



Міністерство науки і освіти України
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять за кредитним модулем
«Динаміка підйомно-транспортних машин» Частина 1:
застосування програмного забезпечення для багатопарамет-
ричного аналізу перехідних процесів при пересуванні ванта-
жопідіймальних кранів (для студентів, які навчаються
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», спеціалізація
«Автоматизовані логістичні системи»)

Київ - 2023

Міністерство науки і освіти України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять за кредитним модулем
«Динаміка підйомно-транспортних машин» Частина 1:
застосування програмного забезпечення для багатопарамет-
ричного аналізу перехідних процесів при пересуванні ванта-
жопідіймальних кранів (для студентів, які навчаються
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», спеціалізація
«Автоматизовані логістичні системи»)

Рекомендовано кафедрою
прикладної механіки
(Протокол від «20» 01 2023 р. №7)

Київ - 2023

УДК 621.86/87

Методичні вказівки до практичних занять за кредитним модулем «Динаміка підйомно-транспортних машин» Частина 1: застосування програмного забезпечення для багатопараметричного аналізу перехідних процесів при пересуванні вантажопідіймальних кранів (для студентів, які навчаються за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», спеціалізація «Інженерія логістичних систем») / Уклад.: О.Б. Неженцев, С.М. Аветісян. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 23 с.

Укладачі: Неженцев Олексій Борисович, к.т.н., доц.
Аветісян Сергій Манукович, ст. виклад.

Відповідальний редактор О.Ф. Луговський, д.т.н., проф.

Рецензент В.П. Лукавенко, к.т.н., доц.

1 Загальні відомості

Мета: допомогти студентам у формуванні здатностей:

- використовувати математичні моделі вантажопідіймальних кранів для аналізу навантаженості елементів приводу та металоконструкції в перехідних режимах роботи;
- визначати динамічні зусилля в механізмах і металоконструкціях вантажопідіймальних кранів в русійних і гальмівних процесах;
- проводити дослідження перехідних процесів при пересуванні вантажопідіймальних кранів для встановлення закономірностей виникнення динамічних навантажень;
- визначати методи та засоби зниження динамічних навантажень елементів кранів.

Завдання: допомогти студентам закріпити

знання:

- диференціальних рівнянь руху вантажопідіймальних кранів, представлених багатомасовими моделями (розрахунковими схемами);
- рівнянь, що описують механічні характеристики електричних приводів вантажопідіймальних кранів в русійних і гальмівних процесах;
- особливостей режимів пуску та гальмування вантажопідіймальних машин;

уміння:

- обчислити параметри динамічної моделі вантажопідіймального крану;
- розрахувати параметри характеристик кранового електроприводу;
- придбати навички студентами в роботі з програмним забезпеченням «Комп'ютеризована система багатопараметричного аналізу перехідних режимів при пересуванні вантажопідіймальних кранів»;
- проаналізувати результати моделювання динамічних процесів в електромеханічній системі вантажопідіймальної машини;
- сформулювати висновки і рекомендації щодо зниження динамічних навантажень елементів кранів;

Перехідні процеси мають вирішальний вплив на навантаження елементів приводу та металоконструкції кранів, час вантажно-розвантажувальних робіт і в цілому - на техніко-економічні показники вантажопідіймальних машин. Тому дослідження перехідних режимів кранів з метою встановлення закономірностей виникнення динамічних навантажень і пошуку шляхів для поліпшення їх техніко-експлуатаційних характеристик є актуальними.

Для проведення зазначених досліджень застосовують різні математичні моделі вантажопідіймальних машин [1 – 6, 9 і ін.]. Однак рішення завдань динаміки кранів, з урахуванням всіх основних факторів, що впливають на перехідні процеси, аналітичними методами не представляється можливим, а застосування чисельних методів часто обмежено відсутністю спеціалізованих пакетів прикладних програм, які можна було б використовувати в якості інструменту, як при проведенні аналізу, так і при оптимізації досліджуваних перехідних процесів.

