

УДК 621.86

Григоров О.В., д.т.н.; Губський С.О., к.т.н.; Турчин О.В.,
Радченко В.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний
інститут»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОВОГО КРАНА В ПРОЦЕСІ ПЕРЕСУВАННЯ

Анотація. Пересування сторін мостового крана є несинхронним, що спричиняє численні негативні явища. У роботі аналізуються відомі підходи до розв'язку проблеми й пропонується новий, обумовлений з одного боку зростаючою актуальністю завдань енергозбереження, впровадженням антиперекісних заходів і зокрема, систем керування, а з іншого – наявністю сучасних інформаційних технологій. Виконане математичне та експериментальне моделювання пружної моделі крана. Обговорюються можливості подальшого використання отриманих результатів.

Аннотация. Передвижение сторон мостового крана не синхронно, что является причиной многочисленных негативных явлений. В работе анализируются известные подходы к решению проблемы и предлагается новый, обусловленный с одной стороны, возросшей актуальностью задач энергосбережения, внедрением антиперекосных мероприятий и в частности, систем управления, а с другой – наличием современных информационных технологий. Выполнено математическое и экспериментальное моделирование упругой модели крана. Обсуждаются возможности дальнейшего использования полученных результатов.

Abstract. The movement of the sides of a bridge crane is not synchronous, which is the cause of numerous negative phenomena. The paper analyzes the known approaches to the solution of the problem and proposes a new one, due, on the one hand, to the increased relevance of energy saving tasks, the introduction of anti-skewing measures and, in particular, management systems, and on the other, the availability of new information technologies. The mathematical and experimental modeling of the elastic model of the crane is performed. The possibilities for further use of the results obtained are discussed.

Постановка проблеми. Рух крана супроводжується поворотами й деформаціями у горизонтальній і вертикальній площинах. Бічні поверхні реборд і рейок швидко зношуються, на кран і підкранову конструкцію діють великі бічні навантаження. Боротьба із цими

негативними явищами є важливим завданням, яке вирішується за допомогою ряду конструктивних, технологічних і організаційних заходів. На сьогоднішній день проведені численні дослідження, на основі яких розроблені нормативні методики розрахунку навантажень. Останнім часом, у зв'язку із впровадженням частотно регульованого привода, одержують поширення різні антиперекісні системи керування рухом крана. У найближчому майбутньому можна чекати підвищення інтересу до обговорюваної проблеми, що пояснюється затребуваністю енерго/матеріалозбереження. У цьому зв'язку представляється важливим продовження досліджень із метою одержання більш діючих рекомендацій для практичного застосування.

Аналіз останніх досліджень. Наприкінці 60-х початку 70-х років минулого сторіччя були вироблені основи поглядів на фізичну картину процесів, що супроводжують рух кранів. Зокрема, стала очевидною визначальна роль бічних навантажень, що діють на колеса мостових кранів, установлених з монтажними перекосами. Ці навантаження обумовлені складною контактено-фрикційною взаємодією коліс із рейками.

Аналітичний підхід, прийнятний у рамках задач, що мають прямий розв'язок, був уперше застосований Хеннісом і Ганновером [1] для найнебезпечнішого виду руху з наявністю контакту напрямного елемента (реборди або бічного ролика) одного колеса з рейкою. Цей підхід надалі з деякими доповненнями прийнятий в DIN 15018 у якості розрахункової методики при оцінці бічних навантажень. У наш час методика перенесена в EN 13001, а в частині впливу на підкранові спорудження – в EN 1991-3 (Eurocode 1 Part 3). Головними допущеннями є абсолютна жорсткість мосту, ігнорування непрямолінійності рейок і монтажних перекосів окремих коліс, а також спрощений метод розрахунку параметрів, що відносяться до контактних явищ.

У наступних роботах були зроблені успішні спроби обійти частину перерахованих обмежень, в основному, поправочним чином.

Альтернативний підхід полягає в побудові розгорнутих моделей, що забезпечують урахування можливих станів в їхньому різноманітті ([2]; [3]). Необхідність ускладнення теорії була виявлена в ході випробувань кранів [2], при яких окремі параметри, включаючи навантаження на колеса, вимірялися з підвищеною точністю. Була відзначена короткочасність і низька ймовірність такого виду руху, який урахується в DIN 15018. З іншого боку, зафіксовані додаткові природні види рухів, що характеризуються навантаженнями такого ж рівня (рух без торкання реборд, з торканням реборд коліс однієї сторони, з діагональним торканням реборд).

