

УДК 621.39

д-р техн. наук, професор Міночкін А. І. ORCID: 0000-0001-5723-5052 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук Масесов М. О. ORCID: 0000-0003-4537-4295 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук Шаціло П. В. ORCID: 0009-0008-7932-2294 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ПРИКЛАДНЕ МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УПРАВЛІННЯ ВИТРАТАМИ ЕНЕРГОРЕСУРСУ ВУЗЛІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ВІЙСЬКОВОГО (СПЕЦІАЛЬНОГО) ПРИЗНАЧЕННЯ

Аналіз досвіду проведення військових операцій у війні російської федерації проти України засвідчив, що використання у Збройних силах передових технологій дозволяє своєчасно викрити напроцьовування військ ворога на кордонах між державами, які беруть участь у військовому конфлікті, виявити опорні пункти противника, передислокацію військ, їхню підготовку до нанесення ракетних ударів та ін. Саме впровадження таких технологій в автоматизованих системах управління військами і зброєю дозволяє своєчасно реагувати на вплив різноманітних зовнішніх факторів та дає змогу командуванню і військам на полі бою швидко пристосовуватись до мінливої ситуації на всьому просторі проведення бойових дій.

До таких передових технологій військової науковці армії передових країн світу відносять технології безпроводових сенсорних мереж. Такі характеристики безпроводових сенсорних мереж, як: 1 – здатність до швидкого розгортання; 2 – самоорганізація; 3 – висока відмовостійкість; 4 – здатність застосування в різних середовищах (повітряні, надземні, підземні, морські), – роблять їх надійним засобом забезпечення ефективного управління виконанням військами бойових завдань.

У статті розглядаються результати дослідження архітектури сенсорної мережі спеціального (військового) призначення, її основних характеристик, принципів функціонування та методів управління енергоспоживанням вузла мережі (як базової компоненти прикладного математичного забезпечення управління витратами енергоресурсу) з точки зору критерію найменшого енергоспоживання. Для впровадження методів управління витратами енергоресурсу в систему оперативного управління сенсорною мережею та розробки методики узгодження дій її компонентів для вирішення задачі енергозбереження розроблена її функціональна модель на платформі методології IDEF (Integrated Definition – цілісна точність).

Ключові слова: алгоритм, критерій, метод, модель, метрика, сенсор, сенсорний вузол, сенсорна мережа.

A. Minochkin, M. Masesov, P. Shatsilo Applied mathematical providing of management of energy of resource of knots of sensory network for the (special) military setting charges

The analysis of experience of realization of soldiery operations in war of the Russian federation against Ukraine witnessed, that the use in the armed forces of frontrank technologies the increase of troops of enemy allows in good time to disrobe on borders between the states, that take part in a military conflict, to reduce the strong points of opponent, redeployment of troops, their preparation to the rocket inflicting blows and other. Self introduction of such technologies in CASS of management troops and weapon allows in good time to react on influence of various external factors and gives an opportunity to the command and troops on a battlefield quickly to adapt to the changeable situation on all space spacious realizations of battle actions.

To such frontrank technologies the soldiery scientists of armies of frontrank countries of the world take technologies of wireless sensory networks (WSN). Such descriptions of WSN as: 1 – is a capacity for rapid development; 2 – is independently organization; 3 – is high fault tolerance; 4 – is ability of application in different environment.

The results of research of architecture of sensory network of the special (military) setting are examined in the article, her basic descriptions, principles of functioning and methods of management of knot of network (as a base component of the applied mathematical providing of management the charges of resource) an energy consumption from the point of view of criterion of the least energy consumption. For introduction of methods of management of charges in the system of operative management a sensory network worked out her functional model on the platform of methodology of IDEF (Integrated Definition is integral exactness).

Keywords: algorithm, criterion, method, model, birth-certificate, touch control, sensory knot, sensory.

Актуальність дослідження

Рішенням Ради національної безпеки і оборони України від 20.08.2021 року № 0063525-21 введено в дію стратегічний оборонний бюлетень, в якому одним із напрямків реалізації оборонної політики України визначена «...побудова системи об'єднаного керівництва силами оборони та військового управління у Збройних Силах України, яка має

здійснюватися відповідно до передового досвіду, принципів і стандартів держав-членів НАТО».

З метою впровадження цього напрямку інноваційному розвитку в Збройних силах України (ЗСУ) підлягають, в першу чергу: принципи, форми, методи і технології застосування сил і засобів отримання інформації про стан військ і бойових систем противника, а також процеси добування, обробки, аналізу та доведення інформації про стан об'єктів противника до органів військового управління й компонентів озброєння та військової техніки.

Ці форми, методи, процеси і технології реалізуються та здійснюються в автоматизованій системі **C4ISR** (англ. Command and Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance – командування та управління, зв'язок, комп'ютери, розвідка).

У цьому напрямку реалізації оборонної політики України на сьогодні в закладах військової освіти і науки ЗСУ активно проводяться наукові дослідження з метою розробки всіх видів забезпечення мобільних сенсорних мереж військового (спеціального) призначення, які реалізують функції збору, обробки і передачі інформації про стан елементів військ і бойових систем противника, тим самим забезпечуючи вирішення задач в автоматизованій системі C4ISR.

Враховуючи зазначене, обраний нами напрям наукового дослідження є достатньо актуальним науковим завданням, виконання якого сприятиме інноваційному розвитку сенсорних мереж військового (спеціального) призначення.

Аналіз останніх публікацій

[1]. Описано принципи, особливості побудови і функціонування мобільних радіомереж типу Ad Hoc і MANET. Викладено теоретичні основи і приклади вирішення задач управління радіомережами на каналному, мережевому і прикладному рівнях моделі взаємодії відкритих систем OSI (The **Open Systems Interconnection** model).

[11]. Запропоновано метод збільшення «часу життя» безпроводової сенсорної мережі (БСМ) з надлишковою кількістю вузлів, який під час реалізації маршрутизації враховує енергію вузлів і надійність безпроводових з'єднань.

[10]. Наукова стаття присвячена вирішенню задачі розробки нових методів енергозбереження та методик їх застосування в сенсорних радіомережах спеціального призначення, які повинні забезпечувати зберігання енергетичних ресурсів вузлів за умови заданої якості передачі інформаційних потоків та адаптуватись до умов функціонування мережі.

[12]. У науковій статті розглянута задача розробки нових методів побудови БСМ, які дозволять дистанційно та оперативно здійснювати моніторинг стану природного середовища заданого регіону та оцінювати загрози й ризики виникнення надзвичайних ситуацій.

[13]. Запропоновано новий адаптивний енергозберігаючий алгоритм передачі даних при прийнятті рішень про стан сенсорної мережі на основі показань із сенсорів.

Мета статті: забезпечити ефективність функціонування підсистеми управління енергоресурсом вузлів сенсорної мережі військового (спеціального) призначення шляхом інновацій її прикладного математичного забезпечення (ПМЗ) (методів, моделей, методик і алгоритмів).

