

УДК 621.873

DOI: 10.15276/pidtt.3.64.2020.02

Ловеїкін В. С., Ромасевич Ю. О., Пилипенко А. П., Муштин Д. І.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІСНОГО РУХУ МЕХАНІЗМІВ ПОВОРОТУ ТА ПЕРЕМІЩЕННЯ ВІЗКА БАШТОВОГО КРАНА. ЧАСТИНА 1

Анотація. У статті проведено опис процедур для проведення експериментальних досліджень сумісного руху механізмів повороту та переміщення візка баштового крана. Наведено конструкцію лабораторної моделі крана, обрано найбільш значимі характеристики, які необхідно виміряти, а також відповідне вимірювально-реєструюче обладнання (датчики та пристрій збору даних *m-DAQ 14*). Вказано місця встановлення датчиків на лабораторній моделі крана та програмне забезпечення для пристрою *m-DAQ 14*. Це дало змогу фіксувати кінематичні та електричні характеристики при сумісному русі механізмів повороту крана та переміщення візка. В експериментах використано два оптичні енкодери, датчик струму, акселерометр та два інклінометри.

Для встановлення закономірностей впливу зміни факторів (маса вантажу, довжина гнучкого підвісу, початкове положення візка на стрілі та механізм, який перший починає рух) проведено планування експериментальних досліджень та наведено план першої серії експериментів. Він включав шістнадцять експериментів.

Крім того, описано методiku збору даних та їх обробки (інтерпретація за допомогою тарувальних залежностей, фільтрація від шумів та визначення похідних за допомогою інтерполяційних методів). Коротко описано процедури визначення індикаторів, які будуть використані у ході подальшого аналізу отриманих експериментальних даних.

Ключові слова: експериментальні дослідження, баштовий кран, планування, лабораторна модель.

Постановка проблеми.

Баштові крани знайшли широке застосування у багатьох галузях народного господарства. Серед них будівельна сфера займає домінуючі позиції, оскільки, наприклад, сучасне висотне будівництво неможливе без баштових кранів.

Підвищення ефективності експлуатації баштових кранів можливе лише за умов обґрунтованих інженерних рішень щодо

покращення конструкції кранів, оптимізації режимів руху їх механізмів та раціоналізації умов експлуатації крана (правильне визначення стоянок крана, раціональне використання крана за вантажопідйомністю, тривалістю роботи механізмів тощо). Ці рішення повинні прийматись на основі ґрунтованого аналізу поведінки крана як складної динамічної системи. Остання, у свою чергу, переводить вказані питання у площину наукових, у тому числі, експериментальних досліджень. Очевидно, що для того, щоб підтвердити теоретичні результати, які направлені на підвищення ефективності експлуатації баштових кранів, необхідно проводити експерименти. Їх мета повинна полягати у визначенні застосовності теоретичних результатів в умовах практики експлуатації кранів.

Аналіз публікацій по темі досліджень.

У багатьох наукових роботах досліджено різні питання експлуатації баштових кранів, які ґрунтуються на експериментальному підході. Зокрема, у роботі [1] досліджено питання зміни вильоту та підйому вантажу баштового крана (експерименти проведено на лабораторній моделі крана). Встановлено достатню для практичних цілей адекватність використаної математичної моделі крана та якісну реалізацію оптимальних законів руху візка і підйому вантажу, які забезпечують усунення маятникових коливань вантажу та його пружних коливань на гнучкому підвісі.

У статті [2] представлено контролер для лабораторної моделі баштового крана. Для візка, що рухається по балочній стрілі, автори запропонували використати ПІ- та ПІД-регулятори для того, щоб усунути маятникові коливання вантажу. Аналіз результатів проведено у частотній області.

У статті [3] представлено проектування та реалізацію прототипу баштового крана, який може бути використаний в якості експериментальної тестової установки для виконання випробування, необхідних для підтвердження теоретичних результатів динаміки баштового крана. У роботі виконано проектування, вибір деталей, структури прототипу, проведено аналіз напруженості деталей, реалізація прототипу крана, розроблено систему керування, а також обрано вимірювальні прилади.

У роботі [4] проведено теоретичні та експериментальні дослідження у частині керування руху механізмів баштового крана при різній масі вантажу, різній довжині гнучкого підвісу та збуреннями, що моделюють дію вітру. Результати показали, що при будь-яких умовах розроблений авторами контролер дає змогу зменшити у два-чотири рази коливання вантажу.