Була констатована ускладненість і навіть неможливість побудови загального аналітичного розв'язку для декількох станів, тому

для кожного окремого випадку застосовувалася власна система диференціальних рівнянь (дев'ятого, восьмого й сьомого порядку при різних схемах контакту реборд коліс) [2]. Рівняння вирішувалися чисельними методами.

Останнім часом спостерігається деяке зниження інтересу до фундаментальної проблеми аналізу крана в русі. Рішення насамперед переводиться в практичну площину, що пов'язано з практикою впровадження більш досконалих систем керування рухом. Відповідно, зростає кількість теоретичних і експериментальних робіт, присвячених різним аспектам застосування цих систем керування ([4-7] і ін.). Окремо можна відзначити прогрес в області вивірки положення коліс.

На нашу думку, нові технічні можливості не виключають, а, навпаки, припускають подальший розвиток експериментально-теоретичних робіт в цілому. При цьому складність умов, абстрагованих у формі відомих рівнянь, зростає. Також повинні бути сформульовані додаткові цільові настанови: крім пошуку небезпечних станів бажано розглянути попереджуючі способи корекції руху, що є принципово більш складним завданням.

Відзначимо також важливу, але додаткову інформацію, отриману в експериментах Марквардта [8], Ганноверу [1] та інших авторів, що відноситься до процесу кочення кранового колеса по рейці. Мається на увазі виражена залежність сили зчеплення в поперечному напрямку від величини контактної тиску (рис.1, а), а також від стану поверхні (рис.1, б) Остання обставина пов'язана у тому числі з утворенням/видаленням поверхневих плівок окислів в залежності від інтенсивності руху.

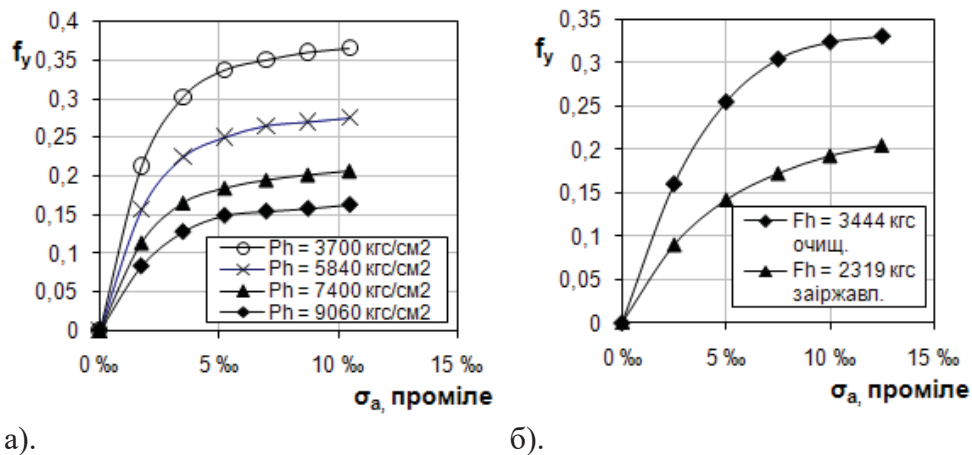


Рисунок 1 – Коефіцієнт поперечного силового замикання f_y в залежності від кута повороту колеса σ_a : а). при різних контактних поверхневих тисках за Герцем; б). при різних станах поверхні рейок (тут $f_y = F_h/F_v$, де F_h – поперечна складова сили зчеплення; F_v – вертикальна сила).

На наш погляд, також повинні братися до уваги зафіксовані в ході експериментів надзвичайно високі значення коефіцієнта поперечного зчеплення, рівного відношенню бічної сили зчеплення до вертикальної сили, що притискає (до 0,4 – 0,45 проти величини 0,3, прийнятої в DIN 15018).

Невирішені частини загальної проблеми. Ми виходимо з розгляду крана як механічної системи із множинними внутрішніми зв'язками, яка зазнає зовнішні впливи обурюючого характеру, пов'язані зі скривленнями рейок, зміною геометрії площадок контакту та стану їх поверхні, а також, можливо, обумовлені впливом системи керування. Наведені вище способи аналізу, що припускають різний склад системи рівнянь для різних станів у розглянутому випадку стають досить складними.

