

УДК 621.874.001

**ТЕОРЕТИЧНЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ  
ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВОГО КРАНА З ПЕРЕКОСОМ****©Григоров О. В., Губський С. О., Турчин О. В., Вишневецький Г. В.***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»***Інформація про авторів:**

**Григоров Отто Володимирович:** ORCID: 0000-0003-4332-4884; ottow@kpi.kharkov.ua; доктор технічних наук; завідувач кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Губський Сергій Олександрович:** ORCID: 0000-0001-7797-9139; gubskiyso@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Турчин Ольга Володимирівна:** ORCID: 0000-0002-9153-3704; feathven@gmail.com; інженер I категорії кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Вишневецький Георгій Валентинович:** ORCID: 0000-0001-9693-3486; vishnevetski40@gmail.com; кандидат технічних наук; професор кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Процес пересування крана супроводжується значними втратами енергії, підвищеними навантаженнями на елементи конструкції й механізмів, а також на підкранові спорудження. У наш час одержують поширення різні практичні заходи, що компенсують негативні явища (антиперекісні системи керування рухом, уточнена вистановка коліс і вирівнювання рейкового шляху). Однак оцінки застосовності й ефективності цих заходів обмежені відсутністю необхідного теоретико-експериментального обґрунтування. Основними стримуючими причинами є багатофакторність і взаємозумовленість процесів, а також проблематичність виконання натурних вимірів у необхідному обсязі з необхідною точністю. У роботі послідовно розглядаються відповідні проблеми й пропонуються шляхи їх розв'язку із залученням нових засобів, у першу чергу, інформаційних технологій. Математична модель забезпечує не тільки розрахунки, але й операції, характерні для бази даних. Експеримент проводиться із пружною моделлю, що має спеціальні ділянки з підвищеною чутливістю до бічних навантажень. Забезпечена можливість зміни настановних кутів коліс і форми рейкового шляху. Отримані дані аналізуються із залученням обчислювальних засобів. Результати експерименту використовуються для перевірки коректності математичної моделі, яка надалі може бути використана для розрахунків натурних кранів.

**Ключові слова:** перекис крана; крани мостового типу; зчеплення колеса з рейкою; багатофакторність; математична модель; пружна експериментальна модель; MS Excel; тарування.

**Григоров О. В., Губський С. А., Турчин О. В., Вишневецький Г. В.** «Теоретическое и экспериментальное исследование процесса передвижения мостового крана с перекосом».

Процесс передвижения крана сопровождается значительными потерями энергии, повышенными нагрузками на элементы конструкции и механизмов, а также на подкрановые сооружения. В настоящее время получают распространение различные практические

---

**Піднімально-транспортні машини**

---

мероприяття, компенсуючі негативні явлення (антиперекосні системи управління движением, уточнена вистановка колес і вирівнювання рельсового пути). Однак оцінки применимости і ефективності цих заходів обмежені відсутністю необхідного теоретико-експериментального обґрунтування. Основними сдерживаючими причинами являються багатофакторність і взаємообумовленість процесів, а також проблематичність виконання натурних вимірювань в необхідному об'ємі з вимоюю точністю. В роботі послідовально розглядаються відповідні проблеми і пропонуються шляхи їх рішення з залученням нових засобів, в першу чергу, інформаційних технологій. Математична модель забезпечує не тільки розрахунки, але і операції, характерні для бази даних. Експеримент проводиться з еластичною моделлю, маючою спеціальні ділянки з підвищеною чутливістю до боковим навантаженням. Обезпечено можливість зміни установочних кутів колес і форми рельсового пути. Отримані дані аналізуються з залученням обчислювальних засобів. Результати експерименту використовуються для перевірки правильності математичної моделі, яка в подальшому може бути використана для розрахунків натурних кранів.

***Ключевые слова:*** перекося крана; крани мостового типу; сцеплення колеса з рельсом; багатофакторність; математична модель; еластична експериментальна модель; MS Excel; тарифікація.

***Grigorov O., Gubskiy S., Turchyn O., Vishnevetski G.*** “Theoretical and experimental study of process of a bridge crane movement”.

The process of crane movement accompanied by significant losses of energy, increased stress on the elements of the structure and mechanisms, as well as on crane structures. Currently, various practical measures compensating for negative phenomena (anti-skew motion control systems, refined wheel alignment and alignment of track) are spreading. However, assessments of the applicability and effectiveness of these measures are limited by the absence of the necessary theoretical and experimental justification. The main constraining factors are the multifactority and interdependence of processes, as well as the problematic nature of performing full-scale measurements in the required volume with the required accuracy. In the paper, the relevant problems are consistently considered and ways of their solution are proposed with the involvement of new tools, first of all, information technologies. The mathematical model provides not only calculations, but also operations specific to the database. The experiment is carried out with an elastic model, which has special areas with increased sensitivity to lateral loads. It is possible to change the wheel alignment angles and the shape of the track. The received data are analyzed with the help of computer facilities. The results of the experiment are used to verify the correctness of the mathematical model, which can later be used to calculate actual cranes.

