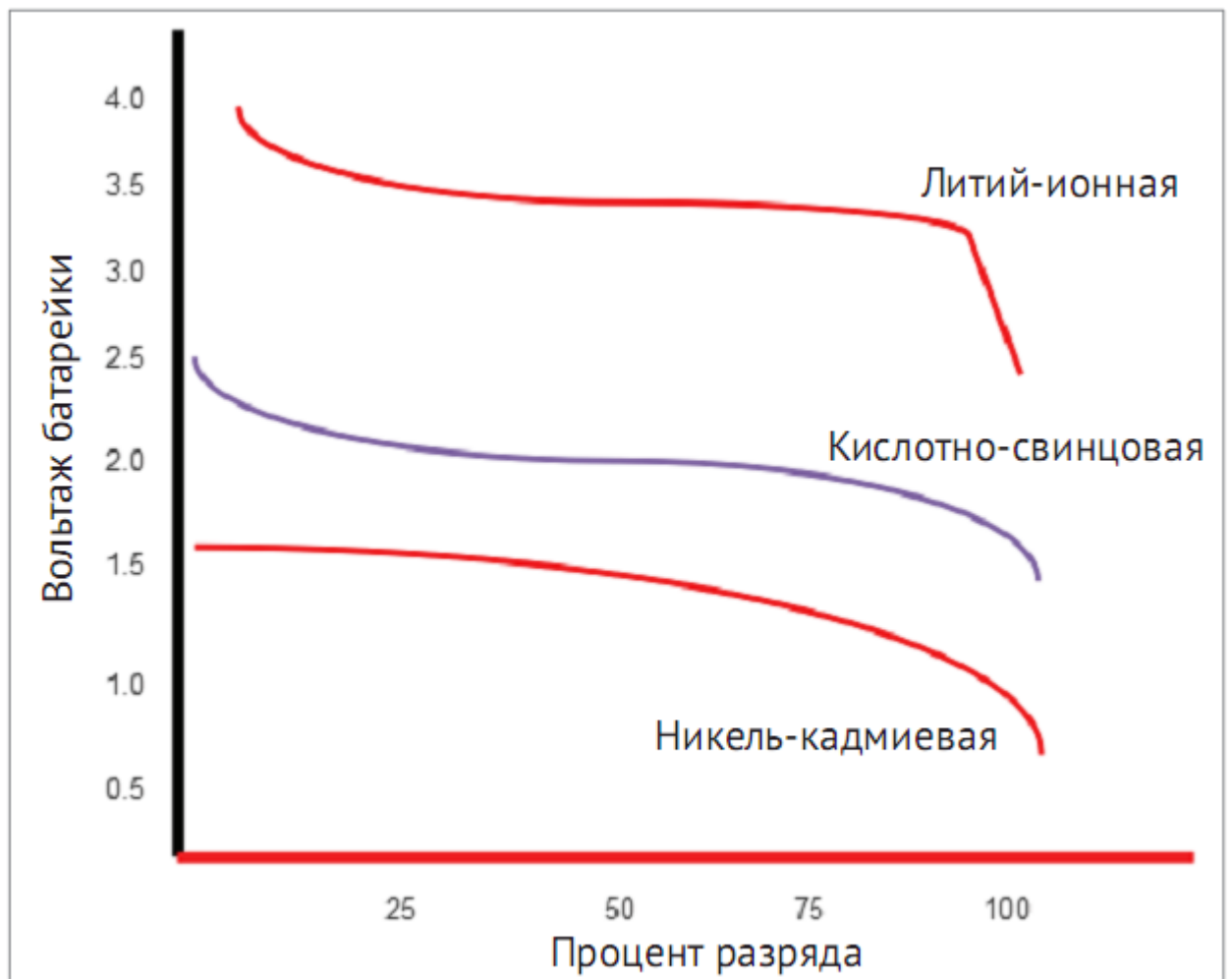


Рис. 3.21 Приклад відносності швидкості розряду для різних типів батарей.