2 Математичні моделі мостових кранів при їх пересуванні

Для дослідження динамічних навантажень вантажопідіймальних кранів необхідно застосовувати математичні моделі крана, що найбільш повно описують пуско-гальмівні процеси електромеханічної системи «привод – металоконструкція – вантаж». Представлене в даних методичних вказівках програмне забезпечення в залежності від мети дослідження дозволяє представити кран у вигляді різних динамічних моделей, для кожної з яких можуть бути реалізовані принципово різні способи розгону і гальмування. Оскільки в рамках методичних вказівок не представляється можливим дати опис всіх реалізованих, в програмному продукті, математичних моделей і перехідних процесів, то в якості прикладу зупинимося тільки на тримасовій та частково на чотиримасовій моделях крана, а з безлічі перехідних процесів - лише на процесі розгону крана за ступеневою механічною характеристикою і на його гальмуванні в режимах противмикання і динамічного гальмування.

Двомасова модель нами не розглядалася, оскільки в дослідженнях С.А. Казака [1], М.О. Лобова [2], Л.Я. Будікова [5], В.С. Ловейкіна і Ю.О. Ромасевича [9], О.Б. Неженцева [4, 8, 11, 12] доведена необхідність урахування власних коливань мосту крана при визначенні горизонтальних динамічних навантажень металоконструкції, які взаємопов'язані також з енергоспоживанням крана. Проведені проф. С.А. Козаком розрахунки горизонтальних динамічних навантажень моста крана за двохмасовою розрахунковою схемою (при постійній рушійній силі приводу) [1] показали, що в порівнянні з чотиримасовою моделлю похибка становить 20%. При врахуванні механічних характеристик електроприводу вона може бути набагато більше [10].

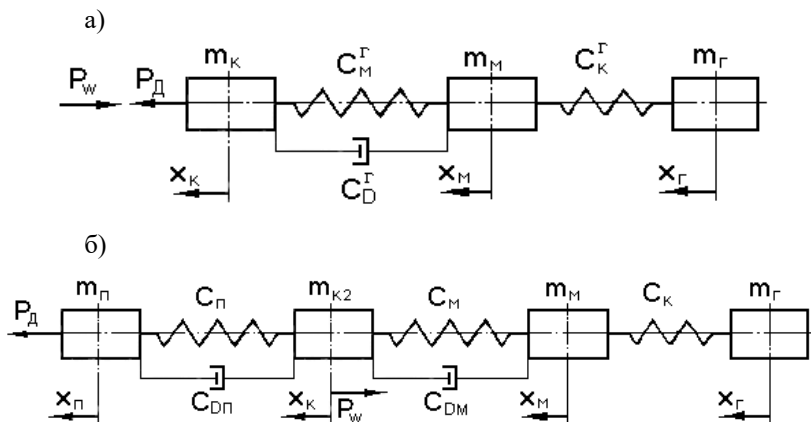


Рисунок 1 – Динамічні моделі мостового крана:
а) – тримасова, б) - чотиримасова

Перехідні процеси при пересуванні мостового крана, представленого тримасовою і чотиримасовою динамічними моделями, описуються наступними системами диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} m_K \cdot \ddot{x}_K + C_D \cdot (\dot{x}_K - \dot{x}_M) + C_M \cdot (x_K - x_M) + P_W \cdot \text{sign}(\dot{x}_K) = P_D; \\ m_M \cdot \ddot{x}_M + C_K \cdot (x_M - x_G) - C_D \cdot (\dot{x}_K - \dot{x}_M) - C_M \cdot (x_K - x_M) = 0; \\ m_G \cdot \ddot{x}_G - C_K \cdot (x_M - x_G) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_П \cdot \ddot{x}_П + C_{D1} \cdot (\dot{x}_П - \dot{x}_K) + C_П \cdot (x_П - x_K) = P_D; \\ m_{K2} \cdot \ddot{x}_K + C_D \cdot (\dot{x}_K - \dot{x}_M) + C_M \cdot (x_K - x_M) - C_{D1} \cdot (\dot{x}_П - \dot{x}_K) - \\ \quad - C_П \cdot (x_П - x_K) + P_W \cdot \text{sign}(\dot{x}_K) = 0; \\ m_M \cdot \ddot{x}_M + C_K \cdot (x_M - x_G) - C_D \cdot (\dot{x}_K - \dot{x}_M) - C_M \cdot (x_K - x_M) = 0; \\ m_G \cdot \ddot{x}_G - C_K \cdot (x_M - x_G) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де $m_П$ - зведена до ходових коліс маса обертових частин приводу пересування крана; m_{K2} - маса моста крана, що зведена до переміщення кінцевих балок; $m_K = m_П + m_{K2}$; m_M - зведена до середини прольоту маса середніх частин моста і порожнього візка; m_G - маса вантажу; $C_П$ - зведений до ходових коліс коефіцієнт жорсткості приводу механізму пересування; C_M - коефіцієнт жорсткості металлоконструкції крана в горизонтальній площині; $C_K = m_G \cdot g / \ell$ - умовний коефіцієнт жорсткості вантажних канатів в горизонтальній площині (горизонтальна складова натягу ванта-

