

УДК 004.032.2, 681.518

Г.В. Вернидуб, О.І. Баленко, А.О. Подорожняк

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

## МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ МЕТРОПОЛІТЕНУ

В статті показано, що для підвищення продуктивності процесу вимірювання положення контактної рейки та обробки інформації необхідна модернізація пристрою вимірювання та вдосконалення системи обробки. Наведено математичну модель модернізованого пристрою. У статті проаналізовано причини, що впливають на точність вимірювання положення контактної рейки, запропоновано варіанти зменшення похибок вимірювання для вибраної системи і наведені результати роботи розробленого програмного продукту для обробки вимірювальної інформації.

**Ключові слова:** контактна рейка, вимірювальний візок, інформаційно-вимірювальна система, математична модель, мікроконтролер, діаграма варіантів використання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В наш час метрополітеном для контролю положення контактної рейки використовуються спеціальні пристрої – вимірювальні візки. Однією із вимог до таких пристроїв є висока точність вимірювання. Виникає необхідність проведення аналізу суттєвих причин, що впливають на точність вимірювання положення контактної рейки. Вплив одних причин неможливо компенсувати ніякими способами, а вплив інших можна ослабити шляхом раціонального вибору конструкції вимірювального візка та висуванням вимог до геометричних характеристик ходових рейок. Підвищення продуктивності процесу вимірювання і обробки вимірювальної інформації виконується за рахунок модернізації пристрою контролю на основі сучасних інформаційно-вимірювальних технологій [1].

Проблема, що розв'язується – підвищення продуктивності процесу вимірювання і обробки вимірювальної інформації за рахунок модернізації пристрою контролю на основі сучасних інформаційно-вимірювальних технологій та удосконалення методу обробки отриманої вимірювальної інформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Контактна рейка повинна забезпечувати безперебійне струмознімання при встановлених швидкостях руху електропоїздів за будь-яких атмосферних умов [2]. Звідси випливають вимоги до точності просторового положення контактної рейки відносно ходових рейок колії метрополітену. Зокрема підвищення робочої поверхні контактної рейки над рівнем головок ходових рейок має бути 160 мм, а відхилення від цього розміру допускаються не більше 6 мм в бік збільшення чи зменшення. Відстань від осі контактної рейки до внутрішньої грані головки найближчої ходової рейки повинна бути 690 мм із відхиленням, що не перевищує 8 мм в бік збільшення чи зменшення.

Отже, в правилах технічної експлуатації встановлені зазначені вище координати положення контактної рейки.

### Основна частина

Пристрій збору інформації являє собою автономну 8-канальну 12-розрядну вимірювально-інформаційну систему (ВІС). Вимірювально-інформаційна система вимірювального візка призначена для вимірювання просторового положення контактної рейки відносно ходових рейок з заданою точністю і документування вимірювальної інформації на переносний носій інформації або по послідовному порту у персональний комп'ютер [3]. Пристрій збору вимірювальної інформації забезпечує:

- а) калібрування всієї вимірювальної системи перед початком вимірювань на спеціалізованому стенді;
- б) автоматичний збір вимірювальної інформації із записом її на носій інформації та по послідовному порту у обчислювальну машину;
- в) індикацію поточних вимірювальних параметрів:
  - положення контактної рейки в вертикальній площині;
  - положення контактної рейки в горизонтальній площині;
  - пройденого вимірювальним візком шляху;
  - маркерів шляху (за необхідністю);
  - часу та дати вимірювань;
- г) світлодіодну індикацію про знаходження положення контактної рейки в межах допусків (зелений світлодіод – в межах допуску; червоний світлодіод – за межами допуску);
- д) попереджувати оператора про наявність (відсутність) карти пам'яті;
- е) контроль напруги живлення (рівня розряду акумулятора).

Виходячи з призначення та вимог до ВІС, у її склад входять наступні структурні елементи:

- датчик лінійного переміщення для вимірювання просторового положення контактної рейки відносно ходових рейок в горизонтальній площині;
- датчик лінійного переміщення для вимірювання просторового положення контактної рейки відносно ходових рейок у вертикальній площині;
- датчик пройденого вимірювальним візком шляху;
- маркер пройденого шляху;
- пристрій калібрування;
- блок управління;
- індикатор дати та часу;

- індикатор положення контактної рейки в горизонтальній площині;
- індикатор положення контактної рейки в вертикальній площині;
- індикатор пройденого вимірювальним візком шляху;
- індикатор ступеню розрядки акумуляторної батареї;
- пристрій запису на MMC/SD карту;
- послідовний порт;
- індикатор наявності MMC/SD карти;
- мікроконтролерний блок.

