

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НАДЗЕМНИХ ПЕРЕХОДІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ МАГНЕТОАІЗОТРОПНИМ МЕТОДОМ

С. М. Мінаков ¹, В. М. Учанін ², А. С. Мінаков ¹

¹ Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
Національної академії наук України, Львів

E-mail: minakovsergey61@gmail.com, vuchanin@gmail.com

Запропоновано автономний пристрій для магнетоанізотропного моніторингу напруженого стану надземних переходів магістральних трубопроводів, який складається з магнетоанізотропних перетворювачів (до 6 шт.), які розташовані рівномірно на одному перерізі трубопроводу; блоку оброблення сигналів перетворювачів, який їх підсилює та здійснює аналогово-цифрове перетворення, обробку і складання SMS повідомлення та передачу через інтерфейс RS-232 на GSM модем із направленою антеною; фотоелектричного перетворювача, який заряджає акумулятор; таймера, який періодично подає живлення на всі електронні компоненти пристрою. Автономний пристрій вимірює напруження трубопроводу кожні 3 год та надсилає SMS повідомлення на відповідні номери. У офісі організації, яка експлуатує трубопровід, за допомогою комп'ютера зі спеціалізованим програмним забезпеченням та GSM модемом приймають надіслані SMS повідомлення, формують базу даних вимірювань та аналізують результати моніторингу.

Ключові слова: дистанційний моніторинг, магістральні трубопроводи, надземні переходи, напруження, магнетоанізотропний метод, GSM зв'язок, SMS повідомлення.

REMOTE MONITORING OF THE STRESS STATE OF OVERHEAD CROSSINGS OF MAIN PIPELINES USING THE MAGNETOANISOTROPIC METHOD

S. M. Minakov ¹, V. M. Uchanin ², A. S. Minakov ¹

¹ National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv;

² Karpenko Physico-Mechanical Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

An autonomous device for magnetoanisotropic monitoring of the stress state of overhead crossings of main pipelines, which consists of: magneto-anisotropic transducers (up to 6 pcs.), installed evenly on one cross-section of the pipeline; transducer signal processing unit; GSM modem; directional antenna of the GSM modem; timer; battery; photoelectric transducer is proposed. Every 2 h 57 min, the timer supplies power to the transducer signal processing unit and the GSM modem. The transducer signal processing unit begins alternate power supply and interrogation of magneto-anisotropic transducers, their amplification, analog-to-digital conversion, calculation of active voltages, and compilation of the SMS message text. The SMS message text consists of the following blocks of information: current date, time of compilation of the SMS message, six blocks of stresses according to magneto-anisotropic transducers and battery voltage. The SMS message text is transmitted to the GSM modem via the RS-232 interface. The GSM modem with a directional antenna, which provides a signal amplification of 20 dB, sends this message to pre-recorded cellular numbers. The operation of the converter

signal processing unit lasts 3 min and this is enough for stress measurements and SMS message transmission. The nominal power of the photovoltaic converter is 10 W at a voltage of 12 V. The battery capacity is 22 A·h, which ensures reliable operation of the device during the winter period (3 months). In the office of the organization operating the pipeline, using a computer with specialized software and a GSM modem, sent SMS messages are received, a measurement database is maintained and monitoring results are analyzed. This allows real-time information with a step of 3 h to get information about the stress state of overhead crossings of main pipelines and to make informed technological decisions. Experimental operation of autonomous devices on the pipeline over several years has confirmed the correctness of the proposed technical solutions.

Keywords: *remote monitoring, main pipelines, overhead crossings, stresses, magneto-anisotropic method, GSM communication, SMS messages.*

Вступ. На надземні переходи магістральних трубопроводів діють, окрім внутрішнього тиску, періодичні добові навантаження від зміни температури навколишнього середовища (нагріваються (і відповідно подовжуються) вдень та охолоджуються (і відповідно скорочуються) вночі). Подібний вплив спричиняють сезонні коливання температури (літо–зима). Періодичні подовження та вкорочення трубопроводу призводять до появи в ньому додаткових механічних напружень, які можуть перевищувати критичний рівень. Тому в умовах експлуатації для попередження катастрофічних руйнувань виникає актуальна задача постійного моніторингу напружено-деформованого стану трубопроводу в режимі реального часу.