***Key words:*** skewing of the crane; bridge type cranes; adhesion of the wheel with the rail; multifactority; mathematical model; elastic experimental model; MS Excel; calibration.

### 1. Вступ та аналіз публікацій

Рух протилежних сторін кранів мостового типу є несинхронним. Цей ефект найбільш виражений для кранів з великими прогонами, для яких робота без спеціальних

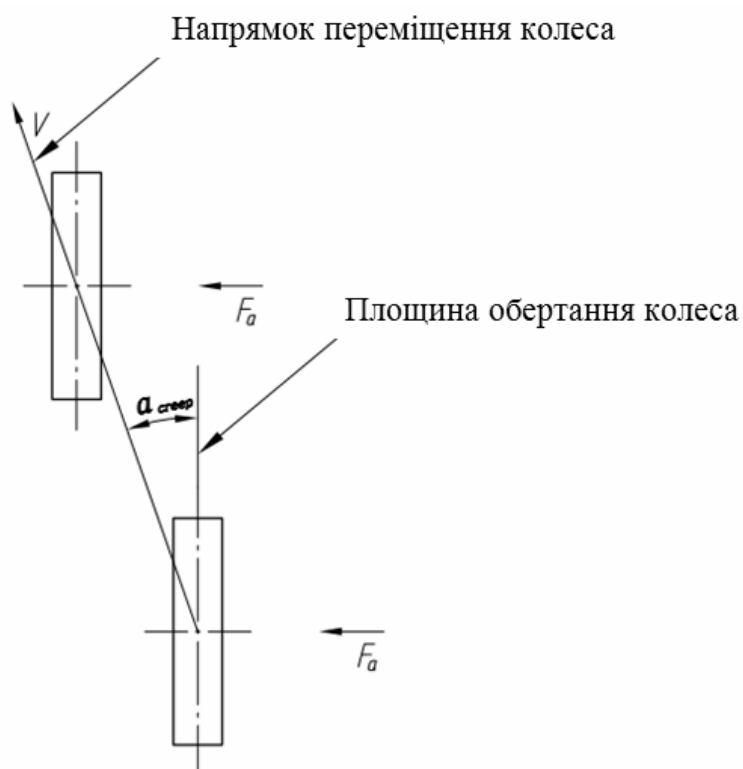
антиперекісних систем сполучена з ризиком аварій. Випередження/відставання відбувається в основному через відмінність поздовжніх сил опору й рушійних сил, що діють по різні сторони. Забігання характерне для будь-яких засобів пересування з рознесеними коліями, однак у випадку мостових кранів, що мають велику жорсткість остову, визначну роль відіграють процеси іншої природи, пов'язані з поперечними переміщеннями кожного з коліс, що перебувають у контактній взаємодії з рейками.

Ця обставина знайшла відображення в еволюції аналітичних підходів. Спочатку, міст крана вважався абсолютно жорстким, установочні перекося коліс і непрямолінійність рейок зневажалися; розглядався випадок центрального привода [1]. Кран, що мав можливість повороту в ребордних зазорах, наїжджав на рейку переднім напрямним бічним роликком. У рамках цих досить спрощених представлень Хеннісом і Ганновером були отримані фундаментальні результати, використані потім в DIN 15018.

Надалі в теорію вносилися численні виправлення: були враховані настановні кути перекося коліс, деформативність мосту, роздільний привод сторін [2, 3, 4]. Незмінним залишалось розуміння важливості процесу кочення навантаженого й перекошеного колеса.

## 2. Постановка задачі

Через ключове значення контактної взаємодії рейка-колесо зупинимося на його основних особливостях. Кожне колесо при наявності поперечної сили  $F_a$  рухається з поступовим бічним зсувом із площини кочення (див. рис. 1). Цей зсув за напрямом дії сили за умови відсутності зриву зчеплення прийнято називати поперечним пружним ковзанням або крипом. Кут відхилення напрямку руху колеса від площини кочення є основною числовою характеристикою крипу.



**Рис. 1** – Рух колеса з боковим зміщенням

В абстрактному випадку кочення коліс із нульовим крипом, тобто при абсолютно жорсткому поперечному контактному зв'язку кожне колесо переміщається незалежно від інших по власній траєкторії, деформуючи міст і викликаючи напруги. Ступінь деформації зростає зі збільшенням як жорсткості зв'язку, так і жорсткості мосту, а також залежить від їхнього співвідношення.

Визначення жорсткості конструкції не становить принципової складності, на відміну від жорсткості контактної зв'язку.

