

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ МЕХАНІЗМІВ СТРІЛОВОГО КРАНА

Ю. О. Ромасевич, доктор технічних, професор

В.С. Ловейкін, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net

Анотація. *Наведено огляд програмних продуктів провідних розробників програмного забезпечення для експлуатації вантажопідійомних кранів. Наведено постановку та розв'язання задач оптимального керування рухом механізмів підйому вантажу та повороту стрілового крана в режимах розгону та гальмування. Розрахунки проведені для трьох квадратичних інтегральних критеріїв якості, які відображали рушійні фактори та їхні вищі похідні за часом включно до другої. Отримано закони зміни рушійних елементів (кутові швидкості приводів механізмів), які забезпечують реалізацію оптимального керування. Розроблене програмне забезпечення „Оптимальне керування рухом механізмів стрілового крана”, яке дає змогу із використанням частотно-керованих приводів обох механізмів реалізувати оптимальне керування на практиці. Наведено опис налаштування зв'язку між частотними перетворювачами та комп'ютером із розробленим програмним забезпеченням через послідовний комунікаційний порт. Показано послідовність дій користувача програмного продукту для того, що виконати розрахунок оптимальних законів руху, їхню візуалізацію та передачу на частотні перетворювачі команд керування для виконання завдань оптимального керування рухом механізмами.*

Ключові слова: *вантажопідійомних кран, програмне забезпечення, оптимальне керування, розробка*

Актуальність. *Нині значна кількість кранів експлуатуються в різних галузях народного господарства. Загальною тенденцією до проектування їхніх конструкцій, розробки систем керування та експлуатації є використання комп'ютерно-інтегрованих технологій. Стосовно експлуатації це дає змогу вирішити ряд важливих проблем: підвищити безпеку, знизити рівень енерговитрат, покращити умови роботи оператора крана та підвищити продуктивність роботи тощо.*

Аналіз останніх досліджень та публікацій. *У даному пункті дамо короткий аналіз програмних продуктів для організації та керування рухом вантажопідійомних кранів. Один із популярних продуктів TMEIC Crane Management System (CMS) [1],*

розроблений компанією TMEIC (Японія). CMS – це простий у використанні людино-машинний інтерфейс, що забезпечує оператору повний огляд крана. Екрани НМІ відображають детальну інформацію про механічне та електричне обладнання крана з даними в режимі реального часу та тенденціями їх зміни. Ще одна подібна система Kuenz CMS (Crane Management System) [2] розробника Kuenz (Австрія) дає доступ до інформації щодо роботи крана завдяки сучасному графічному інтерфейсу користувача. Стандартизований дизайн панелі керування забезпечує легке керування кранами. Система SIMOCRANE Crane Management System – це PC-базований SCADA-інструмент для візуалізації та керування кранами [3]. Він призначений для операторів, технічного персоналу та менеджерів, щоб збирати, обробляти та відображати важливу інформацію у потрібний момент. Один із просунутих та дуже потужних інструментів для планування руху кранів розроблений компанією Liebherr. Liebherr Crane Planner 2.0 – це професійне програмне забезпечення для планування роботи кранів, яке має декілька ключових функцій [4]. Багатофункціональним є програмне забезпечення CRANEbee®, яке позиціонується як 3D-планувальник, який дозволяє вставити крани у віртуальне середовище будівельного майданчика [5]. В основі інструменту – реалістичні інтерактивні 3D-моделі кранів. Система EXPERTOPERATOR™ від PAR Systems [6] – це програмно-апаратне рішення для безсенсорного керування кранами, яке зводить до мінімуму коливання вантажу для підвищення продуктивності та безпеки. Вона вбудовується між пультом оператора та приводами крана. Система автоматично коригує команди керування оператора, так що навіть оператори з мінімальним досвідом керують рухом вантажу досить професійно. viAct Crane Safety Software [7] – комплексне рішення для автоматичного розпізнавання небезпечних ситуацій при виконанні навантажувально-розвантажувальних операцій, із застосуванням відео- й IoT-аналітикою для забезпечення безпеки, оптимізації ефективності та створення простору, де робота кранів виконується. Хмарна платформа CraneTime [8] від Voyage Control призначена для планування, керування та аналізу роботи баштових кранів на будівельних майданчиках. RMT Solutions використали CAD/3D-моделі кранів та перешкод для розробки програмного

забезпечення KranXpert для створення віртуальних макетів підйомів мобільних і баштових кранів, де виявляються потенційні зіткнення, перевантаження чи нестабільність ще до початку робіт [9].

Мета дослідження – розроблення програмного забезпечення для керуванням рухом механізмами підйому вантажу та повороту стрілового крана. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань: 1) розв’язання задач оптимального керування рухом механізмів підйому вантажу та повороту крана; 2) розробка програмного забезпечення для реалізації отриманих керувань.

Матеріали та методи дослідження. У даному пункті опишемо теоретичні результати, які були покладені у основу розробки програмного забезпечення для керування рухом механізмів підйому вантажу та повороту стрілового крана. Оскільки методика отримання цих результатів є однаковою, то дамо опис вирішення задачі оптимізації режиму руху механізму підйому вантажу лише за одним критерієм режиму розгону механізму підйому вантажу. Динамічна модель механізму представлена на рис. 1.