На основі даної структурної схеми створено математичну модель, яка складається із чотирьох модулів [4]. Модель наведено на рис. 1.

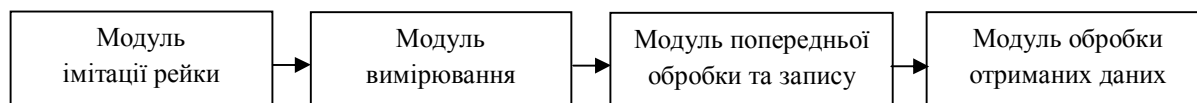


Рис. 1. Узагальнена модель процесу отримання та обробки вимірювальної інформації для метрополітену

Під час роботи модулю вимірювання виникають похибки. Такі похибки можна зменшувати при конструкторській розробці вимірювального візка та умовно поділити їх на три групи:

- похибки вимірювання положення контактної рейки, що обумовлені станом ходових рейок;
- похибки вимірювання, що обумовлені станом механічної частини візка;
- похибки вимірювання, що обумовлені характеристиками електронного блоку вимірювального візка.

Розглянемо вплив взаємного положення рейкових ниток за висотою та взаємного осідання кожної рейкової нитки на точність вимірювання просторового положення контактної рейки.

Взаємне положення контактної рейки відносно ходових рейок представлено на рис. 2.

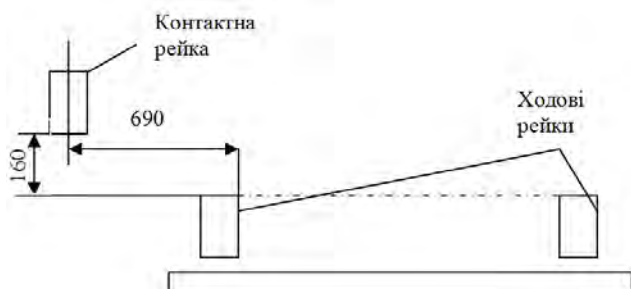


Рис. 2. Взаємне положення контактної рейки відносно ходових рейок

На рис. 3 ходові рейки вирівняні по висоті. Тепер розглянемо випадок, коли права ходова рейка знаходиться на більшій висоті, ніж ліва. Оскільки вимірювальний візок знаходиться на ходових рейках, то він нахилиться в лівий бік, а ведений валець (“ролик”, російською мовою) ослабить контакт з

контактною рейкою. Оскільки валець лінвою (“тросом”, російською мовою) зв’язаний з вимірювальним механізмом, то створиться ілюзія, що змінилась (збільшилась) висота положення контактної рейки, хоча насправді, як зазначалось, положення відносно лівої ходової рейки (рис. 3) не змінилось. Це означає, що з’явилась похибка вимірювання висоти контактної рейки над рівнем ходових рейок.

Оцінимо величину цієї похибки [1, 5]. Для цього скористаємось рис. 3, який являє собою розрахунковий варіант.

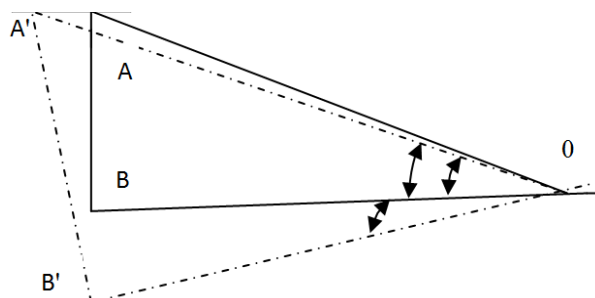


Рис. 3. Схема для розрахунку похибки вимірювання висоти положення контактної рейки над ходовими рейками

Точка О знаходиться на верхній частині лівої ходової рейки (звичайно праворуч). Необхідна висота контактної рейки над ходовими рейками повинна бути  $AB=160$  мм. При нахилі вимірювального візка вліво, коли права ходова рейка піднімається на деяку висоту  $\Delta S$  або нерухома частина приводу візка повертається на кут  $\alpha$ , висота контактної рейки дорівнює вже  $A'B'$ .