Мета данного дослідження.

Метою першої частини роботи є планування експериментальних досліджень динаміки сумісного руху механізмів повороту та

переміщення візка баштового крана. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: 1) розробити лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень; 2) провести вибір вимірювально-реєструючого обладнання; 3) виконати планування експериментальних досліджень; 4) розробити методику обробки експериментальних даних.

Виклад основного матеріалу.

Для того, щоб підтвердити теоретичні результати та встановити їх застосовність у практичних задачах керування механізмами повороту крана та зміни вильоту вантажу необхідно провести експериментальні дослідження. Побудова теоретичних моделей, а також результати, що були отримані на їх основі, відображають лише найсуттєвіші фактори, які мають вплив на динаміку руху механізмів. Разом з тим, може виникнути ситуація при якій певні характеристики систем (наприклад, це стосується системи керування електроприводами механізмів) не були враховані належним чином, що може поставити під сумнів практичне застосування оптимальних законів руху механізмів баштового крана. Для того, щоб виявити такі фактори, а також дати рекомендації щодо їх врахування, необхідно провести експериментальні дослідження та виконати аналіз отриманих даних.

Всі експериментальні дослідження були проведені у лабораторії динаміки машин (ауд. 354, 11 навч. корп. Національного університету біоресурсів і природокористування України). Вона представляє собою модель баштового крана, яка має механізми повороту, зміни вильоту та підйому вантажу (рис. 1).

Живлення установки виконувалось від промислової мережі напругою 380 В та частотою 50 Гц.

У трансмісії механізму повороту крана знаходяться черв'ячний редуктор та відкрита циліндрична передача. Механізм переміщення візка обладнаний циліндричним редуктором (рис. 1). Обидва механізми обладнані нормально-замкненими гальмами.

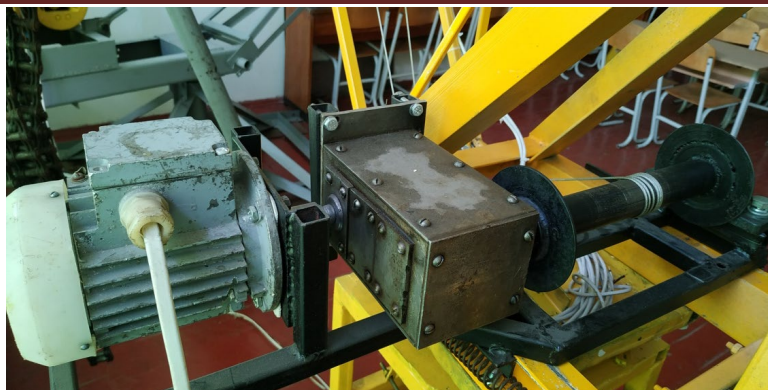
Всі експериментальні дослідження проведені на лабораторній моделі баштового крана. Для того, щоб встановити, як співвідносяться дані лабораторних експериментів та теоретичних досліджень необхідно застосувати теорію подібності [5]. Вона ґрунтується на тому, що процеси, які виникають у механізмах реального крана Liebherr 140 НС та його лабораторної (зменшеної у розмірах) моделі є подібними. Це дає підстави, враховуючи певні коефіцієнти, оцінювати отримані експериментальні результати як результати для реального крана. Вказані коефіцієнти, які називаються коефіцієнтами подібності [5], було обчислено, використовуючи математичні моделі реального крана та його лабораторної моделі.



a)



б)



в)

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд моделі баштового крана: а) загальний вигляд моделі; б) механізм повороту; в) механізм переміщення візка

При проведенні експериментальних досліджень вимірювались такі характеристики: 1) коливання вантажу (у радіальному і тангенціальному напрямках); 2) поворот крана; 3) переміщення візка на стрілі; 4) коливання стріли (прискорення кінця стріли у тангенціальному напрямку); 5) струм приводів механізмів повороту крана та переміщення візка.

Для того, щоб виміряти всі вказані характеристики необхідно виконати вибір і розміщення датчиків на моделі вантажопідйомного стрілового крана. На рис. 2 показано місця закріплення та схема передачі експериментальних даних на ПК для подальшої їх обробки.