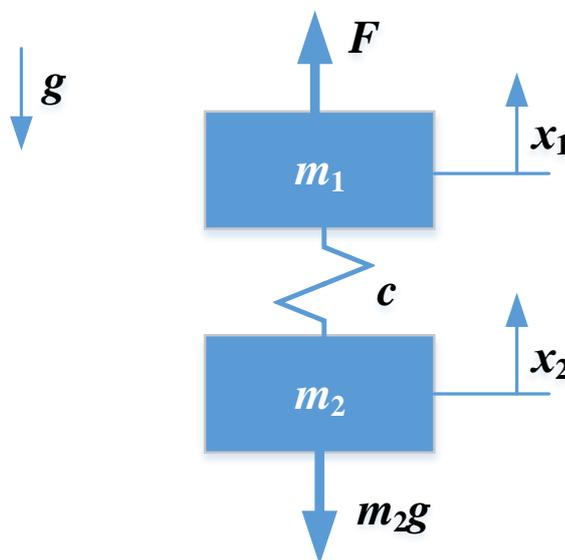


Рис. 1 Динамічна модель механізму підйому вантажу

Відповідна їй математична модель описується системою диференціальних рівнянь [10]:

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + m_2\ddot{x}_2 = F - m_2g = F_{дин}; \\ x_1 = x_2 + \frac{m_2}{c}(\ddot{x}_2 + g), \end{cases} \quad (1)$$

де x_1 та x_2 – узагальнені координати канатного барабану та вантажу відповідно; m_1 та m_2 – зведена маса канатного барабану, елементів трансмісії, двигуна механізму підйому вантажу та вантажу відповідно; g – пришвидшення вільного падіння; c – зведена жорсткість канатно-поліспавної системи механізму підйому вантажу; F – зведене рушійне зусилля приводу; $F_{дин}$ – динамічна складова зведеного рушійного зусилля приводу. Тут і далі точка над символом означає диференціювання за часом.

Задача полягає у тому, що отримати закон руху (швидкість руху ведучої маси m_1) яка б забезпечувала мінімум інтегральному функціоналу:

$$\int_0^{T_p} F_{дин}^2 dt, \quad (2)$$

де T_p – тривалість розгону механізму. Мінімум критерію (2) забезпечує умова – рівняння Ейлера-Пуассона [11]:

$$x_2^{VIII} + 2\Omega^2 x_2^{VI} + \Omega^4 x_2^{IV} = 0, \quad (3)$$

де Ω – частота власних коливань вантажу ($\Omega = \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}}$).

Будемо шукати розв'язок рівняння (3) при крайових умовах, які відповідають режиму розгону механізму:

$$\begin{cases} x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0, \ddot{x}(0) = 0, \ddot{\ddot{x}}(0) = 0; \\ x(T_p) = \frac{vT_p}{2}, \dot{x}(T_p) = v, \ddot{x}(T_p) = 0, \ddot{\ddot{x}}(T_p) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де v – усталена швидкість руху зведених мас механізму.

Опускаючи проміжні результати можемо представити розв'язок рівняння (4) – екстремаль функціонала (2):

$$\begin{aligned} x_2 = & v(-2\Omega T_p + \Omega t(-4 + \Omega^2 t T_p) + 2\Omega(-t + T_p)\cos(\Omega t) + 6\sin(\Omega t) - \\ & - 6\sin(\Omega(t - T_p)) - 6\sin(\Omega T_p) + \Omega t(2\cos(\Omega(t - T_p)) + 4\cos(\Omega T_p) + \\ & + \Omega t \sin(\Omega T_p))) (2\Omega(-4 + \Omega^2 + 4\cos(\Omega T_p) + \Omega T_p \sin(\Omega T_p)))^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Враховуючи друге рівняння системи (1), можемо отримати бажаний результат – закон зміни швидкості ведучої маси m_1 :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & v(c(-2 + \Omega^2 t T_p) + 2c \cos(\Omega t) - 2c \cos(\Omega(t - T_p)) + 2c \cos(\Omega T_p) + c \Omega t \sin(\Omega t) - \\ & - \Omega^{-3} m_2 t \sin(\Omega t) - c \Omega T_p \sin(\Omega t) + \Omega^{-3} m_2 T_p \sin(\Omega t) + \Omega(-c + \Omega^2 m_2) t \sin(\Omega(t - \\ & - T_p)) + c \Omega t \sin(\Omega T_p)) / (c(-4 + \Omega^2 T_p^2 + 4 \cos(\Omega T_p) + \Omega T_p \sin(\Omega T_p)))^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Крім того, були отримані результати щодо оптимальних за іншими критеріями законів руху. Ці критерії представляють середньоквадратичні значення швидкості та пришвидшення динамічної складової рушійного зусилля приводу механізму:

$$\int_0^{T_p} \dot{F}_{\text{дин}}^2 dt, \quad (7)$$

$$\int_0^{T_p} \ddot{F}_{\text{дин}}^2 dt. \quad (8)$$

Необхідно відмітити, що для наведених критеріїв (7) та (8) умови мінімуму представляються диференціальними рівняннями десятого та дванадцятого порядків відповідно.

Крім того, для цих же критеріїв (2), (7), (8) були розв'язані задачі щодо режиму гальмування. Для цих задач верхня та нижня межі інтегрування змінюються таким чином:

$$0 \rightarrow T_p + \Delta, \quad T_p \rightarrow T_p + \Delta + T_z \quad (9)$$

де Δ – тривалість руху механізму на усталеній швидкості; T_z – тривалість гальмування механізму.

Умови мінімуму критеріїв оптимізації режимів гальмування залишаються такими ж. Змін зазнають крайові умови. Наприклад, для режиму оптимального за критерієм (2) гальмування механізму підйому вантажу крайові умови записуються так:

$$\begin{cases} x(T_p + \Delta) = \frac{v T_p}{2} + v \Delta, \quad \dot{x}(T_p + \Delta) = v, \quad \ddot{x}(T_p + \Delta) = 0, \quad \ddot{\ddot{x}}(T_p + \Delta) = 0; \\ x(T_p + \Delta + T_z) = \frac{v T_p}{2} + v \Delta + \frac{v T_z}{2}, \quad \dot{x}(T_p + \Delta + T_z) = 0, \quad \ddot{x}(T_p + \Delta + T_z) = 0, \quad \ddot{\ddot{x}}(T_p + \Delta + T_z) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Формульні залежності, які описують оптимальні закони руху механізму за різними критеріями та у різних режимах не будемо тут наводити через їхній значний об'єм.