жних канатів при $x_m - x_r = \ell$); ℓ - довжина підвісу вантажу; C_{D1} - коефіцієнт загасання коливань приводу пересування крана; C_D - коефіцієнт загасання коливань металоконструкції крана в горизонтальній площині; x_n, x_k, x_m, x_r - шляхи, що проходять відповідні маси від початку координат; P_d - зведена до ходових коліс сила приводу, яка визначається, в залежності від режиму роботи електродвигуна (наприклад, при традиційному для експлуатації кранів релейно-контакторному управлінні асинхронним двигуном шляхом зміни опорів резисторів в ланцюзі ротора: рухомий - $P_{двиг}$, гальмування противмиканням - $P_{пр}$, динамічне гальмування - $P_{дин}$) за формулами [4, 5, 6]:

$$P_{двиг} = \frac{K_j(V_0 - \dot{x}_k)}{B_j + (V_0 - \dot{x}_k)^2}; \quad (3)$$

$$P_{пр} = -\frac{K_j(V_0 + \dot{x}_k)}{B_j + (V_0 + \dot{x}_k)^2}; \quad (4)$$

$$P_{дин} = -\frac{K_j \cdot \dot{x}_k}{B_j + \dot{x}_k^2}, \quad (5)$$

де $K_j = 2M_k \cdot s_{kj} \cdot V_0 \frac{u_m}{r_{жк}} \cdot \eta^{\pm 1}$; $B_j = s_{kj}^2 \cdot V_0^2$ - константи для j -ї штучної характеристики двигуна (див. рис. 2); M_k - критичний момент двигуна; s_{kj} - критичне ковзання на механічній характеристиці j ; V_0, \dot{x}_k - швидкості пересування крана, що відповідають синхронній і поточній частотам обертання ротора двигуна; u_m - передаточне число приводу; $r_{жк}$ - радіус ходового колеса; $\eta^{\pm 1}$ - коефіцієнт корисної дії механізму пересування крана (в руховому режимі знак «+», в гальмівних - знак «-»).

Перевагою такого врахування зведеної сили приводу є можливість введення в математичні моделі кранів практично будь-якого (з можливих при експлуатації) закону зміни зведеної сили двигуна по нелінійним статичним характеристикам.

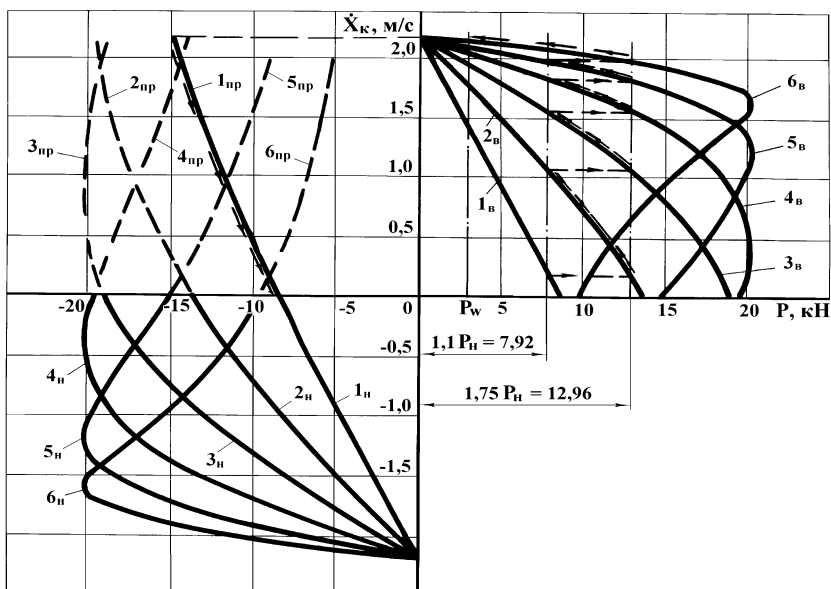


Рисунок 2 - Механічні характеристики асинхронного електроприводу пересування мостового крана при релейно-контакторному управлінні