Наукове завдання статті: удосконалення схеми вирішення задач оперативного управління сенсорною мережею військового (спеціального) призначення в частині «методи – моделі прикладного математичного забезпечення» для заощадження енергоресурсу вузла мережі військового (спеціального) призначення.

Основна частина

Професор електромеханіки Крістофер Пістер (Каліфорнія, США) розробив концепцію «**smart dust**» (англ. smart dust – розумний пил). Згідно з цією концепцією він запропонував застосування систем, які складаються з довільної множини електромеханічних (електронних)

сенсорів (різного функціонального призначення), які здатні обмінюватись інформацією в будь-якому середовищі, де здійснюється моніторинг об'єктів, за якими здійснюється спостереження.

Проекція концепції «**smart dust**» на такі середовища, як театр проведення військових операцій, морські комунікації, частини і підрозділи збройних сил, згенерувала появу БСМ, які складаються з множини сенсорних вузлів (СВ) з інтегрованими функціями:

- моніторингу навколишнього середовища;
- обробки даних;
- передачі даних та ін.

Нині БСМ називають просто сенсорними мережами (СМ). На рисунку 1 представлено узагальнену структуру СМ.

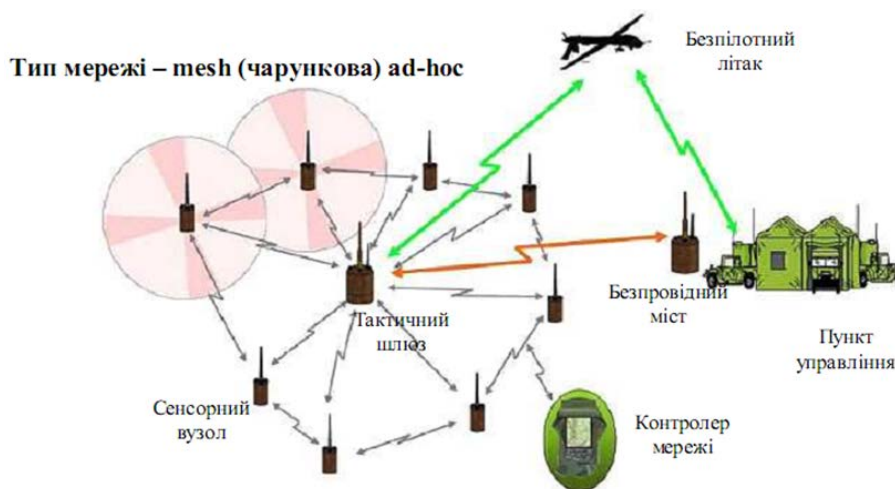


Рис. 1. Узагальнена структура СМ

Базова архітектура СМ і її основні інтерфейси були визначені науково-дослідницькою групою SGSN (Study Group on Sensor Networks) технічного комітету № 1 ISO/IEC JTC1, що дозволило виділити:

1. Види забезпечення СВ СМ:

- апаратне забезпечення;
- базове (системне) програмне забезпечення (комплекс програм, що забезпечують інфраструктуру СВ, на якій можуть працювати прикладні програми).

Головним компонентом базового програмного забезпечення є операційна система (комплекс взаємопов'язаних програм, призначених для управління ресурсами СВ та організації взаємодії з прикладними програмами, з апаратним обладнанням усіх підсистем СВ та користувачами):

- **прикладне математичне забезпечення** (реалізоване в прикладному програмному забезпеченні), яке являє собою сукупність сучасних математичних методів, моделей, алгоритмів, що забезпечують розв'язання функціональних задач у системі управління СВ;
- прикладне програмне забезпечення.

2. Базові інтерфейси СВ:

- програмний інтерфейс (інтерфейс між базовим і прикладним програмним забезпеченням СВ);
- інтерфейс користувача;
- інтерфейси між вузлами СМ;

- інтерфейс між СМ і зовнішнім середовищем (користувачі – органи військового управління, інформаційно-аналітична система ЗСУ).

Сенсорний вузол (*англ.* Sensornode) – це пристрій, який складається з одного або декількох взаємодіючих між собою сенсорів (рис. 2).

Основні вимоги до СВ:

- а) забезпечення роботи у СМ;
- б) *низьке енергоспоживання*;
- в) реалізація функції виділення й обробки сигналів на вході і виході вузла;
- г) можливість перетворення сигналів сенсорів (таких як сенсори фізичних, оптичних, електрохімічних і т. ін.) у зручну форму для подальшої обробки і передачі даних.

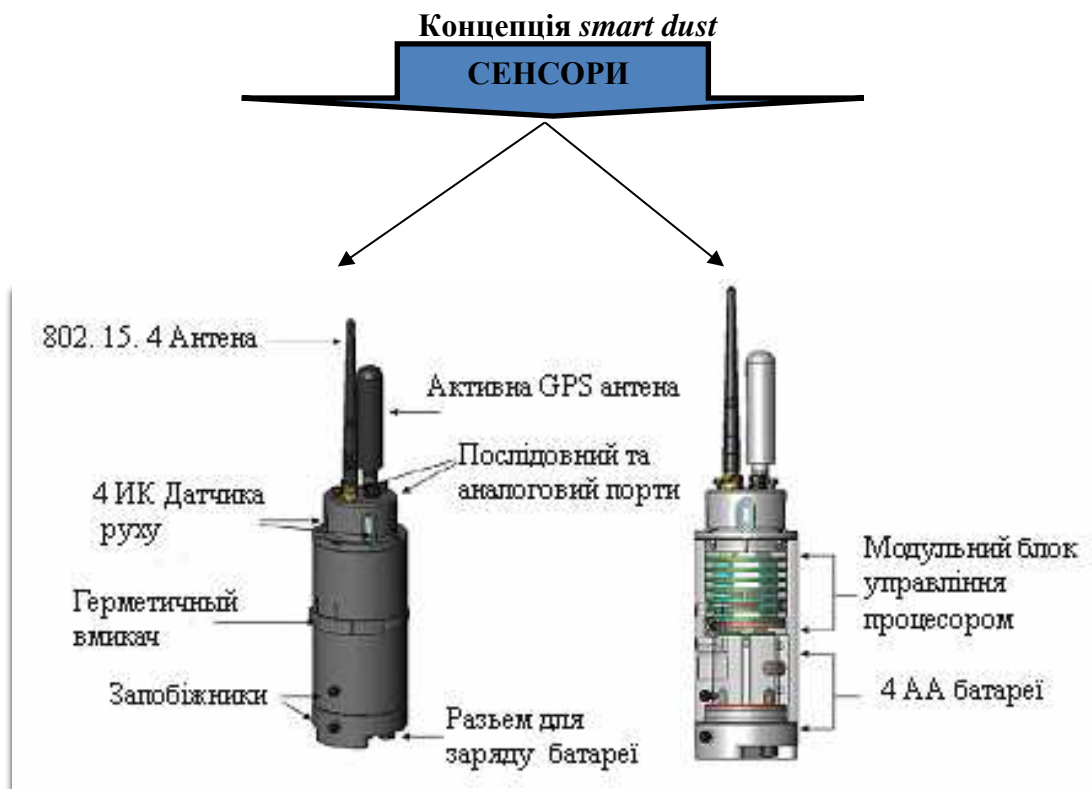


Рис. 2. Сенсори у складі вузла СМ

Групою SGSN визначено, що СВ (як система) складається з таких підсистем:

А) *обчислювальна підсистема* – здійснює обробку даних і забезпечує виконання всіх функцій СВ. Головним елементом цієї підсистеми є мікроконтролер MCU (*англ.* Micro Controller Unit).