Іншою серйозною проблемою є неповнота даних, що характеризують умови експериментів. Відсутність інформації про установочні положення коліс, про геометрію рейкового шляху, ширину накатаної доріжки та стан поверхні рейок вносить істотну невизначеність при аналізі результатів.

Як і десятки років тому, актуальним є питання точності вимірів. Насамперед, мається на увазі найбільш важливий параметр – бічне навантаження на колесо.

Ціль статті. Розробка основних принципів математичного моделювання мостового крана в русі з використанням обчислювальних середовищ, що забезпечують необхідний рівень аналізу даних. Проведення стендових випробувань пружної моделі крана із залученням сучасних засобів вимірів фізичних параметрів. Оптимізація експериментальної моделі з метою підвищення точності вимірів. Залучення табличного процесора для обробки результатів експерименту. Попередній аналіз результатів. Використання результатів експерименту для оцінки коректності математичної моделі.

Основний матеріал. Значну увагу ми приділили пошуку обчислювального апарата, адекватного розглянутому завданню, що має не тільки можливість виконання математичних дій, але й перевірки множинних логічних умов. Також цей апарат має забезпечувати зберігання й наочне представлення масивів даних різної структури. При цьому ми допускали обґрунтоване спрощення підходів при збереженні фізичності та причинно-наслідкових відносин між окремими явищами, які були умовно розділені на 3 групи [9]:

1). Процеси, пов'язані з поздовжнім рухом. Проводяться розрахунки опорів пересуванню, приведення мас, визначення рушійних сил з урахуванням характеристик двигунів – роздільно для сторін крана. Знаходяться кінематичні параметри в наступний момент часу за допомогою розв'язку системи диференціальних рівнянь руху методом Рунге-Кутта;

2). пружна модель рами, що включає головні та кінцеві балки мосту. У рамках моделі знаходяться навантаження, що діють на деформовану конструкцію. Для цього використовується розв'язок системи канонічних лінійних рівнянь методу сил;

3). процеси, пов'язані з поперечним рухом. При визначенні бічних зсувів кожного колеса враховуються поточні кути накочування. Береться до уваги найбільш повна модель фрикційно-контактної взаємодії. Далі визначається кут повороту крана як жорсткого тіла, після чого розраховуються деформаційні переміщення окремих точок металоконструкції крана.

Ми не виділяли штучно яку-небудь групу в якості основної, що пов'язане зі значною різноманітністю конструкцій кранів. При збільшеній жорсткості металоконструкції й умовно жорсткому поперечному зчепленні коліс із рейками превалюють процеси другої та третьої груп. Такі параметри мають мостові крани з середніми та малими прогонами. Напроти, для мостових кранів з великими прогонами, а також козлових кранів визначальними є процеси першої групи. В останньому випадку очікується істотний позитивний ефект від застосування антиперекісних систем керування.

Ми акцентуємо увагу на можливості розширення надалі кола розглянутих питань без кардинальної перебудови розрахункового ядра. Перелічимо деякі можливі додаткові завдання: оцінка сил, що діють на обстежуваний кран при відомих відхиленнях форми рейкового шляху й установочних кутах коліс; розробка розрахункової методики визначення найбільших статичних навантажень (потрібен розв'язок для несприятливої комбінації впливаючих факторів); розробка розрахункової методики визначення спектра навантажень, необхідного для перевірки витривалості конструкції (потрібен статистичний аналіз за результатами серії розрахунків); підбір оптимальних антиперекісних заходів з урахуванням їх ефективності й вартості (потрібна мінімізація відповідної функції цілі).

Експериментальна частина роботи має основною метою підтвердження коректності теоретичної частини.

Стендова модель (рис. 2) спроектована з характерною для мостових кранів комбінацією жорсткостей головних і кінцевих балок. Модель зібрана на болтових з'єднаннях, що забезпечує підвищену точність форми та відсутність додаткових зварювальних напруг. Модель також має достатню податливість у вертикальній площині. У результаті відмінність 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.

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.

Виміри величин проводяться однотипно. Кожний вимірювальний вузол містить у собі пластину, що деформується, на бічні поверхні якої наклеєні тензорезистори, включені в диференціальну мостову схему. Так виконані датчик активного зусилля та датчики бічних сил. Ми відмовилися від стандартної коробчастої форми кінцевих балок і застосували смугу. У результаті була вирішена відома проблема чутливості при вимірах бічних сил.