Тоді похибка вимірювання шуканої висоти становить

$$\Delta h = A'B' - AB. \quad (1)$$

Різниця висот між положенням ходових рейок  $\Delta S$  і малим кутom нахилу  $\alpha$  зв'язана як

$$\alpha \approx \Delta S/L, \quad (2)$$

де  $L$  – відстань між ходовими рейками, що дорівнює 1520 мм.

Позначимо геометричні розміри елементів візка  $OB = d = 690$  мм,  $AB = r = 160$  мм. Тоді

$$AO = \sqrt{r^2 + d^2}, \quad A'B' = d \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \beta) \approx d \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \beta).$$

В останньому виразі

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)/(1 - \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta).$$

При цьому  $\operatorname{tg}\beta = r/d$ , а  $\operatorname{tg}\alpha \approx \alpha$  при малих  $\alpha$ , тому  $\operatorname{tg}(\alpha + \beta) \approx (\alpha + r/d)/(1 - \alpha \cdot r/d)$ .

Тепер можна отримати шукану похибку з (1):

$$\Delta h = d \cdot \frac{\alpha + r/d}{1 - \alpha \cdot r/d} - r = \frac{\alpha \cdot (d + r^2/d)}{1 - \alpha \cdot r/d}. \quad (3)$$

Підставляємо в формулу (3) вираз (2) замість  $\alpha$  і маємо

$$\Delta h = \left( \frac{\Delta S}{L \cdot (d + r^2/d)} \right) / \left( 1 - \frac{\Delta S}{L} \cdot r/d \right).$$

Позначимо  $d + r^2/d = a$ ,  $r/d = \gamma$ . Тоді

$$\Delta h = (\Delta S/L) \cdot a / (1 - (\Delta S/L) \cdot \gamma). \quad (4)$$

При вибраних значеннях  $L$ ,  $a$ ,  $\gamma$  формула (4) спрощується:

$$\Delta h \approx 0.5 \cdot \Delta S, \quad (5)$$

тобто похибка вимірювання положення контактної рейки по висоті за рахунок неоднакової висоти ходових рейок дорівнює приблизно половині різниці висот цих рейок.

Слід зазначити, що ширина колії  $L = 1520$  мм вибрана тільки для прямолінійних ділянок. При наявності поворотів тунелю, коли колія викривляється, її ширина збільшується до 1530 мм і більше, а при радіусі закруглення колії менше 100 м ширина колії може досягати 1544 мм. При поворотах колії також навмисно змінюється взаємне положення ходових рейок по висоті. Однак разом з цим змінюється положення контактної рейки по висоті і при дотриманні вимог проекту похибка вимірювання не виникає.

Зазначимо також, що формула (4) описує детерміновану похибку, але в цій формулі будь-який параметр може стати випадковим внаслідок обмеженої точності виготовлення і збирання візка, температурних деформацій тощо. Це стосується геометричних величин  $r$ ,  $d$ , а також  $L$ . Отже, шляхом моделювання можна врахувати і випадкові чинники.

Для випадку, коли контактна рейка знаходиться в горизонтальному положенні, а ходові рейки мають місцевий горб або западину промодельовано такі аномальні відхилення як нахил ходових рейок відносно горизонтальної площини вздовж напрямку розміщення рейок (вздовж ходу поїзда). В таких

умовах валець візка, що рухається вздовж контактної рейки і призначений для реєстрації відхилень рейки в горизонтальній площині не буде реєструвати такі відхилення, а інший валець у вертикальній площині буде реєструвати прогресуюче відхилення контактної рейки. Оскільки контактна рейка розміщена горизонтально, то реально ніякого відхилення немає, тобто завдяки подовжньому нахилу ходових рейок реєструється тільки похибка вимірювання положення контактної рейки у вертикальній площині. Цю похибку позначимо  $\Delta h'$ . Якщо нахил ходових рейок по відношенню до горизонту становить кут  $\varphi$ , то максимальна величина цієї похибки

$$\Delta h' = l_0 \cdot \varphi, \quad (6)$$

де  $l_0$  – довжина ділянки, на якій ходові рейки або піднімаються, створюючи горб, або опускаються, створюючи западину.