Впродовж останнього десятиліття методологія побудови систем довгострокового моніторингу технічного стану конструкцій суттєво розвинулась [1–3]. Традиційна дротова система моніторингу складається з основних систем: давачів, обробки даних (зокрема збір, передача та зберігання) та оцінювання технічного стану. Дані моніторингу зі системи давачів передаються коаксіальними дротами та обробляються системою обробки даних. Дротові системи моніторингу мають багато недоліків, серед яких найбільшими є висока вартість через надзвичайно довгі кабелі зв'язку, які мають бути захищені від механічних пошкоджень і впливу навколишнього середовища, та трудомісткість розгортання великої кількості кабелів. Іншим суттєвим недоліком є негнучкість дротової системи моніторингу, оскільки один коаксіальний кабель обслуговує, зазвичай, лише один давач. Тому збільшення кількості давачів або зміна їх розташування передбачає необхідність розгортання додаткових кабелів для передачі даних та оновлення програмного забезпечення для керування ними [2]. Бездротові системи моніторингу (БСМ) мають суттєво менші витрати на їх впровадження та можливість гнучкого переформатування і є ефективною альтернативою традиційним дротовим системам [3, 4].

Моніторити напружено-деформований стан трубопроводів можна аналізом зміни їх просторового положення з поверхні землі за допомогою трасошукачів [5]. Але такий підхід непридатний для моніторингу надземних переходів і не дає можливості об'єктивно оцінити критичність механічних напружень на різних ділянках трубопроводів. Задачу, в принципі, можна вирішити встановленням на трубу тензорезисторних давачів деформації. Ба більше, існують спеціальні давачі з можливістю бездротового передавання результатів моніторингу з низьким споживанням енергії [6]. Але суттєвим недоліком систем з тензорезисторними давачами є необхідність їх встановлення безпосередньо на метал трубопроводу, що вимагає видалення та поновлення захисного покриття. Такі процедури складно виконувати в умовах експлуатації без зменшення захисних властивостей покриттів.

Перспективнішим і гнучкішим є використання систем моніторингу трубопроводів із феромагнетних сталей з давачами магнетної анізотропії, які забезпе-

чують безконтактне визначення механічних напружень через шар захисного діелектричного покриття, тобто без його вилучення [7–12].

Мета роботи – розробити спеціалізований автономний пристрій на основі бездротових технологій передачі даних моніторингу напруженого стану надземних переходів магістральних трубопроводів магнетоанізотропним методом. У результаті аналізу можливих варіантів виконання такої розробки прийнято рішення використати найрозповсюдженіший в Україні мобільний GSM зв'язок з форматом передачі даних у вигляді SMS повідомлень.

Розроблення автономного пристрою для магнетоанізотропного моніторингу напруженого стану. Розроблений автономний пристрій (рис. 1) складається з магнетоанізотропних перетворювачів 1–4, які кріплять на трубопровід; блоку обробки сигналів перетворювачів 5, модема GSM 6, акумулятора 7, фотоелектричного перетворювача 8, таймера 9, антени GSM модема 10.

Фотоелектричний перетворювач марки KV-10W/12V потужністю 10 Вт та номінальною напругою 12 В заряджає акумулятор. Живлення з акумулятора постійно подається на таймер, який відраховує 2 год 57 хв і після цього подає живлення на блок обробки сигналів перетворювачів та GSM модем протягом 3 хв. Отримавши живлення, блок обробки сигналів перетворювачів починає по черзі живити та знімати сигнали із перетворювачів. Одночасно GSM модем виходить у мережу та встановлює зв'язок.