Зміна опору тензорезисторів, з'єднаних за мостовою схемою, викликає зміну потенціалів у плечах мосту Уїтстона, яке підсилюється блоками первинної обробки сигналу АЦП, спеціалізованими для тензометрії. Інформація передається по радіолінії на комп'ютер із встановленою програмою, що формує текстовий файл із результатуючими даними.

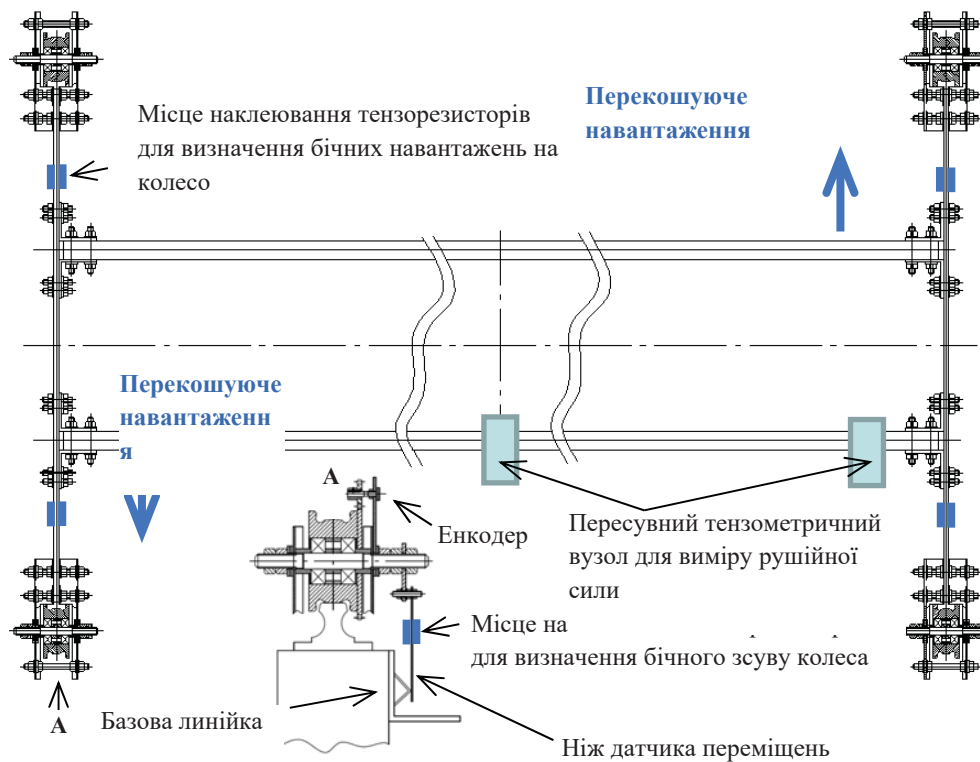


Рисунок 2 – Експериментальна модель

Модель крана переміщується 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, а також бічне навантаження (див. рис. 3).

