УДК 621.317.7:681.325

Я. М. Антонюк, А.М. Мацаєнко

ОСОБЛИВОСТІ ДЕТЕКТУВАННЯ РУХОМИХ АВТО- І БРОНЕОБ'ЄКТІВ ІЗ ПРОГРАМНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ДРЕЙФУ ГЕОМАГНІТНОГО ФОНУ

Анотація. *У роботі запропоновано концепцію та математичне обґрунтування автономного пристрою прихованого виявлення авто- та бронетехніки на базі доступної елементної бази (мікроконтролер серії «ATmega», магнітометр HMC5883L). Розроблено алгоритм обробки сигналів із використанням експоненційного ковзного середнього для компенсації добових і сезонних коливань геомагнітного поля. Побудовано аналітичну модель вірогідності детектування залежно від швидкості цілі та періоду опитування сенсора. Показано, що реалізація режиму глибокого сну дозволяє досягти середнього струмоспоживання порядку 20 мкА, що забезпечує багаторічну автономну роботу пристрою.*

Ключові слова: *магнітна аномалія, енергоефективність, сторожовий таймер, мікроконтролер ATmega328P, HMC5883L, ймовірність виявлення.*

Abstract. *The paper proposes a concept and mathematical substantiation for an autonomous covert detection device for vehicles and armored vehicles based on accessible hardware components (ATmega series microcontroller, HMC5883L magnetometer). A signal processing algorithm using an exponential moving average (EMA) filter is developed to compensate for diurnal and seasonal variations of the geomagnetic field. An analytical model of the detection probability as a function of target speed and sensor polling period is constructed. It is demonstrated that the implementation of the deep sleep mode achieves an average current consumption of about 20 μ\muμA, ensuring multi-year autonomous operation of the device.*

Keywords: *magnetic anomaly, energy efficiency, watchdog timer, ATmega328P microcontroller, HMC5883L, detection probability.*

Сучасні системи моніторингу території часто базуються на радіолокаційних або оптичних методах, які потребують значного енергозабезпечення та складної інфраструктури. Магнітометричні методи є перспективною альтернативою завдяки пасивності прийому та низькій чутливості до погодних умов. Однак існуючі рішення мають суттєві недоліки: високу вартість високоточних сенсорів та нестійкість до повільних змін («дрейфу») фонового геомагнітного поля, що спричиняє хибні спрацювання. Актуальним є створення дешевого, енергоефективного модуля, здатного працювати в польових умовах тривалий час без обслуговування.

Мета даної роботи — розробка апаратно-програмної архітектури автономного магнітного детектора та дослідження впливу параметрів дискретного опитування на ефективність фіксації рухомих цілей.

Для вирішення поставленого завдання використано комбінацію тривісного магнітометра *HMC5883L* (технологія *AMR*) та мікроконтролера серії «*ATmega328*». Вибір зумовлений мінімальним енергоспоживанням в режимі «*Sleep Mode*» та широкою доступністю компонентів.

Ключовою проблемою при роботі на грунті є дрейф фонового поля $B_g(t)$, який може сягати десятків нТл на годину. Для усунення його впливу на роботу сенсора запропоновано використовувати динамічне оновлення «нульової» точки методом експоненційного ковзного середнього (*EMA*):

$$B_o(k) = \alpha|B(k)| + (1-\alpha)|B_o(k-1)|,$$

де α — коефіцієнт адаптації (0<α<1), що визначає інерційність фільтра. Реакція на об'єкт визначається як відхилення

$$\Delta B(k) = |B(k) - B_o(k)|.$$

Енергоефективність забезпечується циклічним переходом мікроконтролера в режим *Power-down* між вимірюваннями. Пробудження здійснюється за внутрішнім сторожовим таймером (*WDT*) з періодом T_{WDT}.

Для оцінки ефективності побудовано геометричну модель перетину зоною чутливості. Вірогідність виявлення P_{det} об'єкта, що рухається зі швидкістю v через зону дії радіуса L. Критична швидкість гарантованого виявлення визначається таким чином:

$$v_{crit} = T_{WDT} 2L$$

В ході дослідження було проведено моделювання роботи алгоритму в умовах наявності шумів та дрейфу фону. Результати демонструють, що при коефіцієнті α=0,02 система стабілізує базовий рівень протягом 15–20 хвилин після розгортання, повністю компенсуючи повільні зміни поля. Графічна залежність вірогідності виявлення P_{det} від швидкості руху об'єкта наведена на рис. 1.