Кут  $\varphi$  вимірюється в радіанах. Отже, ми маємо в результаті прогресуючу похибку вимірювання висоти контактної рейки над ходовими, яка змінюється з часом  $t$  за законом

$$\Delta h'(t) = l(t) \cdot \varphi = v \cdot t \cdot \varphi, \quad (7)$$

де  $v$  – швидкість руху вимірювального візка,  $l(t)$  – закон змінювання відстані між початком горба (западини) до їх максимуму (мінімуму).

Якщо, наприклад,  $l_0$  становить декілька метрів, а кут  $\varphi$  декілька градусів, то з попередньої формули випливає, що може виникнути похибка вимірювання положення контактної рейки у вертикальній площині, яка становитиме одиниці міліметрів. Якщо при деформації ходових рейок під час створення горба (западини) одночасно такі ж деформації отримує контактна рейка, то похибка вимірювання її положення не виникають. Отже, для виключення похибок контактна рейка повинна слідувати за положенням ходових рейок.

Для обробки результатів вимірювань було розроблено клієнтський додаток на мові програмування ECMAScript5 з використанням бібліотеки NW.js. NW.js – це середовище виконання на основі браузера Chromium і Node.js, яке дозволяє по-новому писати нативні додатки з усіма веб-технологіями. Обраний стек технологій дозволяє зробити додаток крос-платформним. Основна увага приділена обробці отриманих даних та маніпуляціям з ними [6]: побудова графіків відхилень контактної рейки від норми, оцінка придатності колії для експлуатації. Дані на основі яких будуються графіки обробляються з урахуванням похибок, що виникають під час вимірювання.

Під час роботи вимірювального візка отримані дані записуються у файл \*.dat, який потім може бути оброблений за допомогою програми. Структура файлу наступна: в окремому рядку для кожного відліку записуються через кому номер відліку, відстані по верти-

калі та по горизонталі. Програма має такі функції:

- завантаження файлу \*.dat у додаток;
- видалення файлу із додатку;
- побудова графіків відхилень по вертикалі та горизонталі для всього шляху та для окремого пікету (пікет = 100 метрів);
- виведення даних вимірювання та оцінки придатності колії у балах у зручному для оператора вигляді;

- видалення точок, що на думку оператора є не інформативними та не мають бути враховані у процесі аналізу;

- збереження зображення графіків у файл;

UML діаграма варіантів використання програми приведена на рис. 4.

Графіки відхилень, побудовані на основі даних, отриманих під час одного із вимірювань, наведено на рис. 5, а для одного пікету – наведено на рис. 6.