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

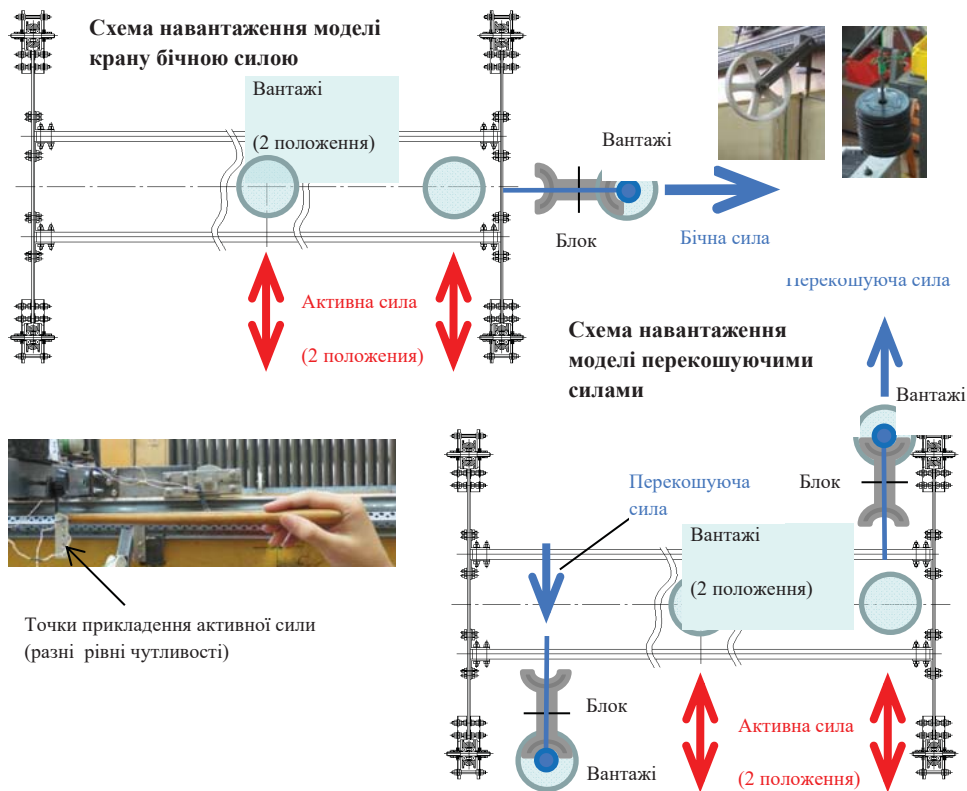


Рисунок 3 – Схема навантаження експериментальної моделі

Метою ще однієї додаткової серії було визначення фрикційно-контактних характеристик пари колесо/рейка. Для цього колесо навантажувалося вертикальною та бічною силами. Вимірялося пружне поперечне переміщення (крип), а також опір ребордного тертя.

У кожній серії (включаючи фрикційний експеримент) проводилося поступове незалежне збільшення вертикального навантаження, рушійної сили та додаткових обурюючих сил. Сили доводили до рівня свідомо перевищуючого характерні навантаження кранів. Ми вважаємо це важливим, оскільки додаткова інформація дозволяє судити про ступінь універсальності математичної моделі. 3

аналогічною метою був проведений окремий цикл випробувань із навантаженням моделі бічним зусиллям, що також не характерно для кранів. В останньому випадку були отримані цікаві результати, наприклад, був неодноразово зафіксований тривалий рух без торкання реборд.

Велика увага була приділена одержанню коректних тарувальних залежностей. При таруваннях датчиків сили проводилося багаторазове роздільне навантаження окремих сторін підвишеними вантажами, з'єднаними з кінцевими балками за допомогою синтетичних тросиків, перекинутих через блоки з мінімальним тертям. Навантаження кожним набором вантажів проводилося кілька раз. Отримані дані потім осереднювались засобами електронних таблиць.