З метою підвищення ефективності гальмування двигуном на низьких частотах обертання ротора доцільно в кінці перехідного процесу включати колодкові гальма. В цьому випадку гальмування крана буде здійснюватися в два етапи (рис. 3, крива 3). Спочатку електродвигун механізму пересування працює, наприклад, в режимі динамічного гальмування, що створює найкращі умови динамічного навантаження металокопункції і елементів приводу, сприяє гасінню коливань вантажу, а потім, при досягненні певної зниженої швидкості V_B , двигун відключається і подальше гальмування крана, до його повної зупинки, здійснюється з постійним гальмівним моментом M_T колодковим гальмом (комбінування електродинамічного і механічного гальмування). В цьому режимі зведена до поступального пересування крана гальмівна сила приводу (рис. 3, крива 3):

$$P_{\text{ком}} = \begin{cases} -\frac{K_j \dot{x}_k}{B_j + \dot{x}_k^2} & \text{при } \dot{x}_k > V_B; \\ -M_T \cdot i_M \cdot \eta / r_{\text{жк}} & \text{при } \dot{x}_k \leq V_B. \end{cases} \quad (6)$$

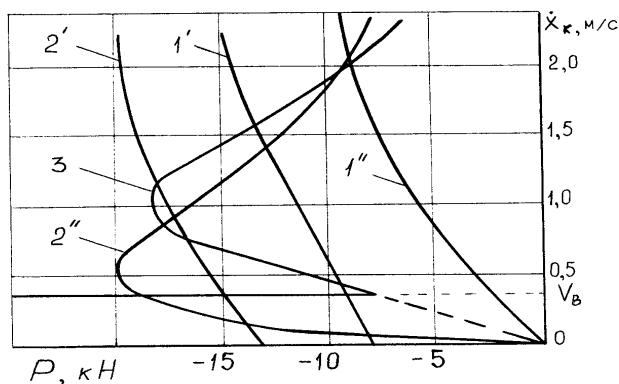


Рисунок 3 - Механічні характеристики приводу пересування мостового крана в гальмівних режимах

При гальмуванні колодковим гальмом і ступеневому наростанню гальмівного моменту зведена до поступального пересування крана гальмівна сила приводу:

$$P_{\text{ступ}} = \begin{cases} -P_{T1} = M_{T1} \cdot i_m \cdot \eta / r_{\text{хк}} & \text{при } t \leq t_{T1}; \\ -P_{T2} = M_{T2} \cdot i_m \cdot \eta / r_{\text{хк}} & \text{при } t > t_{T2}. \end{cases} \quad (7)$$

В даний час найбільш перспективним способом управління приводом кранових механізмів є управління за допомогою частотних перетворювачів, яке має такі переваги: широкий діапазон регулювання частоти обертання ротора (в тому числі - вище номінальної); висока точність і плавність регулювання швидкості; жорсткі механічні характеристики; значна економія електроенергії. При частотному управлінні зведена до ходових коліс сила приводу в загальному вигляді (з урахуванням залежності моменту двигуна M від поточних фазної напруги статора, частоти і ковзання [11 та ін.]) визначається за виразом

$$P_d = P_{\text{част}} = \frac{u_m}{r_{\text{хк}}} \eta^{\pm 1} \cdot M =$$

$$= \frac{u_m}{r_{\text{хк}}} \eta^{\pm 1} \cdot \frac{28,6 \cdot U_{\text{ф.с}}^2 \cdot \frac{r_p'}{s}}{n_c \cdot f_* [(r_c + c_f \cdot \frac{r_p'}{s})^2 + (x_c + c_f \cdot x_p')^2 \cdot f_*^2]} \quad (8)$$