До складу мікроконтролера *MCU* входять:

- процесор;
- оперативна пам'ять;
- незалежна пам'ять;
- флеш-пам'ять;
- аналого-цифровий перетворювач (ADC);
- таймер;
- порти введення-виведення даних;

Б) *комунікаційна підсистема* – система для управління процесами зв'язку, взаємодії та обміну даними між СВ. Центральним компонентом комунікаційної підсистеми є радіо – трансивер (приймопередавач);

В) *сенсорна підсистема* – складається із сенсорів, які являють собою датчики (первинні перетворювачі), які сприймають об'єкт контролю (танк, літак, ракета, підводний човен, гармата й ін.). Одночасно сенсор є пристроєм у вигляді конструктивної сукупності одного або декількох вимірювальних перетворювачів величини, яку вимірюють і контролюють, та котрий виробляє вихідний сигнал, зручний для дистанційного передавання, зберігання та використання в системі **C4ISR**.

Г) *підсистема електроживлення* – забезпечує енергетичне постачання всіх елементів СВ.

Основною метою застосування СМ у ЗСУ є контроль і моніторинг вимірюваних параметрів об'єктів противника.

Процес збору даних і управління в СВ представлено на рисунку 3.

На сьогодні СМ знаходяться на початковому етапі впровадження в сектор безпеки і оборони України, включно з моніторингом навколишнього середовища, контролем руху військових об'єктів у просторі та ін.

Розглянуті характеристики СМ (відповідно до стандарту IEEE 802.15.4) дозволяють стверджувати, що технологія СМ є:

- 1 – стійкою у налагодженні;
- 2 – має високі експлуатаційні параметри.

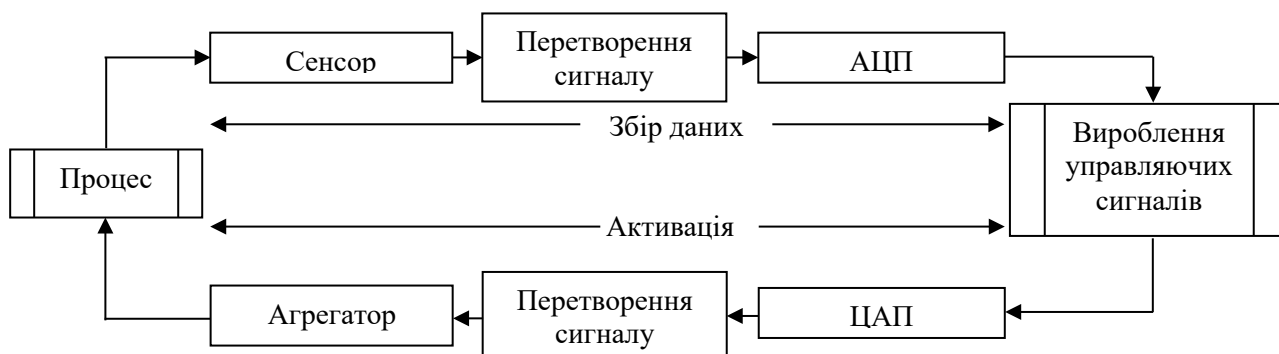


Рис. 3. Збір даних і управління в СВ

Згідно зі стандартом IEEE 802.15.4:

- а) в СМ повинна бути узгоджена дальність передачі/прийому інформації;
- б) в СМ повинна бути реалізована процедура отримання підтвердження про успішну доставку повідомлень;

в) *енергоспоживання повинне бути якомога меншим* завдяки низькій швидкості передачі даних і відповідати вимогам до «часу життя» СВ.

У стандарті 802.15.4 затверджена робота СМ двох рівнів моделі OSI взаємодії відкритих систем (*фізичний і канальний рівні*).

Загальна класифікація сенсорних мереж спеціального призначення (СМСП):

- а) за мобільністю: стаціонарні, рухомі (роботи), гібридні;
- б) за середовищем моніторингу: надземні, підземні, повітряні, морські;
- в) за організацією: децентралізовані, ієрархічні, гібридні;
- г) за видом моніторингу: акустичні, оптичні, сейсмічні тощо.

Враховуючи основні відмінності та особливості системи управління СМСП та основні вимоги до неї, визначено основний принцип її функціонування – **принцип функціональності управління**.

Сутність *принципу функціональності управління* полягає в об'єднанні функцій системи управління СМСП у відносно незалежні групи.

Впровадження методу аналізу в дослідженні СМСП та цього принципу дозволяє здійснити декомпозицію управління мережею на підсистеми (що значно спрощує задачу розробки ПМЗ) та виділити **підсистему управління енергоресурсом вузлів СМСП**.

Підсистеми управління:

- маршрутизацією;
- топологією;
- навантаженням;
- безпекою;
- **енергоресурсом вузлів СМСП;**
- радіоресурсом;
- якістю обслуговування Qos;
- збору та зберігання інформації;
- та підсистеми реалізації рішень і моніторингу.

Метою функціонування *підсистеми управління енергоресурсом вузлів СМСП* є мінімізація витрат енергоресурсу СВ та забезпечення вимог до «часу життя» мережі.

Необхідно зазначити, що функціональні підсистеми СВ_i витрачають різну кількість енергії батарей. Тому управління витратами енергоресурсу вузлів СМСП може бути реалізовано:

- 1) за різними функціями управління і рівнями еталонної моделі OSI взаємодії відкритих систем (фізичному, каналному, мережному);
- 2) методами збереження витрат електроенергії комунікаційною підсистемою вузла СМСП (управління потужністю прийому-передачі);
- 3) методами збереження енергії батарей електроживлення СВ;
- 4) методами мінімізації споживання електроживлення підсистемами (сенсорної, обчислювальної, комутаційної) СВ СМСП.

Значна увага в наукових виданнях [2; 3; 5; 10] приділена методам збереження витрат електроенергії комунікаційною підсистемою вузла СМСП:

- між сусідніми вузлами СМСП (фізичний рівень еталонної моделі);
- при управлінні топологією (каналний і мережевий рівні еталонної моделі);
- при маршрутизації (мережевий рівень еталонної моделі);
- при застосуванні технологій спрямованих антен чи позиціонування (каналний і мережевий рівень еталонної моделі);
- тимчасове виключення прийомопередавачів – трансиверів (між сусідніми вузлами, в масштабах СМСП або її зони);
- зменшення добових передач;
- застосування енергозалежних метрик вибору маршрутів;
- зменшення службового трафіку;
- застосування R-зонової маршрутизації.