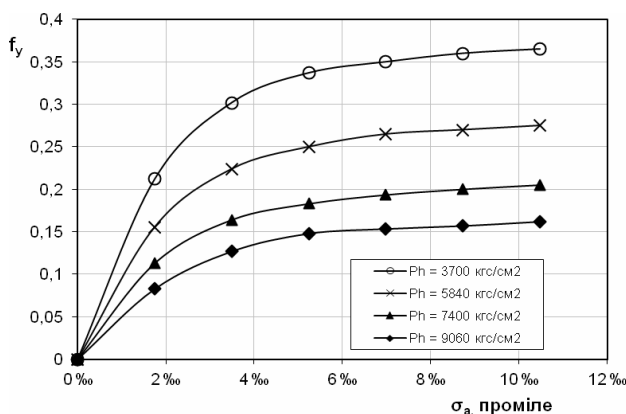
У теорії руху мостових

## Піднімально-транспортні машини

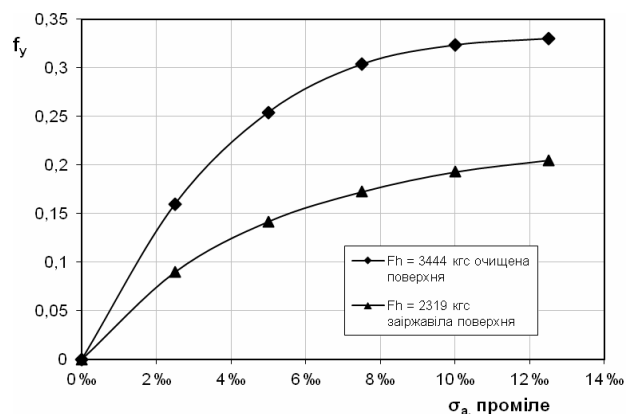
кранів тривалий час використовувалися результати, отримані для залізничних коліс, що працюють при менших контактних тисках і при іншому стані плівок забруднень на поверхні.

Вперше характеристики поперечних контактних сил у відповідному діапазоні були обмірювані в ході стендових експериментів з котком, що переміщається по кільцевій рейці. Була визначена залежність кута поперечного крипу від величини контактної тиску на поверхні по Герцу в межах від 200 до 1000 Н/мм<sup>2</sup> (див. рис. 2). Також був досліджений вплив на поперечний крип поздовжнього пружного ковзання, що має важливе значення для приводних коліс.

Важливе значення мають дані, отримані в експериментах Ганновера [1], що свідчать про сильну залежність параметрів від чистоти поверхні рейок (див. рис. 3).



**Рис. 2** – Коефіцієнт поперечного силового замикання  $f_y$  в залежності від кута повороту колеса  $\sigma_a$  при різних контактних тисках за Герцем. Тут  $f_y = F_h/F_v$ , де  $F_h$  – поперечна складова сили зчеплення;  $F_v$  – вертикальна притискаюча сила



**Рис. 3** – Коефіцієнт поперечного силового замикання  $f_y$  в залежності від кута повороту колеса  $\sigma_a$  при різних станах поверхні рейок

На сьогоднішній день зрозуміло, що коректний теоретичний аналіз або експериментальне вивчення поперечної складової руху мостового крана повинні проводитися з урахуванням значного числа факторів, що впливають на цей процес. Повинні братися до уваги не тільки установочні перекося й форма шляху, але також частота переміщень, величини контактних тисків, стан поверхні рейок, а також бічні зазори коліс. Останні три параметри для кожного крана змінюються у часі й залежать від статистики розташувань візка в прольоті, непертикальності коліс, а також від інших факторів, наприклад, від числа кранів, що одночасно працюють на одному шляху.

Неврахування зазначених вище факторів дає привід затверджувати про значну невизначеність, що ускладнює розуміння й тим більше чисельні оцінки розглянутих явищ.

Практично, у кожному експериментальному дослідженні за весь період досліджень фіксувалися окремі бічні навантаження на колеса й підкранові балки, що суттєво перевищували нормовані значення (іноді в декілька разів). Природа цих підвищених сил до кінця не зрозуміла. Зокрема, не виключена можливість несприятливої комбінації не врахованих раніше факторів.

Опубліковані останнім часом теоретичні роботи присвячені переважно проблемам керування рухом за умов використання різноманітних анти перекісних систем. Таким чином, завдання переводиться переважно в практичну площину.

Найближчим часом можна чекати поживлення інтересу до теоретичних аспектів проблеми у зв'язку з ростом актуальності енергозберігаючих технологій, оскільки основні втрати енергії при роботі крана пов'язані з його пересуванням. Однак детальне урахування усіх важливих процесів, що впливають, у рамках прийнятих спрощень, очевидно вичерпав свої можливості.

Завдання полягає в моделюванні (теоретичному й експериментальному) крана простої і найпоширенішої конструкції: чотириколісної, із двохбалковим мостом.

Повинні бути використані ті підходи, які застосовуються для вивчення складних систем. Основна увага повинна бути приділена аналізу структури явища і його внутрішніх зв'язків, а також забезпеченню повноти й цілісності даних. Подібні думки висловлювали Полікарпов Ю. В. та Диденко Ю. Н [5].

Моделювання проводиться фактично, «із чистого аркуша». Основною вимогою є максимально можлива простота й фізична ясність представлень. Застосування спеціалізованих середовищ (Abaqus, Nastran, «Універсальний механізм») ми вважали нераціональним через надмірність при визначенні поля напруг у тілі конструкції та, навпаки, вираженої недостатності при описі контакт-фрикційних процесів. Крім того, ці середовища мають істотні обмеження, пов'язані з представленням та обробкою даних, а також малодоступні для більшості потенційних користувачів, що принципово обмежує коло поширення розроблювальної програми.