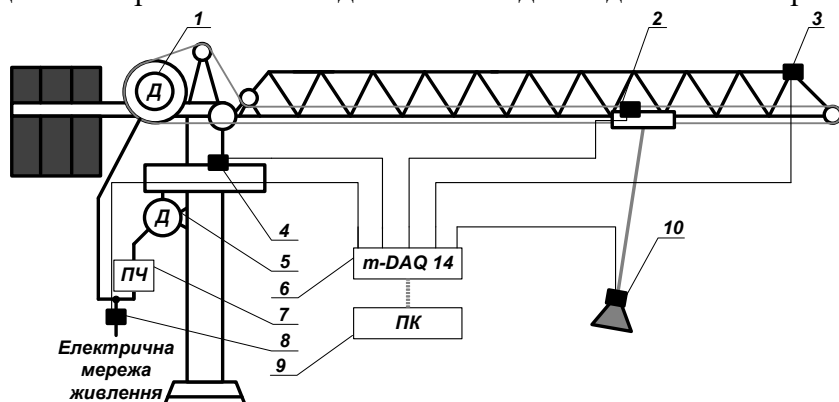


Рисунок 2 – Схема розташування датчиків на лабораторній установці та підключення реєструючого обладнання: 1 – двигун механізму переміщення візка; 2 – датчик положення візка; 3 – датчик коливання стріли у тангенціальному напрямку (акселерометр); 4 – датчик повороту крана; 5 – двигун механізму повороту крана; 6 – пристрій збору даних (аналого-цифровий перетворювач); 7 – перетворювач частоти; 8 – датчик струму; 9 – персональний комп'ютер; 10 – датчик кута відхилення канату у тангенціальному та радіальному напрямках (інклінометр)

Датчик положення візка та повороту крана потребують по два канали запису даних. Таким чином, загальна кількість каналів збору даних рівна восьми. У подальшому викладі наведемо детальний опис датчиків та пристрою збору даних, які використані під час проведення експериментальних досліджень.

Для вимірювання лінійного переміщення візка по стрілі використано енкодер ENC фірми Autonics (рис. 3, а), а для визначення кута повороту стріли використано енкодер MOL-40 фірми Megatron (рис. 3, б).



а)



б)

Рисунок 3 – Розташування датчиків кутових та лінійних положень (енкодерів): а) на візку; б) у приводі механізму повороту крана

Енкодер, який дає змогу виміряти лінійне положення візка, закріплений таким чином, щоб одним коліщатком дотикатись до стріли. При переміщенні візка коліщатко обертається і енкодер формує імпульси. Їх кількість пропорційна до відстані переміщення візка. Аналогічний принцип застосований для енкодера повороту крана. При цьому він через шестерню взаємодіє із зубчастим колесом відкритої

зубчастої передачі механізму повороту крана. Фактичний кут повороту стріли був отриманий шляхом врахування кількості зубів на шестерні та зубчастому колесі.

Акселерометр та інклінометр жилилися від лабораторного блока живлення, який на виході був налаштований на 12 В постійного струму. Їх розміщення наведено на рис. 3.

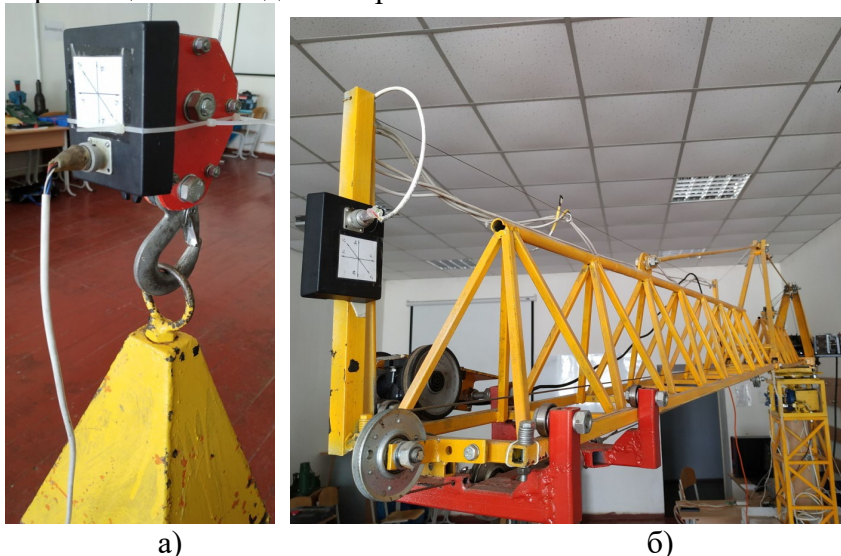


Рисунок 3 – Розташування датчиків: а) інклінометра; б) акселерометра

Для вимірювання сили струму, який споживають електродвигуни механізмів повороту крана та переміщення візка, був використаний датчик струму (рис. 4).