Менше уваги науковці приділяють методам збереження витрат електроенергії обчислювальною та сенсорною підсистемою вузла СМСП, а також методам узгодження дій окремих підсистем СВ СМСП при вирішенні задачі комплексної оптимізації витрат енергоресурсу СВ.

ПМЗ управління витратами енергоресурсу вузла СМСП складається із методів, алгоритмів та моделей функціонування **підсистеми управління енергоресурсом вузла СМСП**.

Сутність процесу оперативного управління СМСП полягає в забезпеченні підтримки значень показників її функціонування на рівні заданих шляхом доведення до її елементів управляючих впливів, які є результатом рішень задач управління.

Узагальнена схема вирішення задач оперативного управління СМСП представлена на рисунку 4.

Розв'язанню задачі Z_{ijk}^r (де $i = \overline{1, I}$ – рівень СМСП; $j = \overline{1, J}$ – функціональна підсистема СВ СМСП; r – рівень оперативного управління (організаційного або технологічного); $k = \overline{1, K}$ – рівень моделі OSI) передують орієнтація (визначення) щодо рівнів оперативного управління СМСП, рівня моделі OSI і функціональної підсистеми СВ СМСП, а також визначення початкових даних для розв'язання задачі на базі моделі організації інформаційних ресурсів.

Вибір методу, алгоритму розв'язання задачі, моделі елемента застосування задачі і оптимізації її розв'язання здійснюється на основі використання компонентів ПМЗ.

Для виконання свого цільового призначення ПМЗ оперативного управління СМСП повинно характеризуватися властивостями, які визначаються:

- 1) системою управління СМСП в цілому;
- 2) функціональними підсистемами СВ СМСП;
- 3) базовими положеннями з побудови ПМЗ.

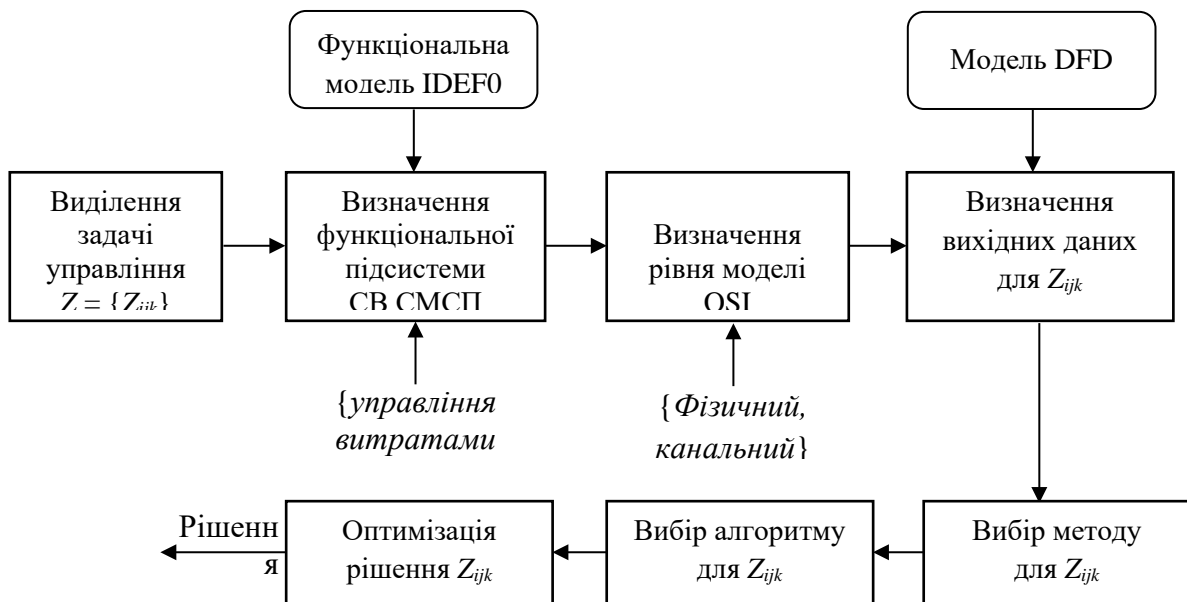


Рис. 4. Узагальнена схема вирішення задач управління СМСП

Перша група властивостей визначає здатність ПМЗ задовольнити потреби СВ СМСП у виконанні свого функціонального призначення. До цієї групи властивостей віднесемо забезпечення обґрунтованості управління і забезпечення оперативності управління (табл. 1).

До другої групи відносяться властивості, які проявляються у взаємодії з функціональними підсистемами СВ СМСП і які окреслюють умови їхнього функціонування. Такою властивістю є якість ПМЗ по k -й підсистемі.

Отже, за головну властивість ПМЗ управління витратами енергоресурсу СВ можна прийняти функціональну якість ПМЗ.

Ця властивість може бути оцінена узагальненим показником – коефіцієнтом якості ПМЗ для k -ї підсистеми:

$$K_{\text{їс}}^k = F(V_{\text{їс}}^k, C_{\text{їс}}^k, R_{\text{їс}}^k),$$

де $V_{\text{ПС}}^k$ – показник повноти ПМЗ в k -й функціональній підсистемі СВ МК;

Таблиця 1

Властивості ПМЗ і показники для їхньої оцінки

Властивості ПМЗ		Показники оцінки
Група	Назва	
1	Забезпечення обґрунтованості управління	Коефіцієнт ступеня забезпечення відповідності сформованого рішення меті операції $K_a(t) = \sum_{i \in I^k} [1 - (x_i^p(t) - x_i^i(t) / \max(x_i^p(t), x_i^i(t)))] / I $
	Забезпечення оперативності управління	Час формування рішення $T_i = T_1 = f(\dot{A})$
2	Функціональна якість ПМЗ	Узагальнений показник якості ПМЗ для k -ї підсистеми: $K_{\text{ПС}}^k = F(V_{\text{ПС}}^k, C_{\text{ПС}}^k, R_{\text{ПС}}^k)$, де $V_{\text{ПС}}^k = \frac{W_{z^*}^k}{W_z^k}$ – показник повноти ПМЗ; $ \bar{a} - a \leq C_{\text{ПС}}^k$ – показник точності ПМЗ; $R_{\text{ПС}}^k = P(\bar{a} - a \leq C_{\text{ПС}}^k)$ – показник достовірності ПМЗ
3	Модульність	Коефіцієнт сумісності компонентів ПМЗ $K_c = f(A = \{A^k\}, \varphi = \{\varphi_i\}, Z = \{Z_{ijk}\})$
	Управляємість	Ймовірність своєчасного створення діючої конфігурації ПМЗ $P_{\text{СК}} \geq P_{\text{СК}}^H$
	Реалізованість	Коефіцієнт реалізованості $K_p = f(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5)$
	Інформаційна визначеність	Коефіцієнт невизначеності вибору необхідних даних для розв'язання задачі $Z_{ijk} \cdot E_B = f(J, J_H) \leq 0,5$