Літій-іонний елемент забезпечує майже постійну напругу протягом всього терміну служби, але має різке падіння до моменту вичерпання ємності.

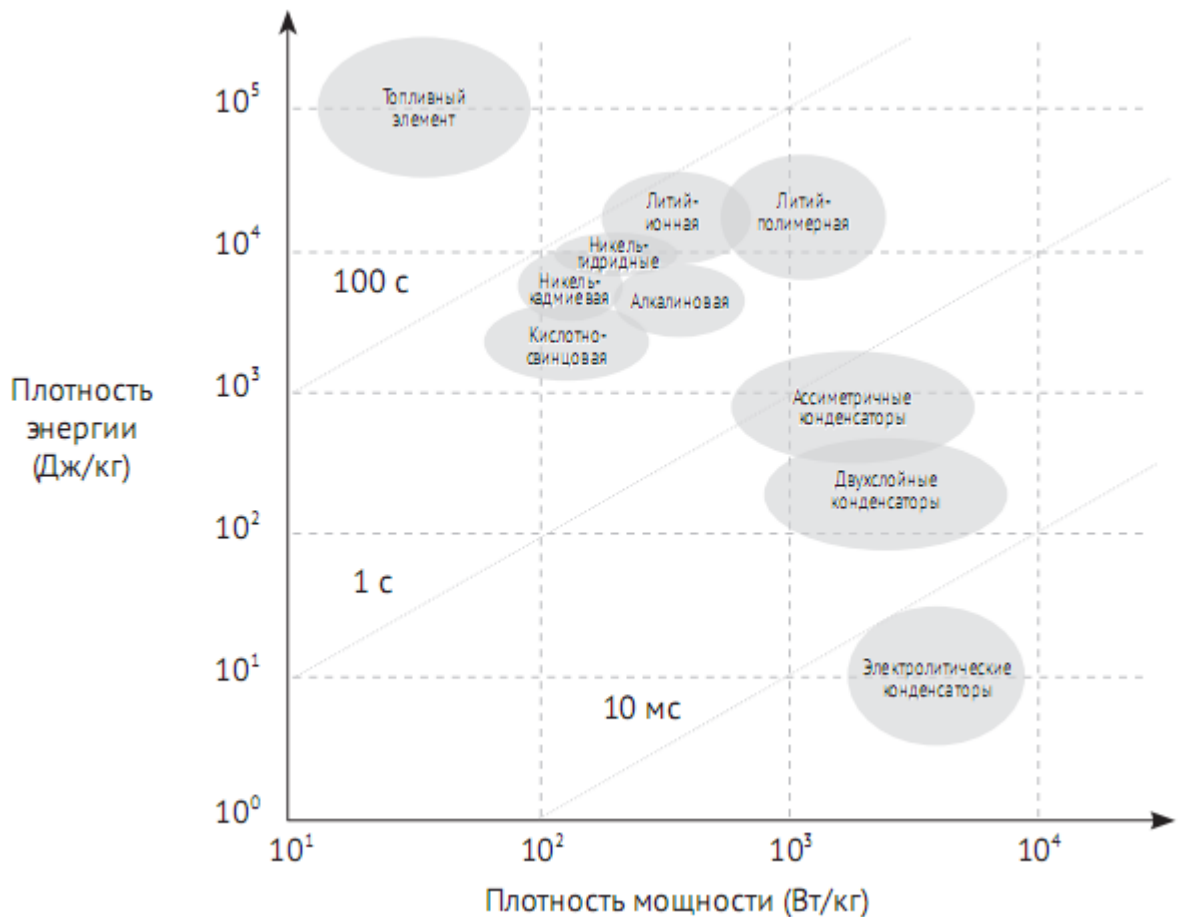


Рис. 3.22 Графік Ругон для конденсаторів, іоністорів, акумуляторів і паливних елементів демонструє відмінності в показниках по можливості тривалого енергопостачання і обсягами енергії, що запасається

Літій-іонні батареї мають більш високу щільність енергії і швидкість розряду, ніж нікель-кадмієві та нікель-гидридні батареї. Конденсатори мають дуже високою щільністю потужності, але відносно малою щільністю енергії. Зверніть увагу, що графік побудований на логарифмічній шкалою і відображає час розряду для різних систем зберігання. Зображення надано С. Knight, J. Davidson, S. Behrens «Параметри енергії для вузлів безпроводних датчиків», Sensors, 2008, 8 (12), 8037-8066.