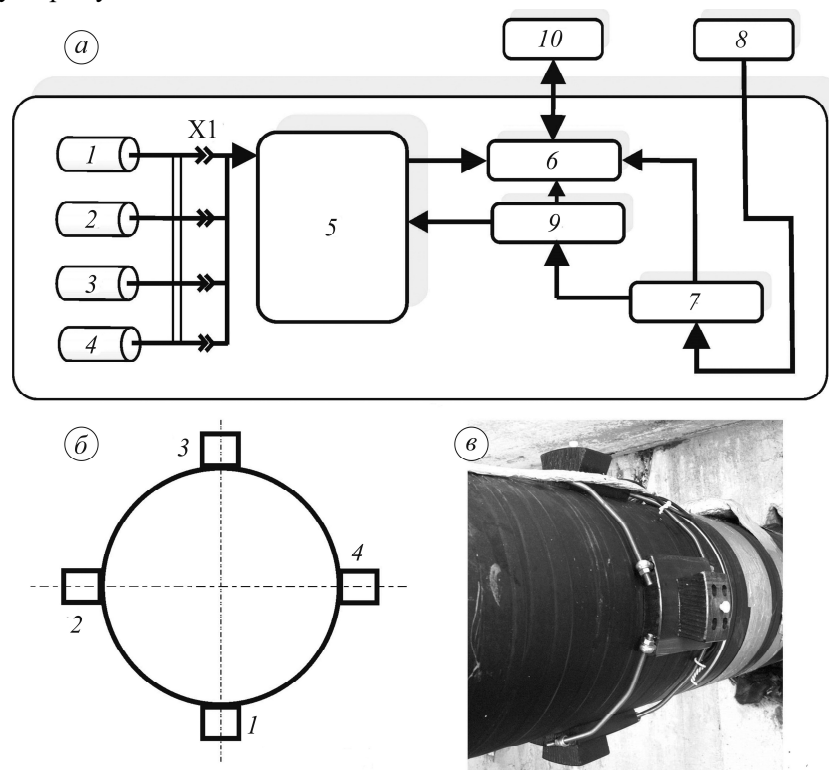
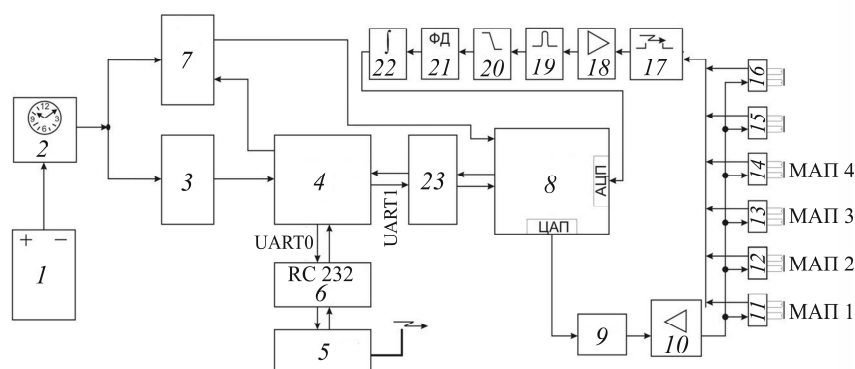


Рис. 1. Структурна схема автономного пристрою (а: 1–4 – магнетоанізотропні перетворювачі, 5 – блок обробки сигналів перетворювачів, 6 – GSM модем, 7 – акумулятор, 8 – фотоелектричний перетворювач, 9 – таймер, 10 – антена GSM модем); схема розміщення магнетоанізотропних перетворювачів у перерізі трубопроводу (б) та їх кріплення до нього (в).