$V_{\text{ПС}}^k = \frac{W_{z^*}^k}{W_z^k}$, $W_{z^*}^k$ – кількість задач k -ї підсистеми СВ, яка забезпечена засобами ПМЗ;

W_z^k – загальна кількість задач k -ї підсистеми СВ СМСП;

$C_{\text{ПС}}^k$ – показник точності ПМЗ в k -й функціональній підсистемі СВ СМСП, який може бути визначений із виразу $|\bar{a} - a| \leq C_{\text{ПС}}^k$ (a – передбачуваний результат забезпечення роботи k -ї функціональної підсистеми, \bar{a} – статистична оцінка цього результату);

$R_{\text{ПС}}^k$ – показник достовірності ПМЗ в k -й функціональній підсистемі СВ СМСП, який може бути визначений як $R_{\text{ПС}}^k = P(|\bar{a} - a| \leq \tilde{N}_{\text{ПС}}^k)$.

Проведемо аналіз методів управління витратами енергоресурсу в СМ:

Методи зменшення потужностей передач між сусідніми вузлами СМСП зі збереженням необхідних параметрів радіоканалу, таких як:

- необхідного рівня відношення сигнал/завада, нормованого на біт SINR. Мінімальне значення SINR (англ. Signal to Interference + Noise Ratio) для стабільної роботи в СМСП становить 10 дБ;
- коефіцієнта бітових помилок BER (англ. Bit Error Ratio) й ін.

Встановимо такі початкові дані:

- СМСП являє собою N випадково розташованих СВ;
- позначимо максимальну потужність передавача i -го СВ через P_i^{max} .

Тоді для успішної доставки повідомлення від СВ_i до СВ_j необхідно, щоб представлення рівня відношення сигнал/завада, нормованого на біт SINR, було більше певного порогу β, що визначає коефіцієнт бітових помилок BER (1):

$$\text{SINR} = \frac{P_{ij} G_{ij}}{\sum_{k \neq j} P_{kj} G_{kj} + \eta_j} \geq \beta, \quad (1)$$

де $i, j, k \in \mathbb{N}$;

P_{ij} – потужність передачі трансивера i -го СВ;

G_{ij} (величина загасання сигналу між вузлами ij) визначається як $G_{ij} = kaF dij - \alpha$ (ka – коефіцієнт, що характеризує антени, що використовуються); F – коефіцієнт ослаблення сигналу антени; dij – відстань між СВ; α – ступінь втрати потужності (яка задається $\alpha = 2 \div 4$);

η_j – спектральна потужність шуму приймача трансивера j -го СВ.

У випадку коли рівень сигналу передавача трансивера СВ перевищує заданий поріг, здійснюється зменшення потужності передачі (і відповідно зменшуються витрати енергоресурсу СВ).

Якщо час очікування повідомлення для протоколу каналного рівня перевищено, то передача здійснюється з більшою потужністю передавача P_{ij} (і відповідно збільшуються витрати електроенергії).

Управління потужністю передачі трансивера СВ в каналі (ij) здійснюється за наступним ітераційним правилом (2):

$$P_{ij}(n+1) = \min(P^{\max}, \frac{\beta}{\text{SINR}_{ij}(n)} P_{ij}(n)), \quad (2)$$

де n – номер ітерації.

Результати моделювання цього методу показали, що регулювання потужності передачі трансивера СВ дозволяє зменшити витрату енергії на 10–20 % при збільшенні пропускної здатності до 15 % [10].

Методи управління топологією СМСП передбачають перерозподіл потужностей передач трансиверів СВ P_i та/або зміну спрямованості їхніх антен [6].

Збільшення потужності передачі трансивера СВ призводить до більшої витрати енергії батарей.

Зменшення потужності передачі трансивера СВ дозволяє зменшити витрати енергії батарей СВ, але призводить до збільшення часу доставки повідомлення та збільшення обсягу службового трафіка.

У наукових виданнях [7; 8] описано методи децентралізованого управління топологією СМ:

1) Метод *BSP* (англ. *BPS* – Planar Power Efficient Structure) використовує систему позиціонування, будує планарний граф (**Планарний граф** – граф, який може бути зображений на площині без перетину ребер), що має мінімальну сумарну потужність передачі по всіх маршрутах СМ (що призводить до зменшення витрати енергоресурсу СВ).

2) Метод *COMROW* передбачає оптимізацію загальної потужності передач в СМ за допомогою зміни її зв'язності (менша потужність передачі – менша зв'язність).

Методи застосування спрямованих антен і системи позиціонування. Ці методи дозволяють знизити рівень взаємних перешкод і збільшити енергетику радіоканалів.

Прямі методи збереження енергії батарей

1-й метод. *Тимчасове відключення прийомопередавача трансивера СВ* (пасивний режим або режим «сон»).

Метод «сон» вже стандартизовано. Він припускає централізоване управління відключенням СВ і тому має обмеження для застосування в СМСП.

Значно більший спектр застосування отримав децентралізований варіант цього методу PAMAS (Power Aware Multiple-Access Protocol) [8], який реалізує пасивний режим між сусідніми вузлами.

2-й метод. Зменшення числа повторних передач, які викликані зіткненнями пакетів (тобто методи канального доступу, що забезпечують мінімум зіткнень пакетів, а тому зменшують витрати енергії).

3-й метод. Вибір маршрутів за метриками, що враховує витрату енергоресурсу СВ при передачі/прийому повідомлень і/або ємність батарей [6].

При застосуванні цього методу використовуються такі типи метрик:

а) метрика – потужність, що витрачається на передачу/прийом вузла;

б) метрика – ємність батарей вузлів;

в) багатопараметрична метрика – потужність передачі вузлів, ємність батарей та ін.

Для впровадження методів управління витратами енергоресурсу в систему оперативного управління СМСП пропонується розробка її функціональної моделі на платформі методології IDEF (Integrated Definition – цілісна точність), яка стала стандартом в США та ряді країн Європи.

На рисунку 5 представлена контекстна діаграма оперативного управління СМСП, а на рисунку 6 – діаграма підсистеми управління енергоресурсом СМСП, які розроблені за допомогою програмного забезпечення IDEF – методології AllFusion Process Modeler r.7 (Platinum BPWin).