### **3. Розв'язання задачі**

В рамках математичної моделі процеси умовно розділені на 3 групи, між якими встановлені причинно-наслідкові відносини. Це група процесів поздовжнього руху, група процесів поперечного руху й група пружної моделі металокопункції (див. рис. 4).

У групі поздовжнього руху враховуються природні або штучні характеристики двигунів, усі види опорів, інерційні параметри. Опори від ребордного тертя попередньо визначаються в групі поперечного руху. Кінематичні параметри в черговий момент часу розраховуються чисельним розв'язком рівнянь руху для кожного привода методом Рунге-Кутта.

У групі поперечного руху на підставі поточної орієнтації коліс і місцевих ліній рейок по відомих поздовжніх переміщеннях коліс визначаються відповідні бічні зсуви. Для цього використовується найбільш докладна модель поперечного крипу, з урахуванням величини контактного тиску, стану поверхні, а також поздовжніх сил зчеплення у випадку приводних коліс. Потім після визначення положень коліс знаходяться переміщення й поворот крана як жорсткого тіла, а також розраховуються деформаційні зсуви його точок. Фіксуються факти торкання окремих реборд і визначаються величини ребордних опорів.

У групі пружної моделі мосту визначаються сили, що діють на деформовану копункцію. Для цього вирішується система лінійних канонічних рівнянь методу сил.

**Піднімально-транспортні машини****Рис. 4** – Послідовність вирішення математичної моделі

Модель дозволяє досліджувати крани, що перебувають в експлуатації. Вона може бути корисною при проведенні експертних обстежень і модернізацій. Для розв'язку подібних завдань підходить середовище MS Excel, що має необхідний обчислювальний апарат, а також дозволяє організувати інформацію як базу даних і програмувати в середовищі VBA. Втім, програмні дії були свідомо мінімізовані, і перевага віддавалася розрахункам безпосередньо на робочих аркушах.

Нам представляється важливим значний ступінь наочності й відкритості моделі. Вона допускає структурні й змістовні перебудови й доповнення. Як приклад укажемо на можливість урахування в перспективі коливаний мосту та вантажу. Можливості інтерфейсу MS Excel дозволяють із легкістю використовувати в якості вихідних даних не тільки окремі величини, але й деякі закони, задані у вигляді формул, а в більш загальному випадку у вигляді таблиць довільної структури. Дані таблиць використовуються в розрахунках за допомогою стандартних функцій робочого аркуша. Це необхідно, наприклад, при завданні форми рейкового шляху або уточнених параметрів поперечного крипу. Також за допомогою стандартної функції робочого аркуша МОБР(), що формує зворотну матрицю, вирішується система лінійних рівнянь [6].