Після отримання сигналів з усіх перетворювачів блок їх обробки вимірює напругу живлення та формує вихідне SMS повідомлення, яке передається на GSM модем і мережу – необхідним адресатам. Потім чекають закінчення трихвилинного терміну для прийняття вхідного SMS повідомлення, необхідного для

Структурна схема блоку вимірювання та обробки сигналів перетворювачів (рис. 2) складається з акумулятора 1, таймера 2, блоку живлення 3, контролера зв'язку 4, GSM модема 5, інтерфейсу RS-232 6, перетворювача напруг 7, контролера вимірювання 8, фільтра низьких частот 9, підсилювача 10, реле 11–16, модуля захисту від впливів грозових розрядів 17, лінійного підсилювача 18, смугового фільтра 19, модуля зміщення сигналу 20, фазового детектора 21, інтегратора 22, модуля гальванічної розв'язки 23.



Блок вимірювання та обробки сигналів перетворювачів працює так. До акумуляторної батареї підключено таймер з дуже малим споживанням. Останній кожні 2 год 57 хв вмикає живлення на три хвилини, яке подається на блок живлення для створення напруги, необхідної для контролера зв'язку і GSM модема. Контролер зв'язку виробляє команди, які через інтерфейс RS-232 потрапляють на GSM модем, який першу хвилину після увімкнення шукає станції зв'язку і переходить в режим очікування. Після цього контролер зв'язку дозволяє увімкнення перетворювача напруги, який подає живлення на контролер вимірювання та інші модулі необхідні для роботи перетворювачів і перетворення сигналів з них. Цифро-аналоговий перетворювач контролера вимірювання генерує синусоїдальний сигнал, який через фільтр низьких частот і підсилювач 10 через підключення реле 11–16 подає сигнал по чергово на магнетоанізотропні перетворювачі. Тут встановлено чотири перетворювачі, інші два канали зарезервовано. Сигнали з перетворювачів надходять на модуль захисту від грозових розрядів, далі на лінійний підсилювач → смуговий фільтр → модуль зміщення сигналу → фазовий детектор → інтегратор. З інтегратора сигнал подається на аналогово-цифровий перетворювач, потім на гальванічну розв'язку, а з неї надходить на контролер зв'язку, де формується SMS повідомлення, яке подається через інтерфейс RS-232 на GSM модем. Останній відсилає SMS повідомлення на GSM модем, який знаходиться в офісі організації.

Антенa GSM модема направляє сигнал на найближчу станцію стільникового зв'язку та має коефіцієнт підсилювання 20 дБ. Вона встановлена на щоглі разом із фотоелектричним перетворювачем KV-10W/12V виробництва ВО "Квазар"

номінальною потужністю 10 Вт. Ємність акумулятора становить 22 А·год. Для захисту антени від птахів передбачено сідало (рис. 4).

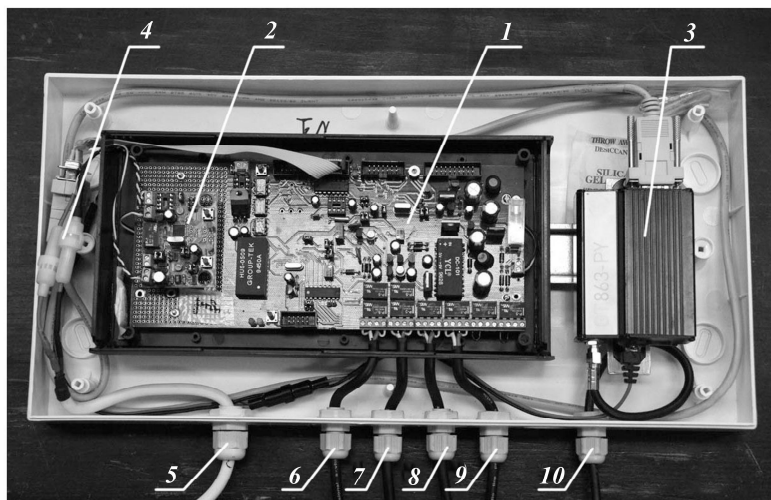


Рис. 3. Загальний вигляд блоку вимірювання та обробки сигналів перетворювачів, таймера та GSM модема у монтажному корпусі.