Аналогічні розрахунки були проведені для механізму повороту стрілового крана. Його математична модель, що використана у розрахунках, наведена нижче [12]:

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi}_1 + mr \frac{g}{l} (\varphi_1 - \varphi_2) = M - M_o \text{sign}(\dot{\varphi}_1) = M_{\text{дин}}; \\ \varphi_1 = \varphi_2 + \frac{l}{r} \ddot{\varphi}_2, \end{cases} \quad (11)$$

φ_1 та φ_2 – узагальнені координати платформи та стріли крана та вантажу відповідно; m – зведена маса вантажу; J – зведений момент інерції платформи та стріли крана; r – виліт вантажу; M – зведений рушійний момент привода; M_o – зведений момент опору повороту крана; $M_{\text{дин}}$ – динамічна складова зведеного рушійного моменту привода. Із використанням цієї моделі поставлені оптимізаційні задачі, які включали наступні критерії:

$$\int_0^{T_p} M_{\text{дин}}^2 dt, \quad (12)$$

$$\int_0^{T_p} \dot{M}_{\text{дин}}^2 dt, \quad (13)$$

$$\int_0^{T_p} \ddot{M}_{\text{дин}}^2 dt. \quad (14)$$

Критерії (12)-(14) використані для обох режимів руху механізму повороту крана – розгону та гальмування (як і для механізму підйому вантажу нижня і верхня межі інтегрування функціоналів (12)-(14) необхідно заміни на такі: $0 \rightarrow T_p + \Delta$, $T_p \rightarrow T_p + \Delta + T_c$).

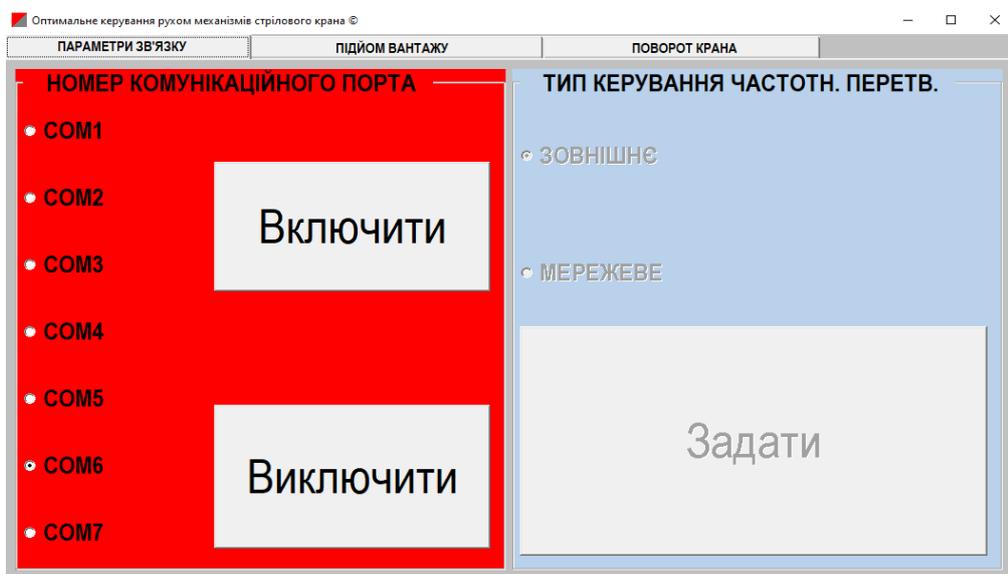
Таким чином, отримані закони руху (швидкість руху приводних елементів механізмів стрілового крана) у подальшому використані для розробки програмного забезпечення для керування частотними перетворювачами приводних двигунів механізмів підйому вантажу та повороту крана.

Результати досліджень та їх обговорення.

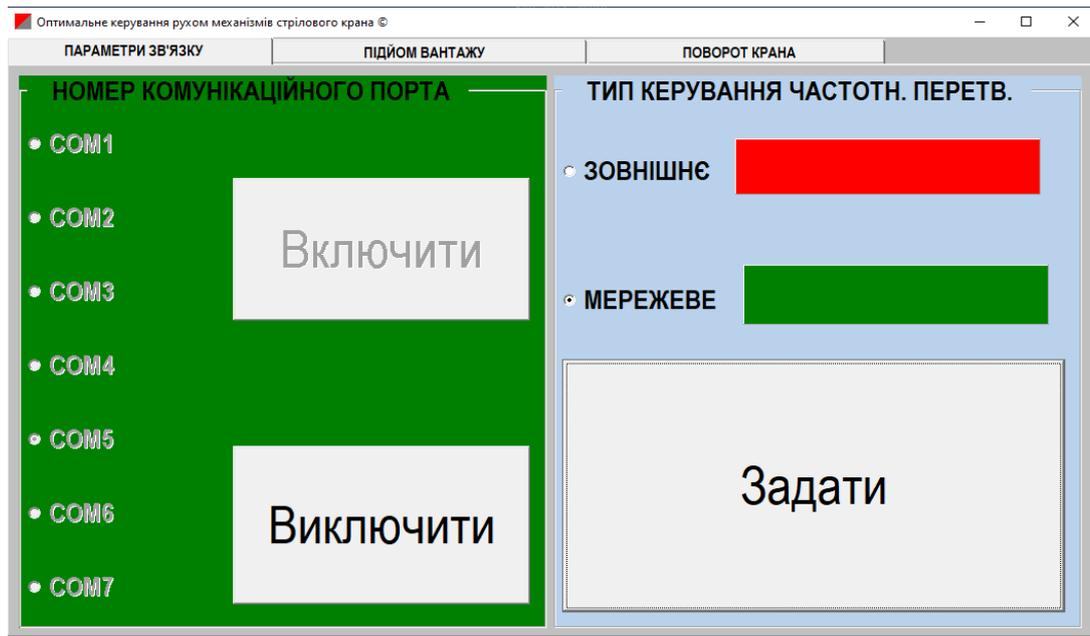
У даному пункті опишемо ряд функціональних можливостей розробленого програмного забезпечення „Оптимальне керування рухом механізмів стрілового крана”. Воно було розроблене для реалізації оптимальних режимів руху механізмів підйому вантажу та повороту стрілового крана. Функціонально програма складається із двох модулів: основного та функціонального. В основному виконуються всі дії щодо розрахунку оптимальних законів руху для організації та зв'язку між частотним перетворювачем та комп'ютером (наприклад, відправка керуючих команд від комп'ютера до частотного перетворювача). Інтерфейс програми представляється трьома вкладками: ПАРАМЕТРИ ЗВ'ЯЗКУ, ПІДЙОМ ВАНТАЖУ, ПОВОРОТ КРАНА. Дано послідовний опис кожної вкладки.