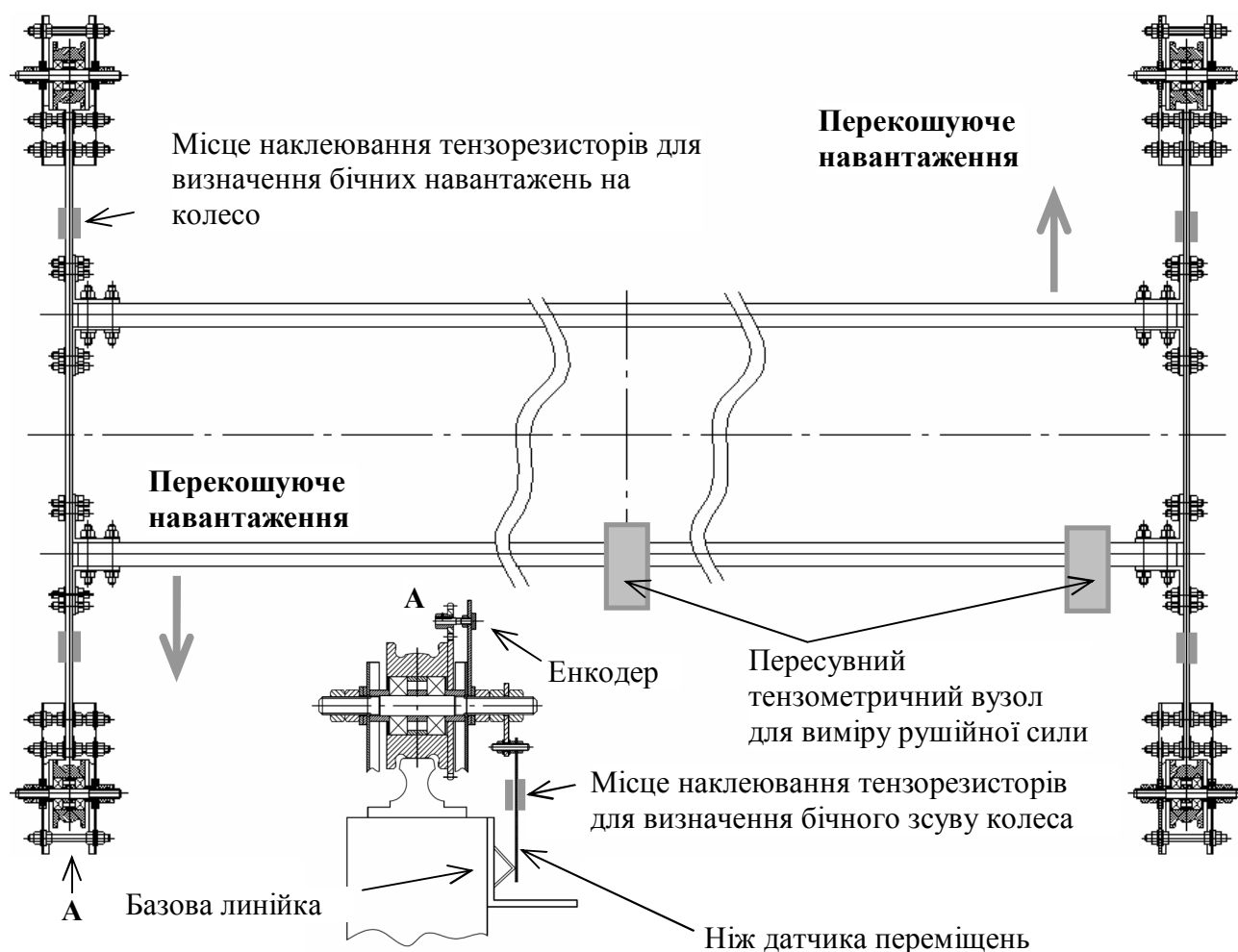
## Піднімально-транспортні машини

Для експериментального дослідження крана в русі потрібна наявність декількох датчиків і багатоканальної вимірювальної апаратури. Рух крана є багатопараметричним процесом зі складною внутрішньою обумовленістю. У цьому плані важливо мати можливість почергового варіювання кожного з параметрів, що впливають, у максимально широкому діапазоні. Таку програму можна здійснити тільки в рамках стендових випробувань моделі, через істотне збільшення необхідних ресурсів.

### 4. Модель крана, схема та план експерименту

Модель (див. рис. 5) спроектована з характерною для мостових кранів комбінацією жорсткостей головних і кінцевих балок. Модель зібрана на болтових з'єднаннях, що забезпечує підвищену точність форми й відсутність додаткових