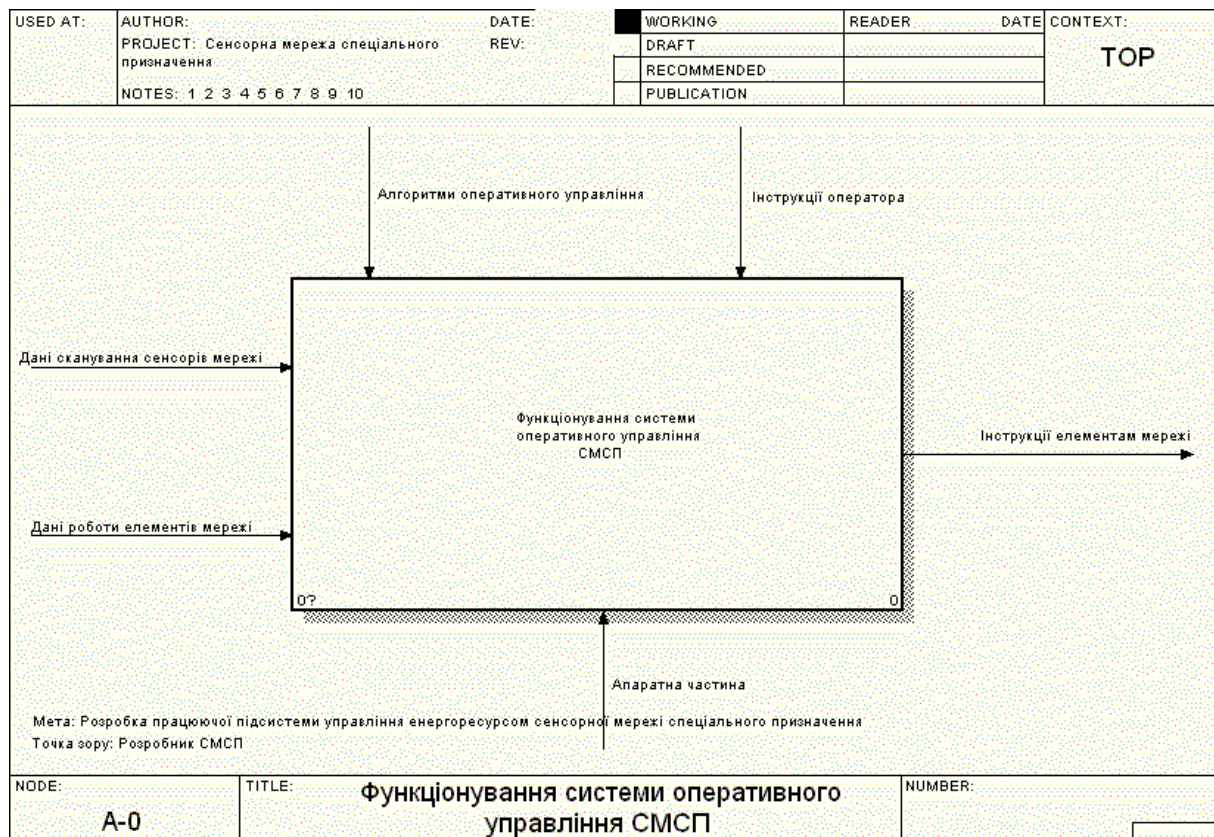


Рис. 5. Контекстна діаграма оперативного управління СМСП

Діаграма A15 розкриває складові підсистеми управління енергоресурсом, поділяючи основні функції за трьома процесами:

- управління міжсистемною взаємодією та формування рішення;
- управління потужністю передачі;
- збереження енергії батареї.

Після прийому йде опрацювання даних з урахуванням алгоритмів оперативного управління енергоресурсом та формування рішення підсистеми управління енергоспоживанням. Опрацьовані дані отримуються у підсистемах управління потужністю передачі та збереження енергії батареї. За допомогою них апаратно змінюються витрати заряду батареї відповідно до вирахованих раніше показників для збереження поточної ємності батареї або перехід сенсора у режим сну для збереження роботоздатності елемента мережі.

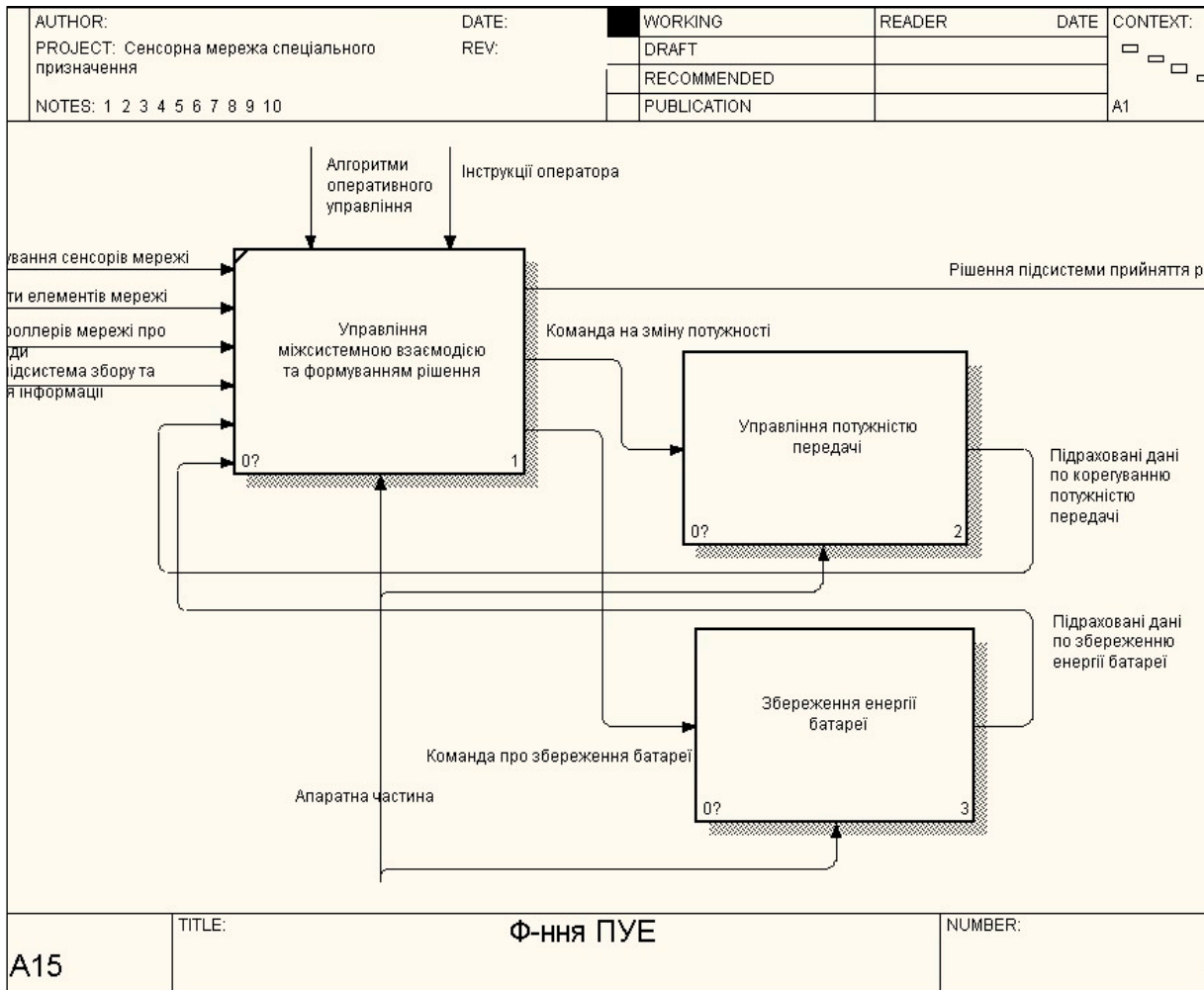


Рис. 6. Діаграма підсистеми управлінням енергоресурсом СМСП

Підсистема управління потужністю передачі використовує метод зменшення потужностей передач між сусідніми вузлами зі збереженням необхідних параметрів радіоканалу, а підсистема збереження енергії батареї застосовує метод тимчасового відключення прийомопередавача (трансивера) СВ.