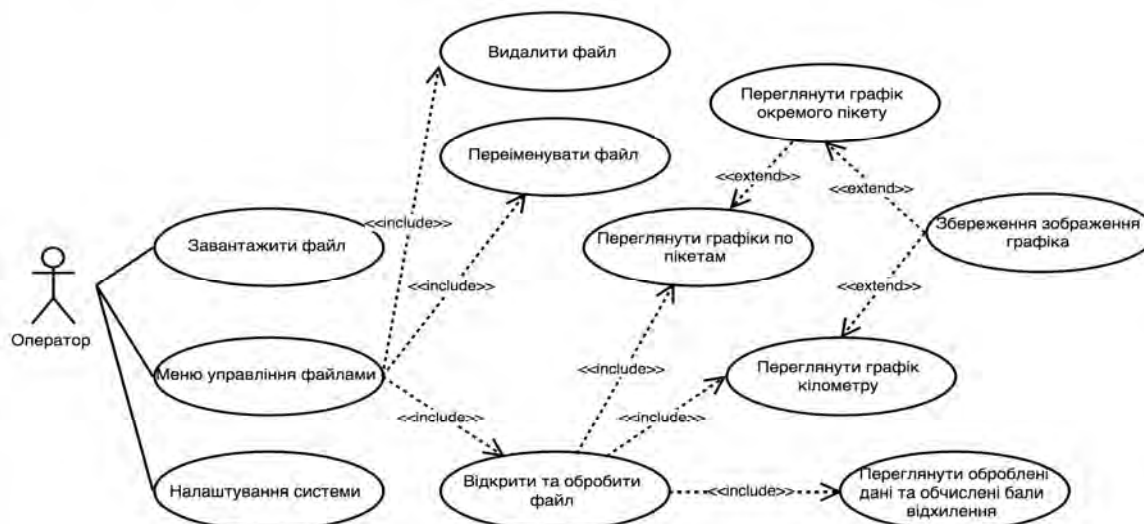


Рис. 4. UML діаграма варіантів використання програми

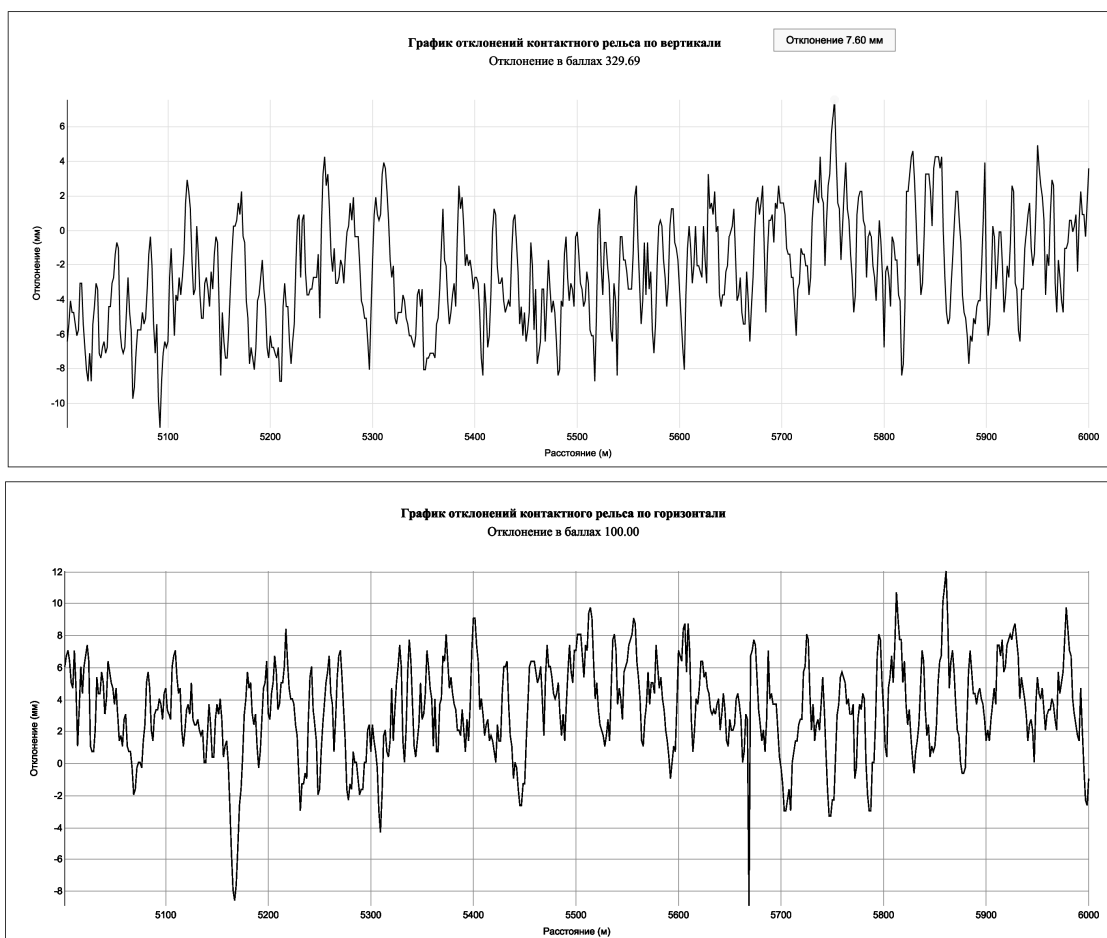


Рис. 5. Графіки відхилень по горизонталі та вертикалі для усієї дистанції

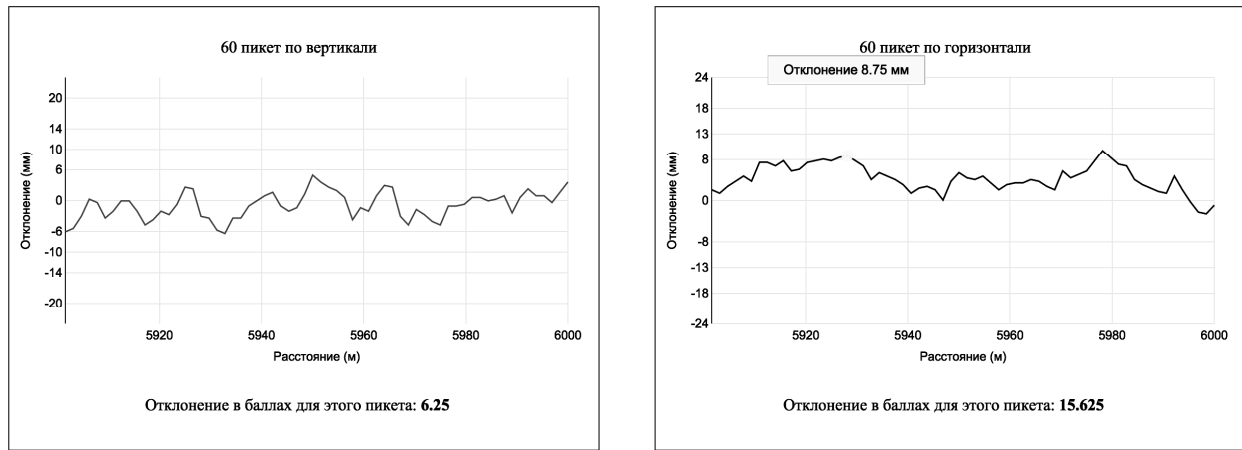


Рис. 6. Графіки відхилень по горизонталі та вертикалі для одного пікету

## Висновки

В статті проведений аналіз причин, що впливають на точність вимірювання положення контактної рейки відносно ходових рейок колії метрополітену. Показано, що геометричні характеристики ходових рейок можуть значно впливати на точність вимірювання положення контактної рейки в горизонтальній та вертикальній площинах. Наведені прості формули, що зв'язують геометричні відхилення ходових рейок з похибками вимірювання положення контактної рейки.

Створено програму, яка виконує побудову графіків відхилень по вертикалі та горизонталі для всього шляху та для окремого пікету враховуючи похибки вимірювання, проводить оцінку придатності колії для експлуатації, та генерує зображення графіків для подальшого друку.

## Список літератури

1. Подорожняк А.О. Дослідження системи місцезнаходження контактної рейки [Текст] / А.О. Подорожняк,

Т.А. Козуб, О.М. Легеза. – Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2013. – Вип. 8 (115). – С. 97-102.

2. Правила технічної експлуатації залізниць України. Введено в дію наказом Міністерства транспорту України від 20 грудня 1996 р. N 411.

3. Белов А.В. Самоучитель разработчика устройств на микроконтроллерах AVR [Текст] / А.В. Белов. – СПб.: Наука и техника, 2010. – 528 с.

4. Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем [Текст] / Ю.П. Пытьев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 400 с.

5. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин [Текст] / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1975. – 638 с.