зварювальних напруг. Модель також має достатню податливість у вертикальній площині. У результаті відмінності рівнів рейок не викликає значних додаткових напруг. Вузол установки колеса дозволяє регулювати його положення. На одному колесі наклеєна пластмасова шестірня для передачі обертання на енкодер.

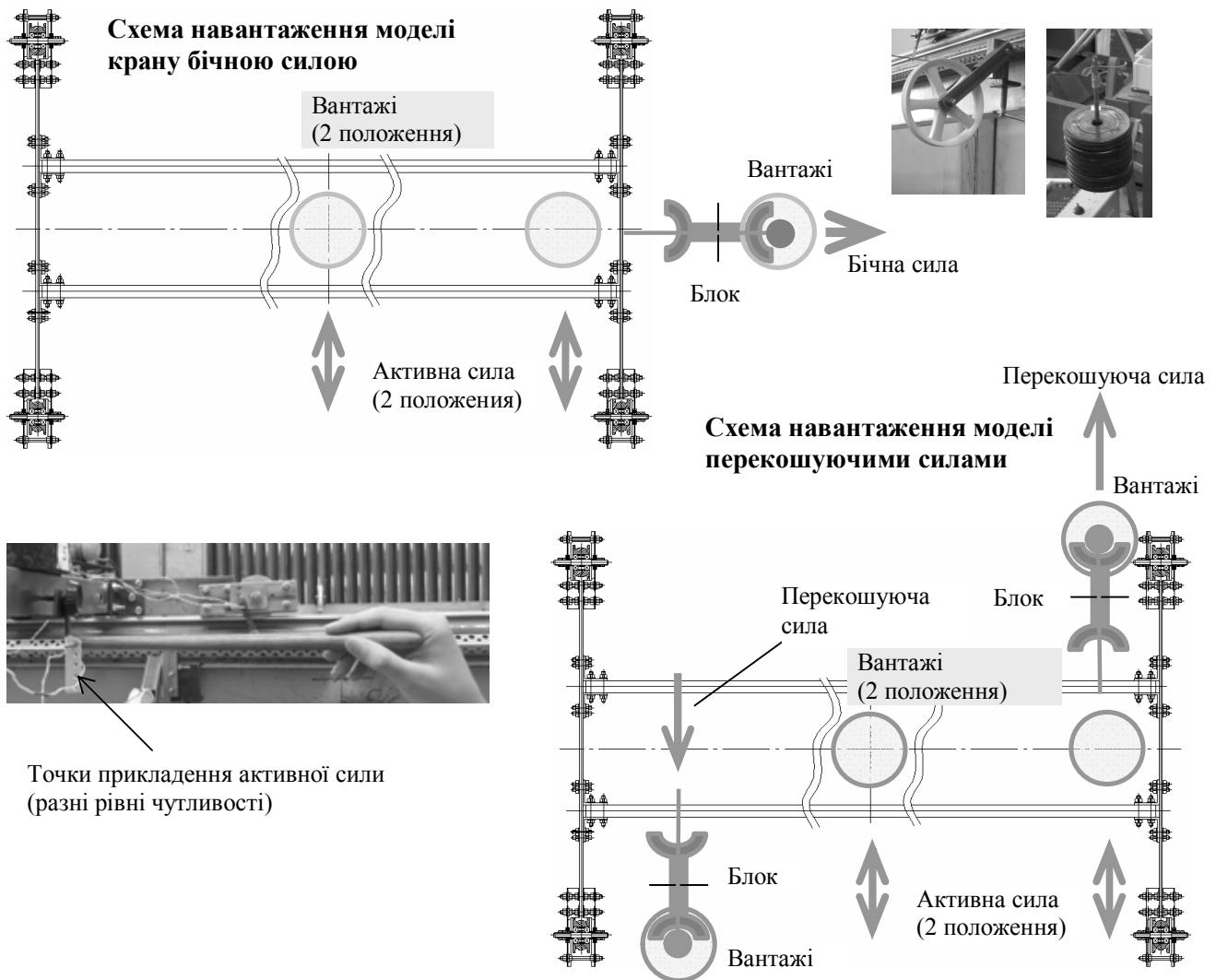
Навантаження від тертя реборд визначаються в окремому експерименті. Переміщення коліс у горизонтальній площині контролюються за допомогою тензометричних ножів, що відгинаються і ковзають по базових лінійках, які закріплені на підкранових балках. Ножі виконані з тонкої листової сталі, тому сила їх притиснення до лінійок незначна. На контактуючих поверхнях закріплені антифрикційні смужки із фторопласта. У результаті додатковий опір від тертя ножів мінімізується.