У вкладці ПАРАМЕТРИ ЗВ'ЯЗКУ (рис. 2) користувач вибирає комунікаційний СОМ-порт та натискає на кнопку „Включити”. При цьому відповідний комунікаційний порт відкривається для передачі інформаційних керуючих пакетів даних [13] (команд від комп'ютера до частотного перетворювача) і поле комунікаційних портів загорається зеленим кольором (рис. 2).

Надалі в правій частині вкладки користувач обирає тип керування (ЗОВНІШНЄ або МЕРЕЖЕВЕ) і натискає кнопку „Задати”. Це переводить частотний перетворювач у режим зчитування команд від порта RS-485, тобто команд, які надходять від комп'ютера.



a



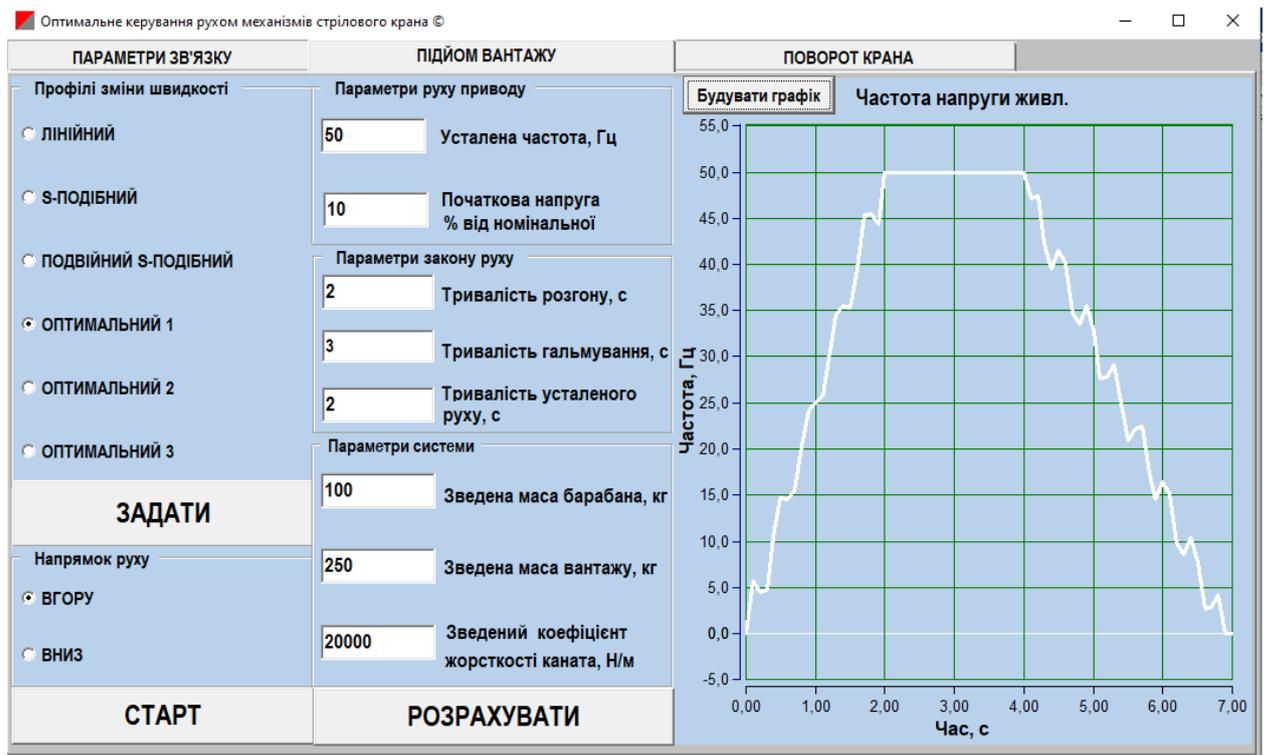
б

Рис. 2 Вкладка „ПАРАМЕТРИ ЗВ’ЯЗКУ” розробленого програмного забезпечення:

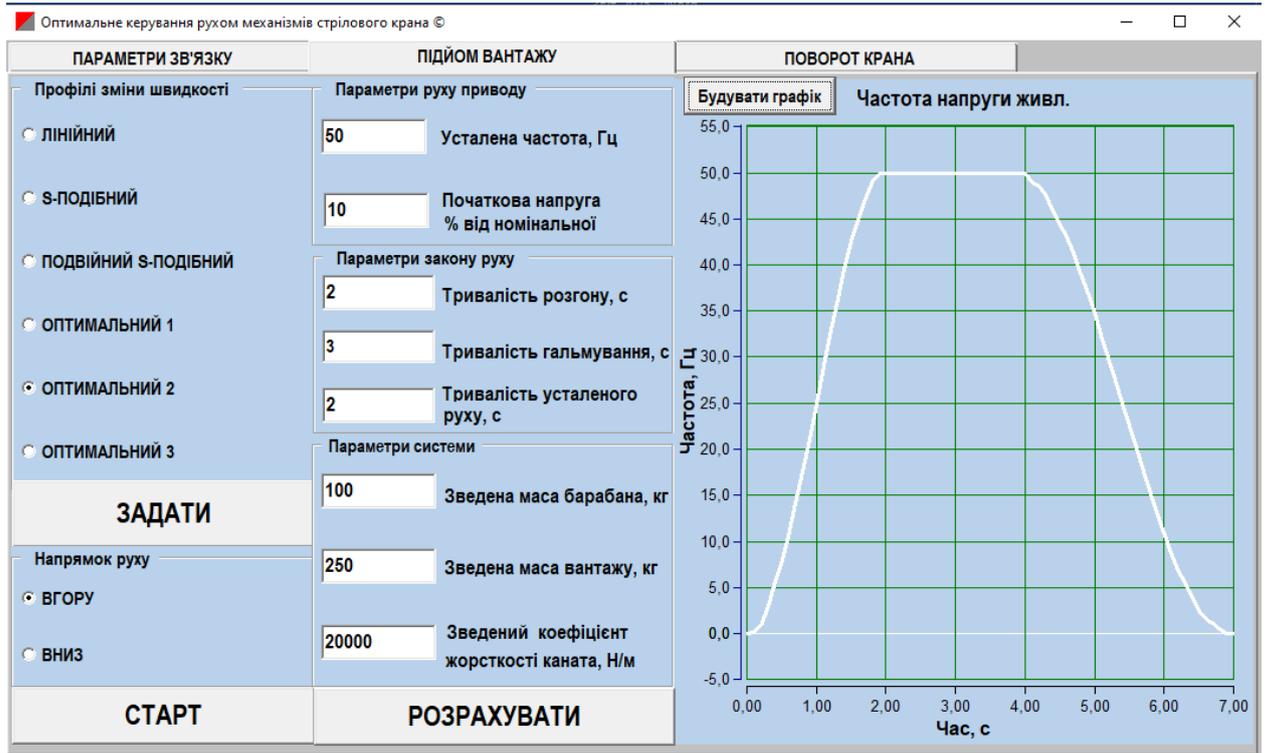
а – при закритому СОМ-порті; *б* – при відкритому СОМ-порті та заданому мережевому керуванню частотним перетворювачем

У вкладці ПІДЙОМ ВАНТАЖУ (рис. 3) користувач задає профілі зміни швидкості при розгоні та гальмуванні двигуна механізму. Строго кажучи, вони відповідають відповідним профілям зміни частоти напруги живлення асинхронного двигуна – від нуля до усталеного значення. Це поле містить шість опцій: три відповідають стандартним законам зміни швидкості, а три – оптимальним, які були отримані у ході розв’язання оптимізаційних задач (профіль ОПТИМАЛЬНИЙ 1 забезпечує мінімум критерію (2), ОПТИМАЛЬНИЙ 2 – критерію (6), ОПТИМАЛЬНИЙ 3 – критерію (7)). Після того, як обрано профіль зміни швидкості користувач натискає кнопку ЗАДАТИ та переходить до поля „Параметри руху приводу”. На ній він у відповідні комірки задає усталену частоту та початкове значення напруги живлення приводу у відсотках від номінальної (можна задавати цю величину в діапазоні від 0 до 30 %). У полі „Параметри закону руху” користувач задає тривалості розгону, гальмування та усталеного руху приводу. Після цього він переходить до поля „Параметри системи”, де задає зведену масу барабана, зведену

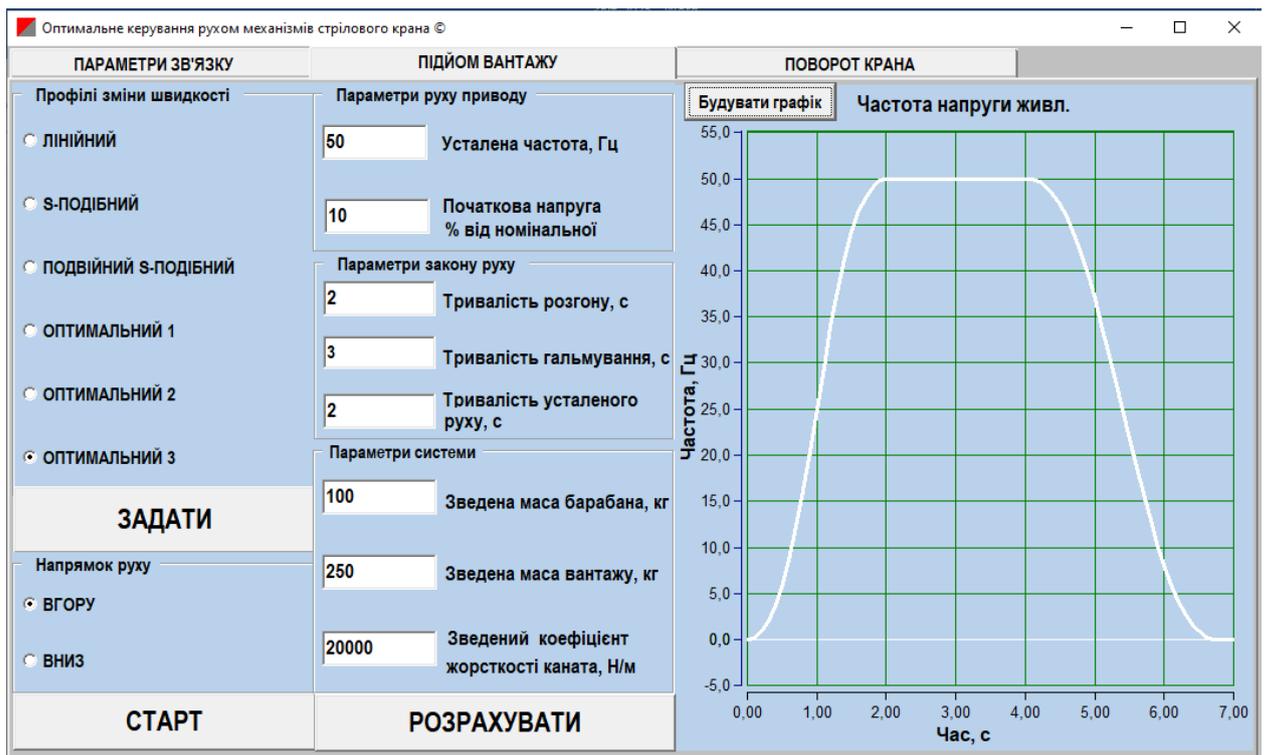
масу вантажу та зведений коефіцієнт жорсткості каната. Цих параметрів достатньо для того, щоб виконати розрахунки відповідних профілів швидкості. Це виконується шляхом натискання кнопки РОЗРАХУВАТИ. При цьому програма формує дискретні закони зміни частоти напруги живлення приводу для всього циклу „розгін – усталений рух – гальмування”. Для візуалізації отриманих результатів у розробленому програмному забезпеченні існує можливість побудови графіків зміни частоти протягом всього циклу руху механізму. Для того, щоб отримати графік, користувач повинен натиснути кнопку „Будувати графік”. У правому поля вкладки буде побудовано графік. Як видно з рис. 2 для різних тривалостей розгону та гальмування можна отримати різні закони зміни частоти. Крім того, різні оптимальні закони руху мають різний характер впливу на плавність зміни частоти (рис. 3).