### Батарей

На сьогоднішній день, літій-іонна (Li-ion) батарея, завдяки її щільності енергії, стала стандартним елементом живлення в мобільних пристроях. У такій батареї іони літію фізично переміщуються від негативного електрода до позитивного. Під час перезарядки іони повертаються в негативну область. Це явище відоме як іонний рух.

Батарей схильні до старіння. Це виражається у втраті ємності від початкової після деякої кількості циклів перезарядки (наприклад, втрата 30% ємності після 1000 циклів). Це погіршення майже безпосередньо корелює з температурою навколишнього середовища, в теплих середовищах втрати

будуть рости. Тому проектувальнику необхідно подбати про дотримання температурного режиму, якщо він використовує літій-іонну батарею.

Іншим негативним фактором автономного режиму є саморозряд. В процесі експлуатації в батареї виникають небажані хімічні реакції, які ведуть до втрати енергії. Величина і швидкість таких втрат залежить від хімічного складу і температури. Як правило, термін служби літій-іонного елемента становить 10 років (з втратою ~ 2% в місяць), а лужної батареї - тільки 5 років (15-20% втрат в місяць).

### **Суперконденсатори**

Суперконденсатори (або іоністори) можуть зберігати енергію в значно більших обсягах, ніж звичайні конденсатори. Звичайний конденсатор має густину енергії близько 0,01 Вт год/кг. Іоністор має щільність енергії від 1 до 10 Вт год/кг, за цим параметром він наближається до батарей, щільність енергії яких може досягати 200 Вт год/кг. Як і конденсатор, іоністор зберігає енергію в електростатично заряджених пластинах і, на відміну від акумулятора, не використовує хімічний перенесення енергії. Зазвичай іоністори виготовляються з досить екзотичних матеріалів, таких, наприклад, як графен, що, природно, впливає на їх вартість. Очевидна перевага іоністорів - їх швидкість зарядки. До повного потенціалу вони заряджаються за секунди, в той час як, щоб зарядити літій-іонні батареї на 80%, буде потрібно кілька хвилин. Крім того, іоністор неможливо перезарядити, а ось надмірне зарядження літій-іонної батареї може призвести до серйозних проблем безпеки. Іоністори бувають двох видів:

електричні двошарові конденсатори (Electric double-layer capacitors - EDLC): його обкладки виготовляються з активованого вугілля, а енергія зберігається у вигляді електростатичного потенціалу;

псевдоконденсатори (Pseudocapacitors): в якості діелектрика між його обкладами використовується оксид металу, з якого виготовлені обкладання, для збереження енергії використовується електрохімічний перенесення заряду.

Ще одна перевага іоністорів перед батареями - можливість точного прогнозування часу їх служби. Остаточний обсяг енергії іоністора легко розрахувати по напрузі на його клеммах, воно змінюється з плином часу. На відміну від літій-іонної батареї, у якій профіль напруги зберігається постійним, що ускладнює оцінку решти обсягів енергії. Оскільки профіль напруги іоністора змінюється з плином часом, для компенсації виникаючих змін необхідний DC-DC перетворювач.

Основними проблемами іоністора, як і будь-якого іншого конденсатора, є витікання струму і вартість. Як показано в табл. 3.3 нижче, іоністори знаходять досить широке застосування. Їх часто застосовують в гібридних рішеннях, в комплексі зі звичайними батареями для забезпечення миттєвої потужності (наприклад, при прискоренні електромобіля), в той час як акумулятор забезпечує транспортну потужність.