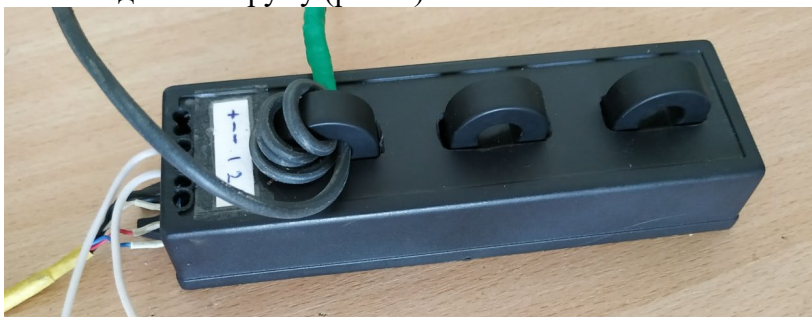


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд датчика струму, що використаний у дослідженнях

Датчик живився постійною напругою 12 В. Для підвищення точності вимірів фазний провід був пропущений у кільце датчика п'ять разів. При обробці даних всі отримані значення ділились на п'ять.

Всі сигнали з датчиків надходять на пристрій збору даних m-DAQ 14 [6] (рис. 5).



Рисунок 5 – Зовнішній вигляд пристрою збору даних m-DAQ 14 із платою, до якої підключені всі датчики

Для того, щоб керувати роботою m-DAQ 14 (задавати частоту опитування сигналів, обирати канали, з яких зчитуються дані, форматувати дані, виконувати візуалізацію сигналів по каналах тощо) під час виконання експериментальних досліджень використано програмне забезпечення mDAQ-14 Reader v1.2 (рис. 6).

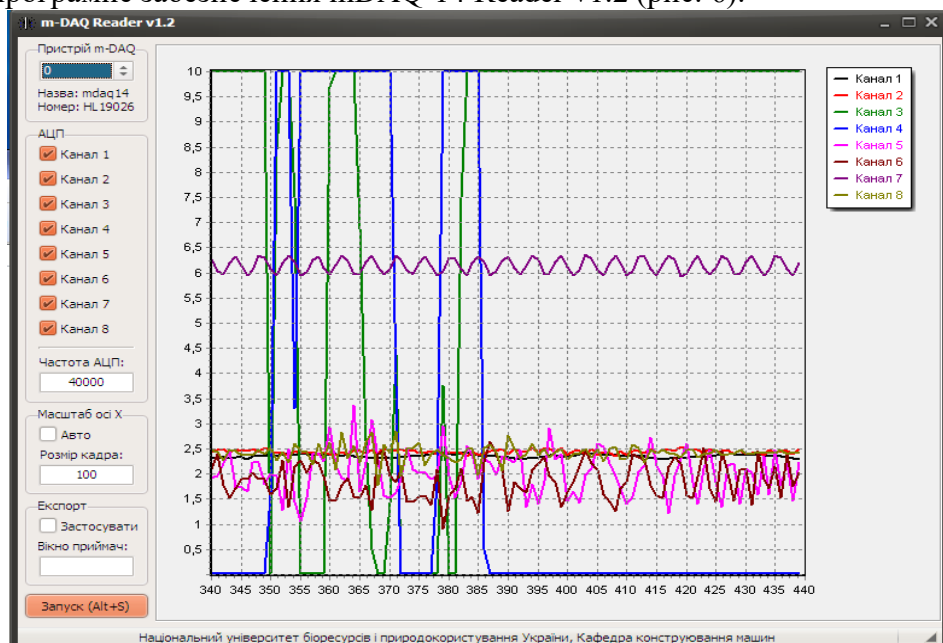


Рисунок 6 – Інтерфейс програмного забезпечення mDAQ-14 Reader v1.2 для керування пристроєм збору даних m-DAQ 14

Отримані сигнали перетворюються у цифровий формат та відправляються до ПК у файловому форматі txt. Саме такий формат даних без проблем можна імпортувати і використовувати у програмі обробки експериментальних даних.