Застосувавши принцип декомпозиції функціональних блоків для деталізації і уточнення методів управління витратами енергоресурсу в СМСП, отримаємо IDEF Model (як множину діаграм, їхні текстові описи та глосарій), які графічно і вербально відображають й описують функції підсистеми управління витратами енергоресурсу в СМСП.

На рисунку 7 представлено розроблену діаграму управління потужністю передачі, а на рисунку 8 – діаграму управління збереженням енергії батареї сенсора.

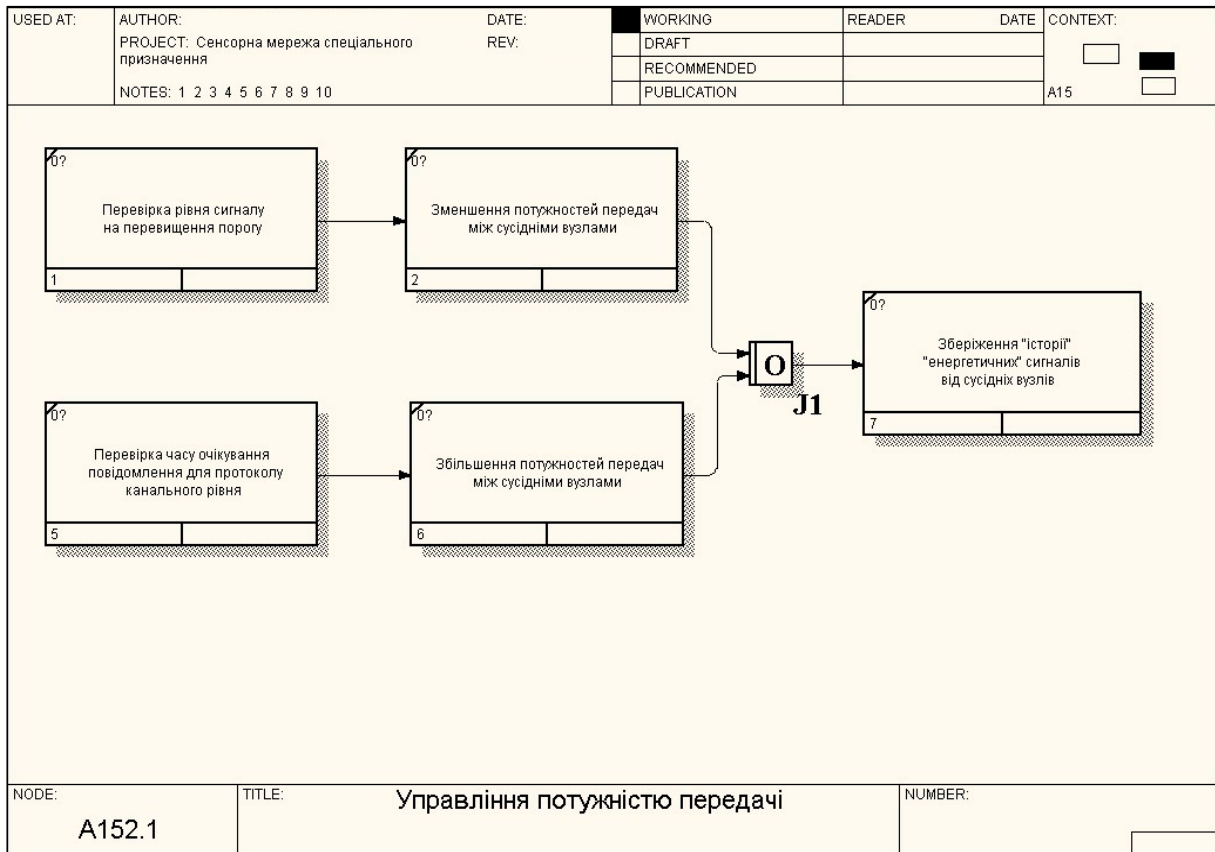


Рис. 7. Діаграма управління потужністю передачі

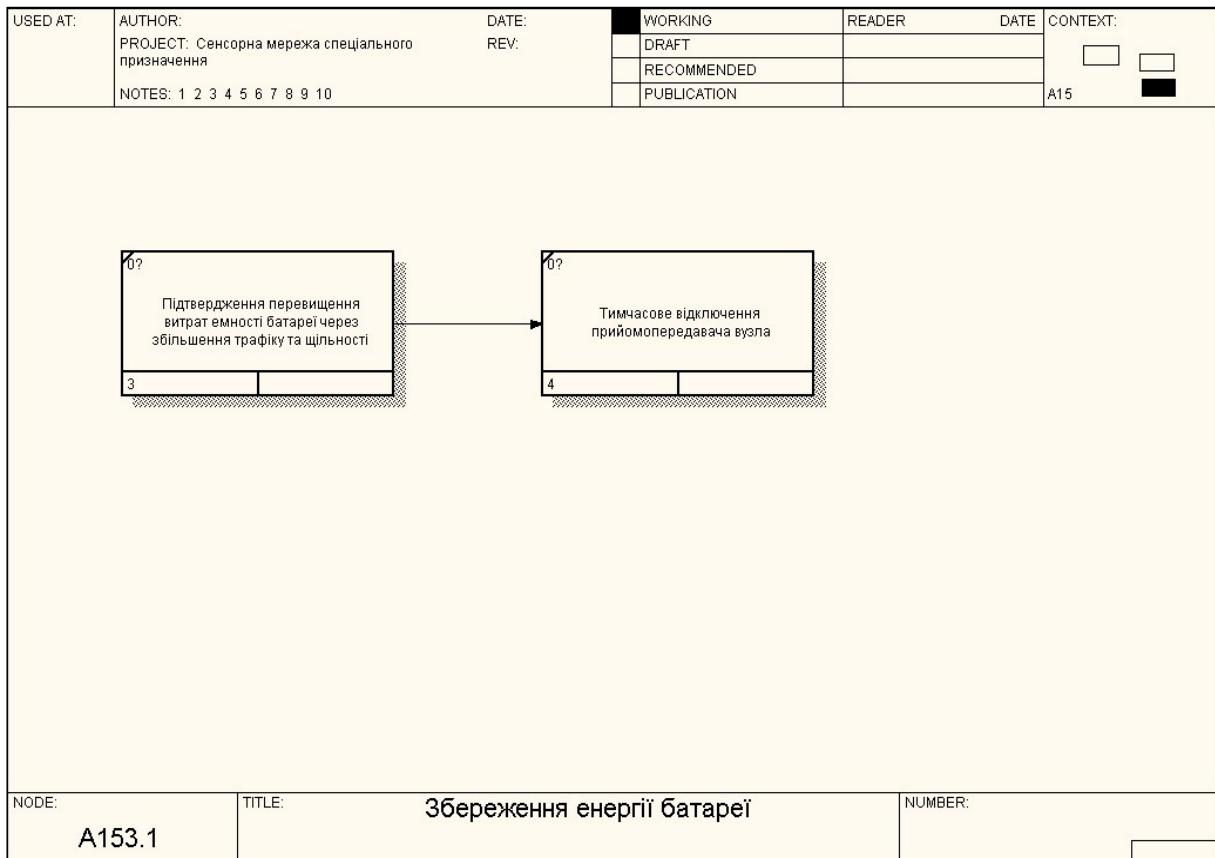


Рис. 8. Діаграма управління збереженням енергії батареї сенсора

Контекстна діаграма А-0 та діаграма підсистеми управління енергоресурсом СМСП А15 розроблені в методології IDEF0 функціонального моделювання, які описують функціональний зміст СМ у вигляді ієрархічної системи взаємопов'язаних функцій.

В свою чергу виконання кожної функції потребує реалізації технологічних процесів. Для опису (документування) технологічних процесів, які реалізуються в системі управління СМ при виконанні її функцій, застосована методологія IDEF3, яка надає інструментарій для візуального моделювання і дослідження сценаріїв технологічних процесів, що реалізуються в системі. Виконання кожного сценарію супроводжується відповідним документообігом.

Модель технологічного процесу в нотації IDEF3 являє собою діаграму PFDD (*англ.* Process Flow Description Diagramm – опис послідовності етапів процесу). Діаграми управління потужністю передачі А152.1 (див. рис. 7) та управління збереженням енергії батареї сенсора А153.1 (див. рис. 8) якраз і є діаграмами PFDD.

Отже, розроблена IDEF-model системи управління СМ дозволить системно (комплексно) перейти до етапу алгоритмізації і програмування функцій підсистеми управління витратами енергоресурсу СМСП.

Висновки

1. В інноваційному розвитку БСМ у секторі безпеки та оборони України можна, насамперед, виділити удосконалення енергоефективності СМСП (актуальним є дослідження тривалості функціонування вузлів СМСП («часу життя») через вдосконалення систем живлення вузлів, використання енергоефективних технологій, альтернативних джерел енергії та удосконалення компонентів ПМЗ управління витратами енергоресурсу вузлів мережі).

2. Управління енергоспоживанням вузлів СМСП повинно здійснюватися комплексно за функціями управління мережею на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем OSI (фізичному, каналному, мережевому).

3. Стандартом IEEE802.15 визначено, що «енергоспоживання в сенсорній мережі повинно бути якомога меншим за рахунок низької швидкості передачі даних і відповідати вимогам до часу життя СВ», але не сформульовано вимоги до енергозбереження в СВ завдяки застосуванню енергоекономних методів за різними функціями управління і рівнями моделі взаємодії відкритих систем (OSI).

4. Проведені дослідження елементів ПМЗ (моделей, методів) управління витратами енергоресурсу СМСП показали, що застосування розглянутих методів дозволяє в середньому збільшити «час життя» СМСП у 1,5–2 рази.