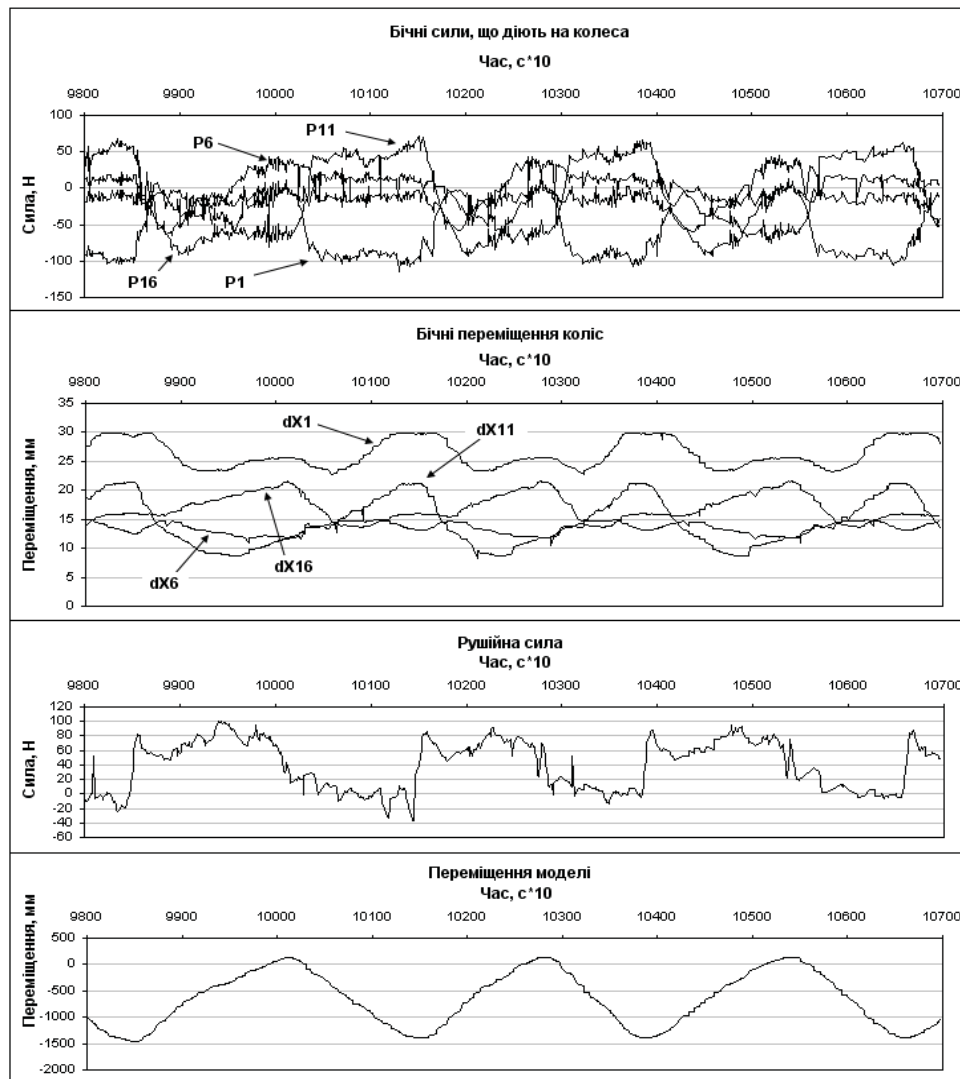


Рисунок 4 – Фрагмент результатів експерименту (рух моделі при наявності перекісного навантаження)

Перед кожною серією випробувань проводилася прокатка моделі зі зняттям показників датчиків бічних переміщень коліс. При цьому забезпечувався почерговий контакт зовнішніх і внутрішніх реборд.

При обробці результатів вимірів урахувалися додаткові навантаження, пов'язані з відхиленнями рейок у вертикальній площині.

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. 4.

Висновки. В роботі проаналізовані існуючі принципи теоретичного та експериментального дослідження мостових кранів у русі. Пропонується комплексний підхід з використанням нових можливостей обробки та зберігання даних. Проведені стендові випробування пружної моделі крана з підвищеною точністю вимірів основних параметрів. Результати випробувань використовуються для перевірки коректності математичної моделі, яка надалі може бути застосована для аналізу руху натурних кранів.

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Hannover H. Fahrverhalten von Brukkenalranen. / Hannover H. // Fördern und Heben. 21. – 1972. – 22 (1972): 5.
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. Д.Н. Спицына. Исследование боковых сил, действующих на многоколесные мостовые краны при наличии неровностей подкрановых путей / Д.Н. Спицына, А.Н. Юрин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение 6 [675] 2016. с. 33–41
4. А.А. Дорофеев. Разработка и исследование систем электроприводов, обеспечивающих бесперекусное движение мостовых кранов. Диссертация. Липецк-2010
5. Орловский И.А. Уточненные математическая и имитационная модели электропривода перемещения мостового крана / Орловский И.А., Бут Ю.С. // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – №2. – С. 39 – 51.
6. Д.В. Кочевинев Управление движением мостового крана с коррекцией перекуса и поперечного смещения / Д.В. Кочевинев, В.М.

Сканцев, В.Н. Федяев, Е.А. Федяева БГТУ, г. Брянск // Проблемы механики современных машин, 2012, т. 1

7. Бондаренко Л. Н. Параметры привода передвижения мостового крана в период пуска с учетом трения качения колеса по рельсу / Л. Н. Бондаренко, С. В. Ракша // Вісник Дніпропетровського національ-ного університету т залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – № 10. – С. 29–31.

8. Marquardt H. Berechnungsmodell für die Horizontalkraften Brückenkranen Während der gleichformigen Fahrbewegung / Marquardt H. // Wissenschaftliche Zeitchrift TH Magdeburg. – 1973. – 17 (1973): 6.

9. Grigorov O.V. Motion of cranes of bridge type simulation in the MS Excel environment / Grigorov O.V., Stepochkina O.V. // Advanced Logistic Systems, Vol. 8, No. 1 (2014), pp. 33–40.