**Рис. 5** – Експериментальна модель

## Піднімально-транспортні машини

Модель крана переміщається від руки. Активна рушійна сила прикладається до датчика навантаження, закріпленого на головній балці. Сили опору імітуються прикладенням зовнішніх навантажень, створюваних наборами мірних вантажів, які можна з'єднувати з різними точками крана через переставні блоки. У такий спосіб створюються перекошуючі навантаження і бічне навантаження (див. рис. 6).



**Рис. 6** – Схема навантаження експериментальної моделі

Активна сила прикладалася по осі вантажів. Для кожного з комбінацій рівнів навантажень і способів їх прикладення були виконані прогони моделі вперед-назад. Далі, була змінена геометрія рейок та зміна кута установки коліс у плані, після чого серія вимірів була повторена.

### Датчики

Для визначення положення крана використовується енкодер, що приводиться від одного з коліс. Виміри інших величин проводяться однотипно. Кожний вимірювальний вузол містить у собі пластину, що деформується, на бічні поверхні якої наклеєні

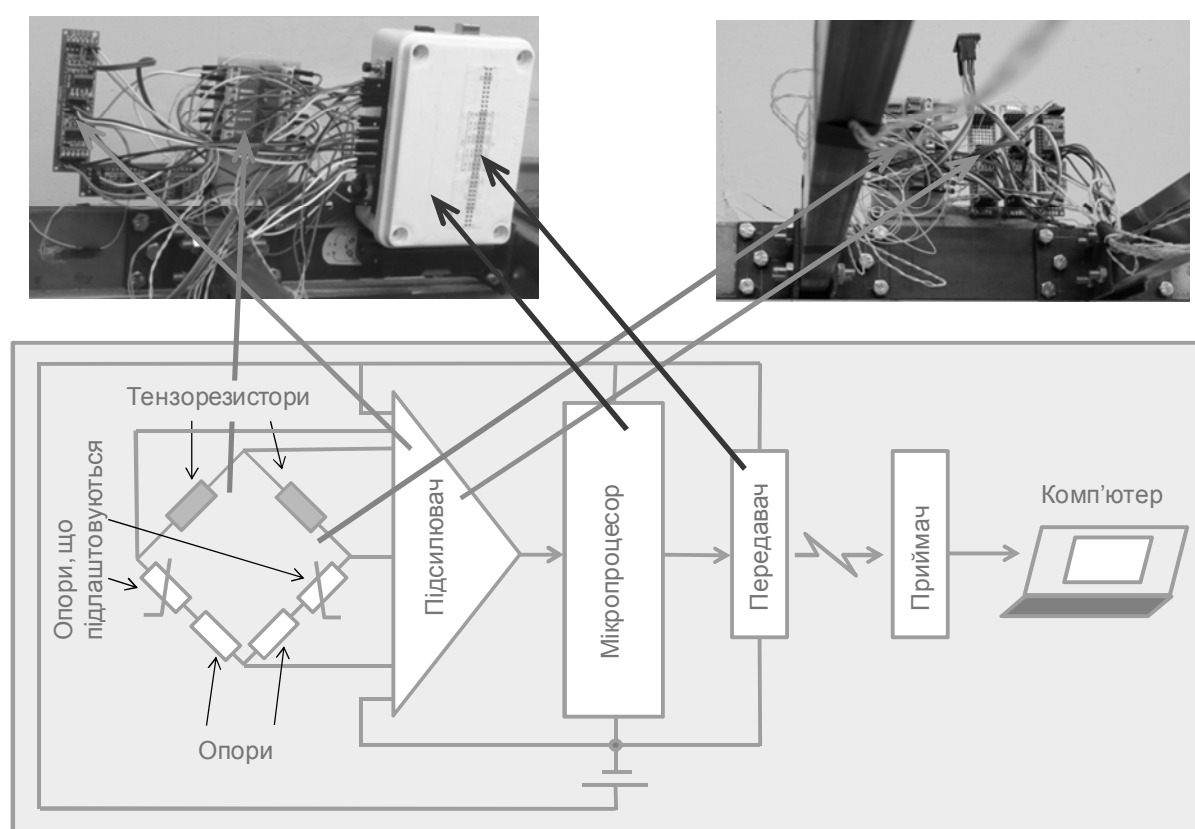


## Піднімально-транспортні машини

тензорезистори, включені в диференціальну мостову схему. Так виконано датчик активного зусилля і датчики бічних сил. Ми відмовилися від стандартної коробчастої форми кінцевих балок і застосували смугу. У результаті була вирішена відома проблема низької чутливості при вимірах бічних сил.

### Посилення сигналу та первинна обробка інформації

Зміна опорів тензорезисторів, з'єднаних за мостовою схемою, викликала зміну потенціалів у плечах мосту Уїтстона, яке підсилювалося блоками первинної обробки сигналу АЦП, спеціалізованими для тензометрії. Посилені сигнали (8 каналів тензодатчиків і 1 канал энкодера) синхронізувалися та оцифровувалися у центральному блоці АЦП (див. рис. 7).