a



б

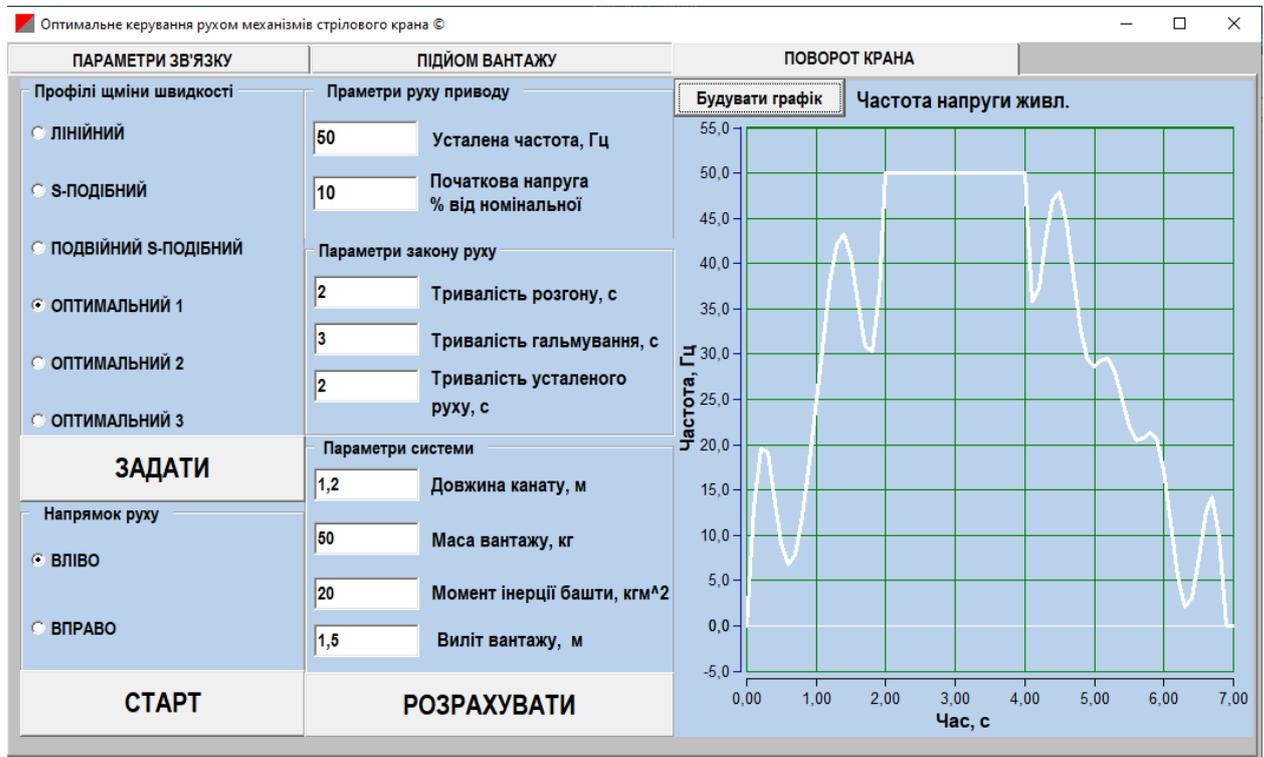


в

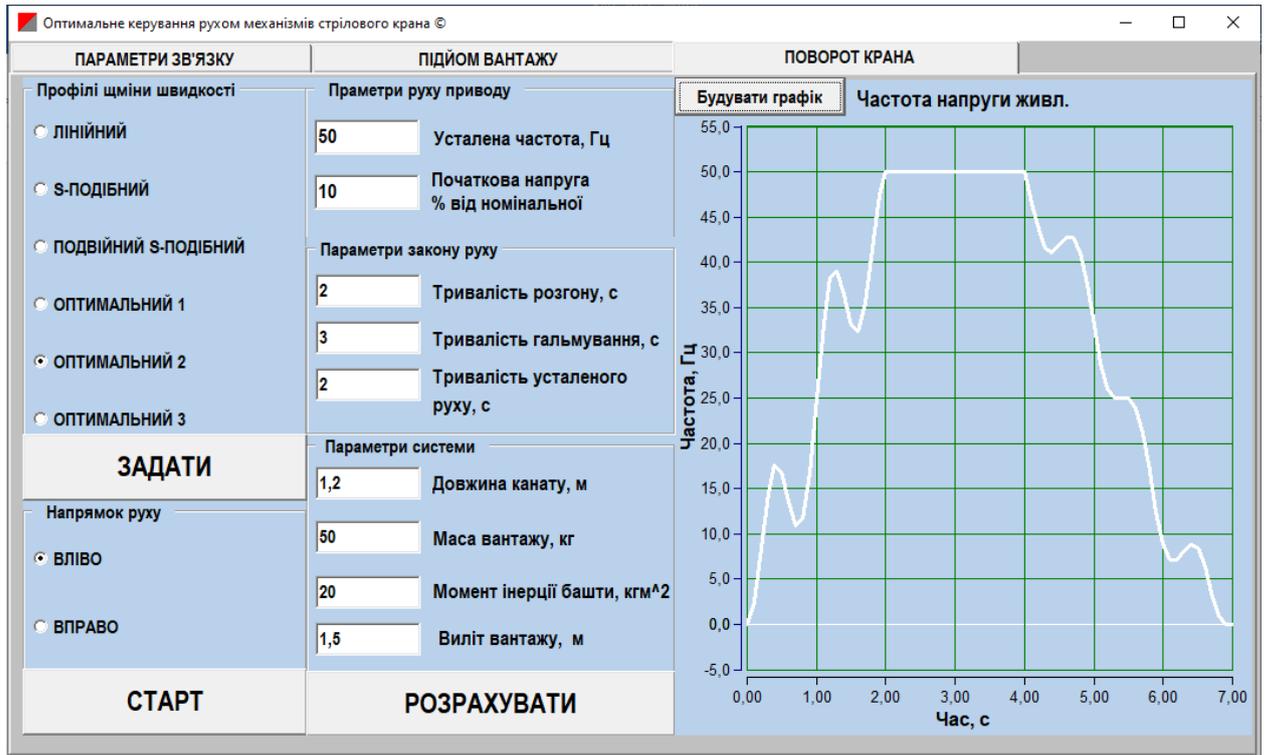
Рис. 3 Вкладка „ПІДЙОМ ВАНТАЖУ” розробленого програмного забезпечення при заданому оптимальному законі керування рухом механізму: а – ОПТИМАЛЬНИЙ 1 ; б – ОПТИМАЛЬНИЙ 2; в – ОПТИМАЛЬНИЙ 3