У офісі організації, яка експлуатує трубопровід, встановлюють комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням та GSM модемом. Кожні 3 год модем приймає SMS повідомлення із результатами моніторингу напруженого стану.

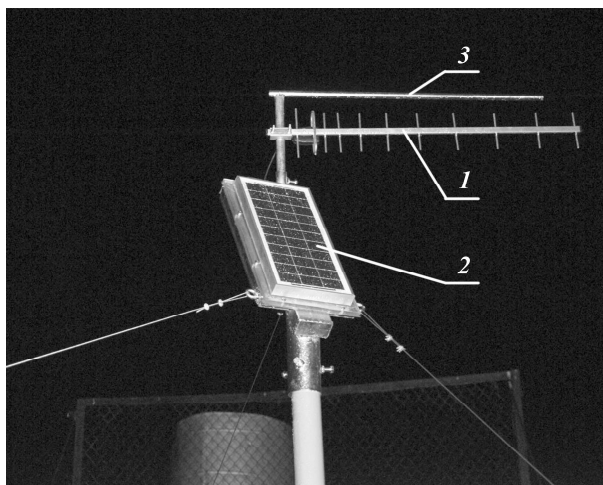


Рис. 4. Щогла із антеною GSM модема (1), фотоелектричним перетворювачем (2) та сідалом (3).

Нижче наведено приклад текстів повідомлень за добу:

```
20/11/21 02:29:17, +0128, -0085, -0107, -0048, -0000, -0000, +012.0 V
20/11/21 05:29:15, +0128, -0084, -0106, -0049, -0000, -0000, +011.8 V
20/11/21 08:29:12, +0127, -0083, -0109, -0048, -0000, -0000, +012.1 V
20/11/21 11:29:09, +0125, -0079, -0111, -0050, -0000, -0000, +012.2 V
20/11/21 14:29:07, +0127, -0083, -0108, -0048, -0000, -0000, +013.0 V
20/11/21 17:29:05, +0129, -0085, -0104, -0044, -0000, -0000, +011.9 V
20/11/21 20:29:02, +0129, -0084, -0106, -0048, -0000, -0000, +011.9 V
20/11/21 23:29:00, +0130, -0083, -0110, -0048, -0000, -0000, +011.9 V
```

Перший стовпчик – дата (рік/місяць/день), другий – час (години/хвилини/секунди). Від третього до восьмого стовпчика (через кому) – результати моніторингу напружень. У цьому автономному модулі застосовано чотири магнетоанізотропних перетворювачі (стовпчики 3–6). Зарезервовано використання ще двох перетворювачів (нульові стовпчики 7, 8). Дев'ятий стовпчик показує напругу на акумуляторі. Ємності акумулятора достатньо для автономної роботи впродовж 3 місяців.

Отримані SMS повідомлення із результатами моніторингу напруженого стану накопичуються у базі даних. Це дає змогу в режимі реального часу із кроком 3 год мати інформацію про напружений стан надземних переходів магістральних трубопроводів та приймати зважені технологічні рішення.

Отримані результати. Дослідна експлуатація автономних пристроїв на продуктопроводі впродовж двох років підтвердила правильність запропонованих технічних рішень. За результатами моніторингу встановлено доцільність технічного обслуговування рухомих кріплень трубопроводу. Вказані заходи мали позитивний ефект щодо зниження напруження.

ВИСНОВКИ

Розроблено автономний пристрій для магнетоанізотропного моніторингу напруженого стану переходів магістральних трубопроводів без видалення захисного шару, з перетворювачами, які розташовані на перерізі трубопроводу (до 6 шт.), блоком обробки їх сигналів, GSM модемом, таймером, запрограмованим подавати живлення через кожні три години на 3 хв, направленою антеною GSM модема, фотоелектричним перетворювачем як джерело живлення та акумулятором як накопичувача енергії. Автономний пристрій періодично 8 разів на добу вимірює напруження трубопроводу і надсилає SMS повідомлення із цими даними. Здійснено випробування та дослідну експлуатацію запропонованого пристрою на продуктопроводі впродовж двох років. Отримані результати вказують на перспективи його застосування для моніторингу напруженого стану металоконструкцій в інших галузях виробництва. В подальших дослідженнях плануємо вдосконалити розроблений пристрій для дистанційного калібрування перетворювачів.