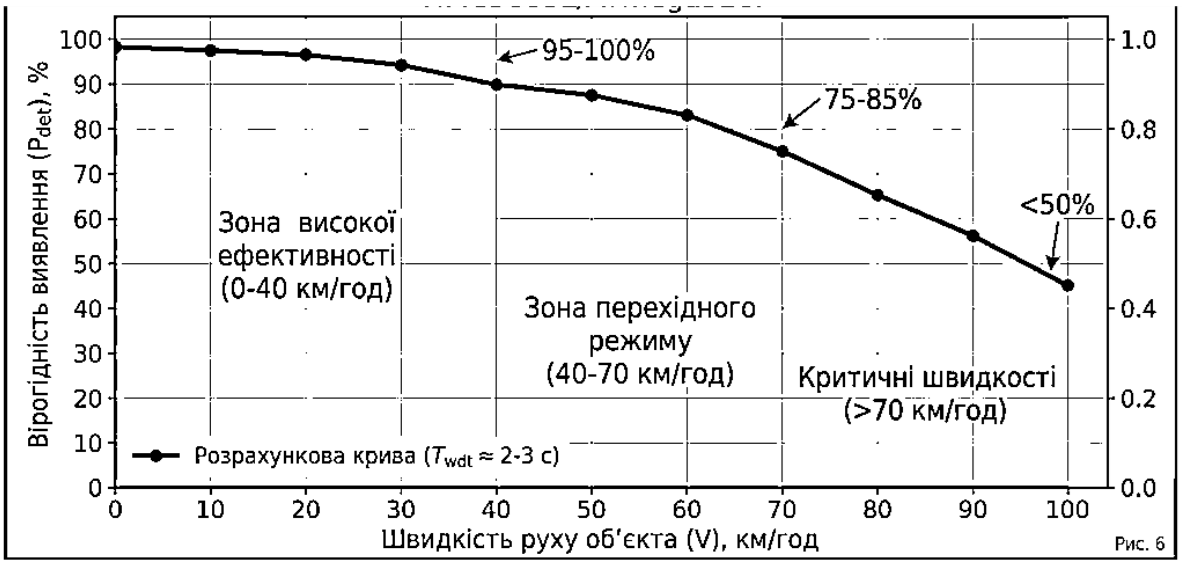


Рис. 1. Залежність вірогідності виявлення P_{det} від швидкості руху об'єкта v при різних періодах пробудження таймера *WDT* (L=10 м)

Аналіз графіка свідчить, що вибір періоду T_{WDT} є компромісом між енергією та точністю. При T_{WDT} =2с гарантована фіксація техніки можлива на швидкостях до 36 км/год. Зменшення періоду до 1с розширює діапазон до 72 км/год, але подвоює енергоспоживання.

Розрахункове середнє струмоспоживання пристрою в режимі T_{WDT} = 2T_{WDT} =2 с становить близько 23 мкА. Це дозволить живити пристрій від елемента живлення типу *L*2032 (ємністю ~ 200 мА·год) протягом 4 – 5 місяців.

В якості висновків слід зауважити наступне:

1) запропоновано архітектуру бюджетного магнітного детектора, що поєднує дешеві компоненти з алгоритмом цифрової фільтрації;

2) математично обґрунтовано можливість використання простого *EMA*-фільтра для усунення дрейфу геомагнітного фону без втрати чутливості до імпульсних аномалій;

3) встановлено, що програмна зміна періоду T_{WDT} дозволяє адаптувати пристрій під різні тактичні задачі (від статичного моніторингу до фіксації швидкісних колон) без зміни апаратної частини.

Список використаних джерел:

1. Honeywell International Inc. HMC5883L 3-Axis Digital Compass IC Datasheet. 2012.
2. Microchip Technology Inc. ATmega328P/PB Datasheet. 2024.
3. Li J., et al. Magnetic field modeling of vehicle based on equivalent magnetic charge method IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58(4). P. 1–5.
4. Chen M., et al. Energy-efficient wake-up mechanisms for ultra-low-power IoT nodes // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6(3). P. 4500–4510.

Антонюк Ярослав Михайлович *- старший науковий співробітник, начальник відділу Інституту інформаційних технологій та систем НАН України (ІІТС). М. Київ, вул. Академіка Глушкова, буд. 40, інд. 03187. E-mail ant@noc.irtc.org.ua. ORCID http:// orcid.org/ 0009-0005-7680-5950*

Мацаєнко Андрій Миколайович *– кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроніки та схемотехніки Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв Крут. М. Київ, вул. Князів Острозьких, буд. 45/1, інд. 01011. E-mail matsaenko2015@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1149-7318*

Antoniuk Yaroslav Mykhailovych — *Senior Researcher, Head of Department, Institute of Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine (IITS). Kyiv, Akademika Glushkova St., 40, 03187, Ukraine. . E-mail ant@noc.irtc.org.ua. ORCID: http://orcid.org/0009-0005-7680-5950*

Matsaenko Andriy Mykolaiovych *— PhD in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Electronics and Circuit Engineering, Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Kruty (MITI). Kyiv, Knyaziv Ostrozhskykh St., 45/1, 01011. E-mail matsaenko2015@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1149-7318*