Для того, щоб виконати керування рухом, користувач обирає напрямок руху вантажу (ВГОРУ або ВНИЗ) у полі „Напрямок руху” та натискає кнопку СТАРТ. При цьому з комп’ютера на частотний перетворювач будуть послідовно відправлені команди щодо задання частоти напруги живлення двигуна. Двигун змінює швидкість у відповідності зі зміною частоти, і механізм розганяється зі стану спокою до усталеної швидкості, рухається на усталеній швидкості та гальмує до зупинки. Кожен із цих етапів тривають задану користувачем кількість часу.

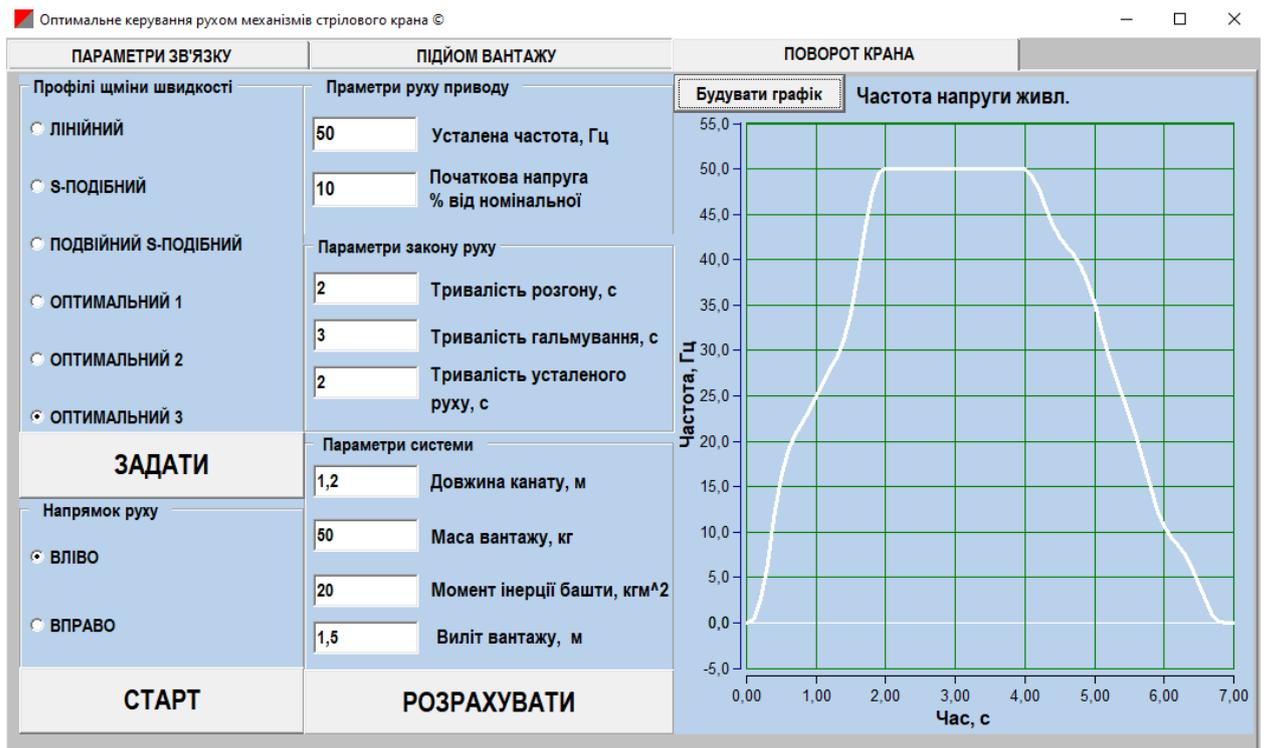
У вкладці ПОВОРОТ КРАНА (рис. 4) послідовність операцій користувача така сама, тому не будемо детально зупинятись на їх описі. Зазначимо лише те, що для розрахунку оптимальних законів руху користувач у полі „Параметри системи” має задати величину вильоту вантажу.



a



б



в

Рис. 3 Вкладка „ПОВОРОТ КРАНА” розробленого програмного забезпечення при заданому оптимальному законі керування рухом механізму: а – ОПТИМАЛЬНИЙ 1; б – ОПТИМАЛЬНИЙ 2; в – ОПТИМАЛЬНИЙ 3

Відмітимо те, що при зміні оптимального закону руху для механізму повороту крана характер зміни частоти протягом розгону та гальмування має суттєвіші зміни, порівнюючи із механізмом підйому вантажу. Це пояснюється тим, що величина частоти власних (маятникових) коливань є значно меншою в механізмі повороту крана (рис. 4).