1. Li, H.N.; Ren, L.; Jia Z.G.; Yi T.H.; Li D.S. State-of-the-Art in Structural Health Monitoring of Large and Complex Civil Infrastructures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* **2016**, 6(1), 3–16. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0108-9>
2. Zhou, G.; Yi, T. Recent Developments on Wireless Sensor Networks Technology for Bridge Health Monitoring. *Mathematical Problems in Engineering* **2013**, 2013, 947867. <https://doi.org/10.1155/2013/947867>
3. Yi, T.H.; Li, H.N. Methodology Developments in Sensor Placement for Health Monitoring of Civil Infrastructures. *International Journal of Distributed Sensor Networks* **2012**, 8(8), 612726. <https://doi.org/10.1155/2012/612726>
4. Kustovskyj, O.L.; Petryk, V.F.; Seryj, K.M.; Melnyk, D.O. Use of Wireless Data Transmission Technologies for Solving Problems in Non-Destructive Testing. *Bulletin of NTU “KhPI”* **2012**, 40, 71–77. (In Ukrainian)
5. Zhovtulya, L.Ya.; Oliynyk, A.P.; Yavorskyi, A.V.; Karpash, M.O. Development of a Method for Assessing the Stress-Strain State of Linear Sections of Main Pipelines. *Methods and Devices of Quality Control* **2017**, 38, 57–63. (In Ukrainian)
6. Hew, Y.; Deshmukh, S.; Huang, H.A. Wireless Strain Sensor Consumes Less Than 10 mW. *Smart Materials and Structures* **2011**, 20(10), 105032. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/10/105032>
7. Abuku, S. Magnetic Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation. *Japanese Journal of Applied Physics* **1977**, 16(7), 1161–1170. <https://doi.org/10.1143/JJAP.16.1161>
8. Yamada, H.; Uchiyama, S.; Takeuchi, K.; Wakiwaka, H.; Kishimoto, S.; Ito, M. Noncontact Measurement of Bending Stress Using a Magnetic Anisotropy Sensor. *IEEE Transactions on Magnetics* **1987**, 23(5), 2422–2424. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1987.1065329>

9. Langman, R.A.; Mutton, P.J. Estimation of Residual Stresses in Railway Wheels by Means of Stress-Induced Magnetic Anisotropy. *NDT&E International* **1993**, *26*(4), 195–205. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(93\)90474-9](https://doi.org/10.1016/0963-8695(93)90474-9)
10. Yamada, H.; Kishimoto, S.; Ito, M.; Takenaka, Y. Stress Analysis with Magnetic Anisotropy Sensor and Its Application. *Proceedings of the 11th World Conference on Nondestructive Testing*. Las Vegas, Nevada, November 3, 1985, *1*(1), pp 607–614.
11. Minakov, S.M.; Uchanin, V.M. Monitoring the Stressed State of Bridge Span Structure During Mounting by Sliding Method. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing* **2020**, *4*, 40–44. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.04.06>
12. Uchanin, V.; Minakov, S.; Nardoni, G.; Ostash, O.; Fomichov, S. Nondestructive Determination of Stresses in Steel Components by Eddy Current Method. *Journal of Mechanical Engineering* **2018**, *64*(11), 690–697. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2018.5208>

Одержано 30.09.2025

ORCID iDs

Minakov S. M.  <https://orcid.org/0000-0001-8607-4120>
 Uchanin V. M.  <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>
 Minakov A. S.  <https://orcid.org/0000-0002-1724-3100>