5. Комплексне застосування сукупності методів управління енергоресурсом буде визначатися проектом конкретної СМСП, предметною областю її застосування і прийнятими рішеннями щодо реалізації інших функцій управління мережею.

Подальші шляхи досліджень

1. Розробка методики побудови ПМЗ управління витратами енергоресурсу СВ СМ, яке буде орієнтоване для потреб всіх підсистем оперативного управління СМСП і яке можливо органічно вбудувати в середовище реалізації процесів управління.

2. Дослідження проблем надійності і функціональної стійкості ПМЗ управління витратами енергоресурсу СМСП.

3. Дослідження науково-методичних аспектів формування складу ПМЗ управління витратами енергоресурсу для архітектури СМ конкретного застосування та специфіки бойового використання СМ.

4. Розробка методичного підходу до вирішення задачі оцінки ефективності методів ПМЗ в контексті управління витратами енергоресурсу СМСП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про Стратегічний оборонний бюлетень України: рішення Ради національної безпеки і оборони від 20.08.2021 № 0063525-21 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0063525-21>.
2. Бунин С. Г., Войтер А. П., Ильченко М. Е., Романюк В. А. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. К.: НПП «Издательство наукова думка НАН України». 444 с.
3. Шиллер Й. Мобильные коммуникации. Пер. с англ. М.: «Вильямс», 2002. 384 с.
4. Narayanaswamy S., Kawadia V., Sreenivas R. S., Kumar P. R. Power control in ad-hoc networks: Theory. Architecture, algorithm and implementation of the COMROW protocol // In Proceedings of EuroWireless. No. 02. 2002. P. 156–162.
5. Singh S., Raghavendra C. S. PAMAS – power aware multi – access protocol with signaling for adhoc networks // ACM Computer Communications Review, 1998.
6. Xu Y., Heideman J., Estin D. Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing // In Proceedings IEEE MOBICOM. No. 01. 2001.
7. Wang B., Gupta K. S. S-Remit: A Distributed Algorithm for Source-based Energy Efficient Multicast in Wireless Ad Hoc Networks // In Proceedings of GLOBECOM. No. 03. 2003.
8. Sheu J.-P., Chang Y.-C., Tsai H.-P. Power-Balance Broadcast in Wireless Mobile Ad Hoc Networks // In Proceedings of EuroWireless. No. 04. 2004.
9. Шаціло П. В., Цуркан В. В. Методологія аналізу, моделювання та проектування систем і процесів IDEF: навч. посіб. К: Вид-во ІСЗЗІ НТУУ «КПІ», 2012. 148 с.
10. Коваленко І. Г. Аналіз методів енергозбереження в сенсорних радіомережах // Зб. наук. праць ВІТІ НТУУ «КПІ». 2011. № 1. С. 76–84.
11. Новіков В. І. Метод збільшення часу життя безпроводної сенсорної мережі з надлишковою кількістю вузлів під час стеження за цілями моніторингу. К: Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки». Том 28 (67). 2017. № 2.
12. Лисенко О. І. Функціональна модель системи управління безпроводною сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища / О. І. Лисенко, К. С. Козелкова, В. І. Новіков, Т. О. Прищепка, А. В. Романюк // Системи обробки інформації. 2015. Вип. 10 (135). С. 222–226.
13. Гаптельманов А., Міхаль О., Щепка О. Підвищення енергозбереження бездротових сенсорних мереж з використанням методів машинного навчання // Системи управління, навігації та зв'язку. 2022. № 4.