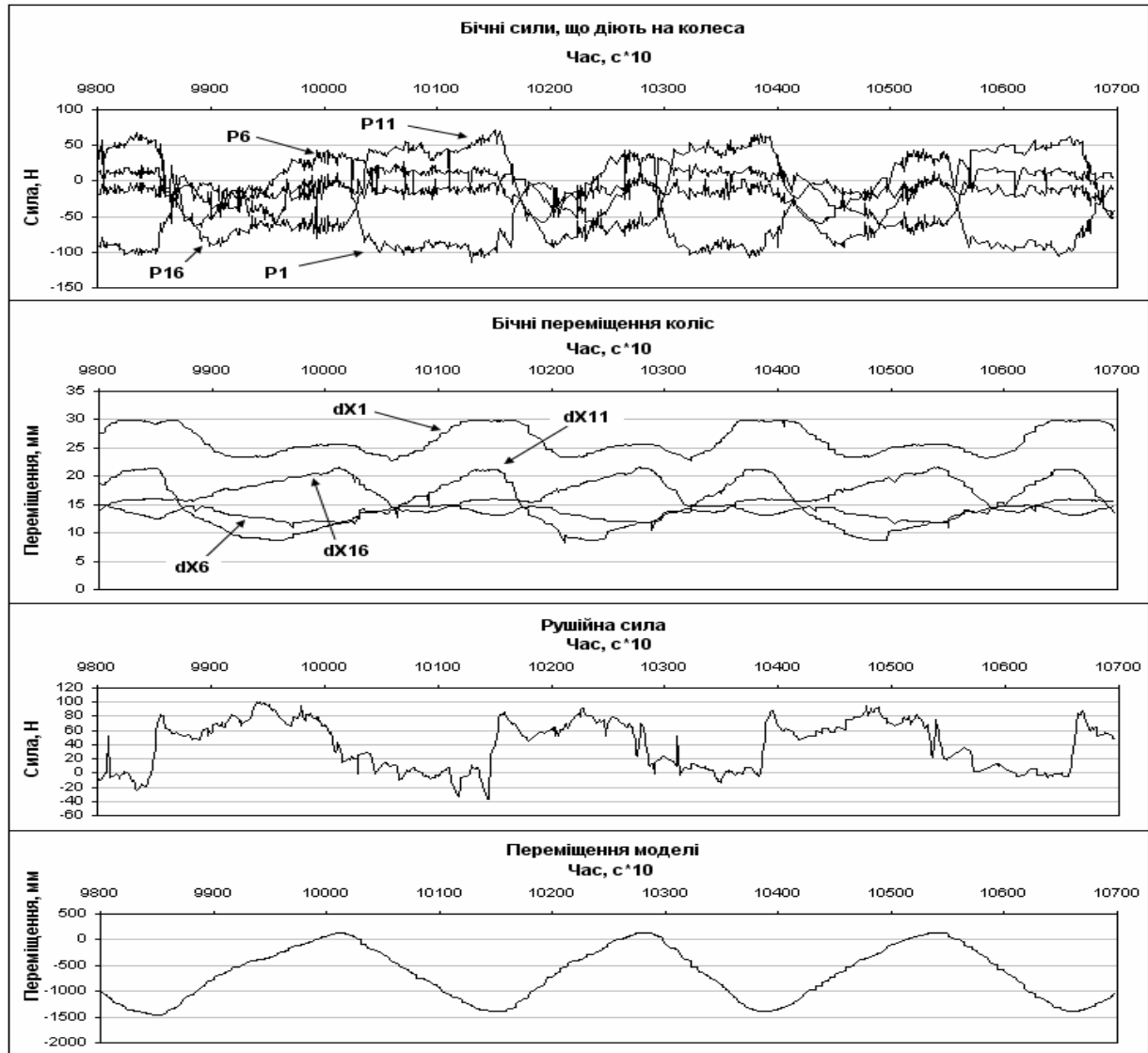


**Рис. 7** – Схема формування сигналу одного тензодатчика

Далі, інформація передавалася по радіолінії на комп'ютер із установленою програмою, що формує текстовий файл із результуючими даними.

### 5. Результати експерименту

У ході експерименту було отримано великий обсяг інформації, яка повинна бути використана для аналізу коректності математичної моделі. Приклади оброблених даних з урахуванням тарувань наведені на рис. 8.

**Піднімально-транспортні машини**

**Рис. 8** – Результати експерименту (рух моделі при наявності перекісного навантаження)

**Висновки**

У роботі розглянуті основи підходи до математичного й експериментального моделювання руху кранів мостового типу з перекосами.

Математична модель складена з урахуванням структури причинно-наслідкових зв'язків між окремими процесами. Модель дозволяє задавати вихідні дані в різному вигляді, включаючи табличне і аналітичне подання. Обрана програмна середа забезпечує можливість довільної зміни складу і форми представлення вихідних даних, редагування і доповнення розрахункових операцій. Ми вважаємо це принципово важливим для таких структурно складних і різноманітних об'єктів, як крани.

Експериментальна частина роботи виконана на стенді з підвищеною точністю вимірювань при покроковому варіюванні впливаючих параметрів в широкому діапазоні. Отримані дані будуть використані для підтвердження коректності математичної моделі, після чого вона може бути використана для досліджень натурних кранів. Результати

дослідження можуть бути корисні при розробці уточненої методики розрахунків перекисних навантажень та відповідних опорів пересуванню для кранів мостового типу.

**Список використаних джерел:**

1. Грузоподъемные машины : в 2-х кн. Кн. 1 / Г. Пайер, М. Шеффлер, Х. Кильхорн, Г. Адам, Ф. Курт ; под. ред. М. П. Александрова. – М. : Машиностроение, 1981. – 216 с.
2. Лобов Н. А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути / Н. А. Лобов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 232 с.
3. Спицына Д. Н. Исследование боковых сил, действующих на многоколесные мостовые краны / Д. Н. Спицына // Вестник машиностроения. – 2003. – № 3. – С. 3-9.
4. Спицына Д. Н. Исследование боковых сил, действующих на многоколесные мостовые краны при наличии неровностей подкрановых путей / Д. Н. Спицына, А. Н. Юрин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 6. – С. 33-41.
5. Поликарпов Ю. В. Обоснование выбора математической модели движения грузоподъемного крана по рельсовому пути / Ю. В. Поликарпов, Ю. Н. Диденко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 4. – С. 240-244.
6. Grigorov O. V. Motion of cranes of bridge type simulation in the MS Excel environment / O. V. Grigorov, O. V. Stepochkina // *Advanced Logistic Systems*. – 2014. – Vol. 8, – N 1. – P. 33-40.

**References**

1. Payer, G, Sheffler, M, Kilkhorn, Kh, Adam, G & Kurt, F 1981, *Gruzopodyemnyye mashiny*, Mashinostroyeniye, Moskva.
2. Lobov, N 2003, 'Dinamika peredvizheniya kranov po relsovomu puti', Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, Moskva.
3. Spitsyna, D 2003, 'Issledovaniye bokovykh sil, deystvuyushchikh na mnogokolesnyye mostovyye krany', *Vestnik mashinostroyeniya*, no. 3, pp. 3–9.
4. Spitsyna, D & Yurin, A 2016, 'Issledovaniye bokovykh sil, deystvuyushchikh na mnogokolesnyye mostovyye krany pri nalichii nerovnostey podkranovykh putey', *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, no. 6, pp. 33–41.
5. Polikarpov, Yu & Didenko, Yu 2011, 'Obosnovaniye vybora matematicheskoy modeli dvizheniya gruzopodyemnogo krana po relsovomu puti', *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii*, no. 4 (25), pp. 240-244.
6. Grigorov, O & Stepochkina, O 2014, 'Motion of cranes of bridge type simulation in the MS Excel environment', *Advanced Logistic Systems*, vol. 8, No. 1, pp. 33-40.

Стаття надійшла до редакції 7 червня 2017 р.