Висновки і перспективи. Для реалізації оптимального керування рухом механізмів підйому вантажу та повороту стрілового крана було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення. Воно дозволяє забезпечити передачу керуючих сигналів від комп'ютера до частотного перетворювача, який є джерелом живлення асинхронного двигуна приводу відповідного механізму. Сигнали керування відповідають оптимальним законам руху механізмів, отриманим у результаті розв'язання варіаційних задач. У них функціоналами якості керування виступали визначені інтеграли квадратів рушійних факторів механізмів, їх першої та другої похідних за часом. Розв'язки цих задач наведені у цьому дослідженні.

Список використаних джерел

1. Crane Management System (CMS). URL: <https://tmeic.com/products/crane-management-system-cms> (дата звернення 15.07.2025)
2. EXPERIENCE IS OUR SUCCESS. URL: <https://www.kuenz.com/service> (дата звернення 15.07.2025)
3. SIMOCRANE Crane Management System (CMS). URL: <https://xcelerator.siemens.com/global/en/industries/cranes/industry-cranes/simocrane-crane-management-system-cms.html> (дата звернення 15.07.2025)
4. Liebherr Group. URL: https://www.liebherr.com/en-ca/group/magazine/crane-planner/crane-planner-3721287?utm_source (дата звернення 15.07.2025)
5. CRANEbee®. URL: <https://www.manitowoc.com/support/cranimax-craneebee> (дата звернення 15.07.2025)
6. Maximize Safety and Operating Efficiency with PAR Anti-Sway Crane Systems. URL: <https://www.par.com/crane-anti-sway-control-system/> (дата звернення 15.07.2025)
7. Crane Safety Software. URL: https://www.viaact.ai/solutions/crane-safety-software?utm_source (дата звернення 15.07.2025)
8. Streamline Crane Operations & Improve Utilization. URL: https://voyagecontrol.com/cranetime?utm_source (дата звернення 15.07.2025)
9. Lift Planning Software. URL: https://rmtsafety.com/2024/01/11/lift-planning-software/?utm_source (дата звернення 15.07.2025)
10. Ловеїкін В.С., Ромасевич Ю.О. (2013) Динаміка машин. К.: ЦП „КОМПРИНТ” 227 с.

11. Kot M. (2014) A First Course in the Calculus of Variations. American Mathematical Society. *American Mathematical Society Providence, Rhode Island*. 311 p.

12. Romasevych Yu., Hubar Ya. Synthesis of the optimal acceleration mode of the tower crane slewing mechanism. *Machinery & Energetics*, 2025, 16(2), 9-19.

13. Послідовний порт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D0%BB%D1%96%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82 (дата звернення 15.07.2025)

References

1. Crane Management System (CMS). URL: <https://tmeic.com/products/crane-management-system-cms> (access date 15.07.2025)

2. EXPERIENCE IS OUR SUCCESS. URL: <https://www.kuenz.com/service> (access date 15.07.2025)

3. SIMOCRANE Crane Management System (CMS). URL: <https://xcelerator.siemens.com/global/en/industries/cranes/industry-cranes/simocrane-crane-management-system-cms.html> (access date 15.07.2025)

4. Liebherr Group. URL: https://www.liebherr.com/en-ca/group/magazine/crane-planner/crane-planner-3721287?utm_source (access date 15.07.2025)

5. CRANEbee®. URL: <https://www.manitowoc.com/support/cranimax-cranebee> (access date 15.07.2025)

6. Maximize Safety and Operating Efficiency with PAR Anti-Sway Crane Systems URL: <https://www.par.com/crane-anti-sway-control-system/> (access date 15.07.2025)

7. Crane Safety Software. URL: https://www.viact.ai/solutions/crane-safety-software?utm_source (access date 15.07.2025)

8. Streamline Crane Operations & Improve Utilization. URL: https://voyagecontrol.com/cranetime?utm_source (access date 15.07.2025)

9. Lift Planning Software. URL: https://rmtsafety.com/2024/01/11/lift-planning-software/?utm_source (access date 15.07.2025)

10. Loveikin, V., Romasevych, Yu. (2013). Machines dynamics. K.: TS „KOMPRINT” 227 p.

11. Kot, M. (2014) A First Course in the Calculus of Variations. American Mathematical Society. *American Mathematical Society Providence, Rhode Island*. 311 p.

12. Romasevych, Yu., Hubar, Ya. (2025). Synthesis of the optimal acceleration mode of the tower crane slewing mechanism. *Machinery & Energetics*, 16(2), 9-19.

13. Serial port. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D0%BB%D1%96%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82 (access date 15.07.2025)

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CONTROLLING THE MOVEMENT OF JIB CRANE MECHANISMS

Y. Romasevych, V. Loveikin

Abstract. *The article provides an overview of software products from leading developers of software for the operation of cranes. The statement and solution of the problems of optimal control of the movement of the mechanisms of load hoisting and slewing the jib crane in the acceleration and braking modes are presented. Calculations were carried out for three quadratic integral quality criteria, which reflected the driving factors and their higher derivatives in time up to the second inclusive. The laws of change of the driving elements (angular velocities of the drives of the mechanisms) were obtained, which ensure the implementation of optimal control. The software "Optimal control of the movement of jib crane mechanisms" was developed, which allows using frequency-controlled drives of both mechanisms to implement optimal control in practice. A description of the communication settings between frequency converters and a computer with the developed software via a serial communication port is presented. The sequence of actions of the user of the software product is shown in order to calculate the optimal laws of motion, their visualization and transmission of control commands to frequency converters to perform tasks of optimal control of the movement of mechanisms.*

Key words: *hoisting crane, software, optimal control, development*