Для того, щоб забезпечити керування рухом механізмів повороту крана та переміщення візка необхідно застосувати два частотні перетворювачі. Зазначимо, що саме такий спосіб (зміна частоти і напруги живлення двигунів за допомогою частотних перетворювачів) є сучасним трендом у розробці системи керування рухом механізмів вантажопідйомних машин.

У експериментальних дослідженнях використано частотні перетворювачі Mitsubishi Electric марок FR-D700 та FR-E700.

Всі дані з датчиків надходили на аналогові канали АЦП, перетворювались у пакети даних та відправлялись до ПК. Там вони зберігались для подальшої обробки та статистичного аналізу.

Для того, щоб дослідити динаміку руху системи при прямому пуску та оптимального керуванні всі експериментальні дослідження розбито на два етапи. На першому етапі вимірювались характеристики процесу при умові подачі напруги на двигуни від мережі живлення (тобто прямий пуск механізмів). Метою даного етапу є визначення впливу на кінематичні та динамічні характеристики параметрів системи (положення візка на стрілі, маса вантажу, довжина гнучкого підвісу вантажу). Для прикладу представимо план першого етапу дослідів (табл. 1).

Таблиця 1. – План експериментів першого етапу 2·2·2·2

Фактор	Рівні варіювання факторів															
Механізм, який починає рух перший	переміщення візка								повороту крана							
Маса вантажу, кг	6				14				6				14			
Початкове положення візка на стрілі відносно осі обертання крана, м	1,9		3,14		1,9		3,14		1,9		3,14		1,9		3,14	
Довжина гнучкого підвісу вантажу, м	1	1,8	1	1,8	1	1,8	1	1,8	1	1,8	1	1,8	1	1,8	1	1,8
Номер експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

На першому етапі обробки масивів експериментальних даних виконувались наступні операції: інтерпретація даних (виконувалась із використанням тарувальних залежностей); фільтрація даних; зменшення об'єму даних (у випадку надлишковості даних); розрахунок похідних за часом.

Інтерпретація даних полягала у використанні тарувальних залежностей для аналогових датчиків. Тарувальні залежності

використовувались для кожного елементу масиву. Це дало змогу перейти від величини напруги до величини вимірюваного фізичного параметра.

Фільтрація даних виконувалась із використанням методу середнього або біжучого середнього. У першому випадку фільтрація полягала у тому, що задавались певною кількістю експериментальних значень (величиною фрейму) і виконували розрахунок середньоарифметичної величини. Її „прив’язували” до моменту часу, який відповідає центру фрейму. На наступній ітерації фрейм переміщували на величину фрейму у оброблюваному масиві даних. Така фільтрація одночасно зменшувала кількість даних, що доцільно було робити для даних з надто великою надлишковістю. У результаті отримували масив фільтрованих даних, який був придатний для швидкої статистичної обробки даних.

Використання методу біжучого середнього практично не змінював вихідний об’єм даних. Він подібний до того, що описаний, з тією лише різницею, що на кожній ітерації фрейм переміщувався на одиницю, а не на власну ширину.

Для того, щоб провести диференціювання дискретних даних за часом була використана методика, що розроблена у роботі [7]. Сутність її полягає у тому, що: 1) обирають ширину фрейму; 2) знаходять регресійну залежність, яка найкраще (у сенсі середньоквадратичної похибки апроксимації) описує дані фрейму; 3) проводять диференціювання отриманої регресійної залежності; 4) визначають величину похідної для певного моменту часу (як правило, для того, що відповідає середині фрейму). Для успішного застосування цієї методики необхідно раціонально задавати величину фрейму, а також порядок апроксимаційного полінома. Перша величина задавалась для різних експериментів у межах 10...20, а друга не перевищувала третьої степені. Це дало змогу отримати досить якісні результати, позбавлені шумів та такі, що відповідають фізиці досліджуваних процесів.