6. Вернидуб Г.В. Система обробки виміральної інформації для метрополітену / Г.В. Вернидуб, А.О. Подорожняк, Н.Ю. Любченко // Матеріали 3-ї міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми інформатики і моделювання". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2014. – С. 30.

Надійшла до редколегії 4.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА

А.В. Вернидуб, А.И. Баленко, А.А. Подорожняк

В статье показано, что для повышения продуктивности процесса измерения положения контактного рельса и обработки информации необходима модернизация устройства измерения и модернизация системы обработки. Приведена математическая модель модернизированного устройства. В статье проанализированы причины, влияющие на точность измерения положения контактного рельса, и показаны результаты работы разработанной программы обработки измеряемой информации.

**Ключевые слова:** контактный рельс, измерительная тележка, информационно-измерительная система, математическая модель, микроконтроллер, диаграмма вариантов использования.

## RESEARCHING OF DETECTION SYSTEM OF CONTACT RAIL POSITION

H.V. Vernidub, O.I. Balenko, A.O. Podorozhnyak

The article shows that the increasing productivity of the measurement position of the contact rail and processing of information is performed by upgrading measuring device and information processing system. A mathematical model of the device is created. The article analyzes causes that affect the measurement accuracy of the position contact rail proposed options for reducing measurement errors for the selected system and are the results of the developed software for measurement data processing.

**Keywords:** contact rail, measuring trolley, information and measuring system, mathematic model, microcontroller, user case diagram.