## Радіоактивні джерела енергії

Радіоактивне джерело характеризується високою щільністю енергії ( $10^5$  кДж/см<sup>3</sup>), він генерує теплову енергію внаслідок високої кінетичної енергії випромінюваних частинок. Період напіврозпаду (період часу, після закінчення якого потужність джерела падає вдвічі) такого джерела, як, наприклад, цезій-137, становить 30 років, а щільність потужності 0,015 Вт/г.

Цим методом можна генерувати кіловати потужності, але він непридатний для низькорівневих потужностей при розгортанні IoT. Зате ці технології успішно застосовуються в космічних апаратах вже протягом десятиліть. Дуже перспективно виглядають розробки з використанням п'єзоелектричних MEMS, які при захопленні електронів (джерелом електронів служить радіоактивне джерело) надають руху мікроарматурі, тим самим роблячи механічну енергію, яку вже можна перетворити в електричну. Вторинним ефектом радіоактивного розпаду є відносно слабкий профіль щільності потужності в силу тривалості періоду напіврозпаду. З іншого боку, вони, подібно до іоністорів, здатні, при необхідності, забезпечити миттєву потужність. Останньою проблемою радіоактивних джерел є їх значна питома вага, більшою мірою обумовлена масою свинцю, необхідного для захисту від радіації. Наприклад, для цезію-137 потрібно свинцевий екран товщиною 80 мм/Вт, це не може не відбиватися на їх вартості.

Як уже згадувалося раніше, вибір правильного джерела живлення має вирішальне значення. У табл. 3.3 нижче вироблено невеличке порівняння різних системних факторів, які повинні враховуватися при виборі джерела живлення.

Таблиця 3.3. Порівняння різних системних факторів, які повинні враховуватися при виборі джерела живлення

Категорія	Литий-ионная батарея	Ионистор
Плотность энергии	200 кВт·ч/кг	8–10 кВт·ч/кг
Количество циклов перезарядки	Падение емкости после 100–1000 циклов	Не ограничено
Время разряда	1–10 часов	От миллисекунд до секунд
Температура эксплуатации	От –20 до +60 °С	От –40 до +85 °С
Рабочее напряжение	От 1,2 до 4,2 В	От 1 до 3 В
Изменение напряжения	Постоянное в течение срока службы	Линейное или экспоненциальное снижение
Скорость заряда	(очень медленно) 40 С/х	(Очень быстро) 5 С/х
Срок службы	От 0,5 до 5 лет	От 5 до 20 лет
Размеры	Очень малые	Большие
Стоимость	Невысокая (\$250–1000)	Высокая (\$10 000)

## ВИСНОВКИ

У цьому розділі було розглянуто кілька різних типів датчиків і кінцевих точок, використовуваних при розгортанні IoT. Інтернет речей не просто підключає пристрій до Інтернету, хоча це ключовий момент, але суть IoT полягає в підключенні аналогового світу до цифрового. Пристрої і компоненти, які раніше не підключені до світової мережі, тепер мають можливість ділитися зібраною інформацією з зовнішнім світом. Це грандіозно, оскільки тепер з'явилася можливість проводити вимірювання, які раніше ніколи не проводилися. Можливість відстежувати і сприймати зовнішній світ неминуче веде до збільшення ефективності управління, а, отже, і до зростання прибутковості і клієнтської бази. Датчики дозволяють розумним містам здійснювати зважене, інтелектуальне обслуговування, відстеження активів і аналіз величезного масиву сукупних даних. Питання енергозабезпечення проєктованих систем мають ключове значення, і це повинно бути зрозуміло проєктувальникам. Погано спроектована система енергопостачання призводить до занадто короткому часу автономної роботи системи в цілому, а це тягне за собою істотні витрати на виправлення і доопрацювання.