Статистична обробка експериментальних даних полягала в наступному. Для даних, які отримані на першому та другому етапах досліджень було встановлено максимальні та/або середньоквадратичні величини кінематичних та динамічних характеристик. Вони розраховувались за формулами:

$$k_{1.\max} = \max |k_{i.e}|, i \in (\overline{1, N}); \quad (1)$$

$$\tilde{k}_1 = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N k_{i.e}^2}, \quad (2)$$

де $k_{1.\max}$ та $\tilde{k}_1$ – максимальне та середньоквадратичне значення вимірюваного параметра відповідно; $k_{i.e}$ – i -те експериментальне

значення вимірюваного параметра; N – довжина масиву експериментальних даних. Показники $k_{1\max}$ та $\tilde{k}_1$ дають змогу оцінити загальний рівень динамічних навантажень, які будуть виникати у елементах механізмів.

Висновки.

У статті проведено опис розробленої лабораторної моделі баштового крана, яка була використана для проведення експериментальних досліджень сумісного руху механізмів повороту крана та зміни вильоту вантажу. Для вимірювання кутової швидкості повороту крана, швидкості руху візка на стрілі використано енкодера. Для вимірювання прискорення повороту стріли та кутової координати коливань вантажу на гнучкому підвісі використані відповідно акселерометр та інклінометр. Для визначення споживаного приводами механізмів струму використано датчик струму. Всі дані було отримано із використанням пристрою збору даних із 14-тибітним АЦП та максимальною частотою дискретизації 100 кГц.

У статті наведено план експериментів та описано методику попередньої обробки експериментальних даних.

Фактичні результати, які отримані при виконанні експериментальних досліджень, будуть подані у другій частині статті.

Список використаної літератури

1. Шумілов Георгій Володимирович. Оптимізація режиму зміни вильоту і підйому вантажу баштового крана: дис. канд. техн. наук: 05.05.05 / Шумілов Георгій Володимирович. – Київ, 2013. – 153 с.
2. Čápková R., Kozáková A., Minár M. Experimental modelling and control of a tower crane in the frequency domain / Journal of mechanical engineering, 2019, vol 69, No 3, P. 17-26
3. Mabrouk M.H. Design and Implementation of an Experimental Test-rig for Tower Cranes / International Journal of Engineering Research & Technology, 2014, Vol. 3, Issue 10, P. 40-45.
4. Abdullahi A.M., Mohamed Z., Selamat H., Pota H.R., Zainal Abidin M.S., Fasih S.M. Efficient control of a 3D overhead crane with simultaneous payload hoisting and wind disturbance: design, simulation and experiment / Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145, 106893, P. 1-16
5. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов, М.: Наука, 1977. – 440 с.
6. Руководство пользователя V1.4. m-DAQ12, m-DAQ14 микросистема сбора данных с интерфейсом USB / URL: <http://old.holit.ua/download/common/docs/hds/m-DAQ.pdf> (дата звернення 09.08.2020).

7. Ромасевич Юрій Олександрович. Динамічна оптимізація режимів руху механізмів вантажопідйомних машин як мехатронних систем: дис. докт. техн. наук: 05.05.05 / Ромасевич Юрій Олександрович. – Одеса, 2015. – 384 с.

EXPERIMENTAL STUDIES OF SIMULTANEOUS MOVEMENT OF SLEWING AND TROLLEY MOVEMENT MECHANISMS OF TOWER CRANE. PART 1

Loveikin V.S., Romasevych Yu.A., Pilipenko A.P., Mushtyn D.I.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Abstract. The article describes the procedures for conducting experimental studies of the simultaneous movement of the mechanisms of slewing and trolley movement of the tower crane. The design of the laboratory model of the crane is given, the most significant characteristics to be measured are selected, as well as the corresponding measuring and recording equipment (sensors and device m-DAQ 14). The locations of the sensors on the laboratory model of the crane and the software for the m-DAQ 14 device are indicated. This made it possible to record the kinematic and electrical characteristics during the simultaneous movements of the crane slewing and trolley movement mechanisms. Two optical encoders, a current sensor, an accelerometer and two inclinometers were used in the experiments.

In order to establish the patterns of influence of changing factors (load weight, length of flexible suspension, the initial position of the trolley on the boom and the mechanism that first starts moving), planning of experimental studies and a plan of the first series of experiments is given. It includes sixteen experiments.

In addition, the methods of data collection and processing (interpretation using calibration dependences, noise filtering and determination of derivatives using interpolation methods) are described. The procedures for determining the indicators that will be used in the further analysis of the obtained experimental data are briefly described.

Keywords: experimental study, tower crane, planning, laboratory model.