де $U_{\phi.c}$ - фазна напруга в ланцюзі статора; n_c - синхронна частота обертання двигуна при частоті 50 Гц; $f_* = f / f_n$ - відносна частота струму статора (f і f_n - поточне і номінальне значення частоти струму статора, Гц); r_c і x_c - активний і реактивний опори фаз статора; r_p' і x_p' - зведені до статора активний і реактивний опори фаз ротора; коефіцієнт c_f

$$c_f = \frac{1}{r_0^2 + x_0^2 \cdot f_*^2} \sqrt{[(r_c + r_0)r_0 + (x_c + x_0)x_0 f_*^2]^2 + [(r_c + r_0)x_0 f_* - (x_c + x_0)r_0 f_*]^2}$$

Залежно від закону частотного керування асинхронним двигуном вираз для моменту M у формулі (8) буде мати різний вигляд. Наприклад, при частотному регулюванні швидкості асинхронного двигуна при сталості відносини напруги живлення до частоти f ($U_{\phi.c} / f = \text{const}$) зведена до ходових коліс сила приводу дорівнює

$$P_d = P_{U/f} = \frac{u_m}{r_{xc}} \eta^{\pm 1} \cdot \frac{28,6 \cdot U_{\phi.c.n}^2 \cdot f_* \cdot \frac{r_p'}{s}}{n_c \cdot [(r_c + c_f \cdot \frac{r_p'}{s})^2 + (x_c + c_f \cdot x_p')^2 \cdot f_*^2]}, \quad (9)$$

де $U_{\phi.c.n}$ - номінальна фазна напруга статора при частоті 50 Гц.

На рис. 4.4 показано сімейство механічних характеристик для асинхронного двигуна механізму пересування мостового крана при зміні частоти від 10 до 50 Гц.

Для забезпечення сталості перевантажувальної здатності двигуна незалежно від характеру навантаження (постійне або змінне), значення фазної напруги слід підтримувати відповідно до закону:

$$U_{\phi.c} = U_{\phi.c.n} \cdot \sqrt{\frac{f_* \cdot \rho_k \pm \sqrt{(f_*^2 + \rho_k^2) \cdot (f_*^2 + \rho_\mu^2)}}{\rho_k \pm \sqrt{(1 + \rho_k^2) \cdot (1 + \rho_\mu^2)}}} \cdot \frac{M_c}{M_n}, \quad (10)$$

де M_c - момент статичного опору на валу двигуна, Н·м; M_n - номінальний момент на валу двигуна, Н·м; $\rho_k = r_c / x_{kn}$ і $\rho_\mu = r_c / x_{\mu n}$ - відносні величини ($x_{\mu n}$ - індуктивний опір контуру намагнічування при номінальній частоті, Ом). Знак плюс перед радикалами відноситься до рухового режиму, мінус - до генераторного.

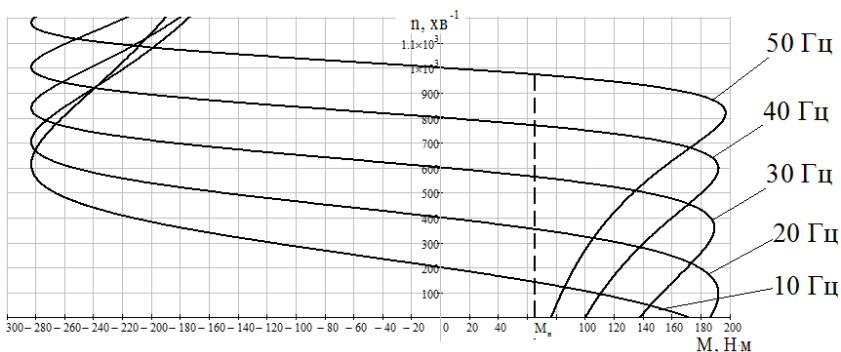


Рисунок 4 – Механічні характеристики асинхронного двигуна механізму пересування мостового крана при частотному керуванні

За допомогою формул (3 - 10) можна задати ведену до поступального пересування крана силу приводу практично для всіх, що мають в реальних умовах випадків розгону і гальмування крана: розгін двигуна по «пилкоподібній» багаступінчастій характеристиці (реалізований шляхом переходу з одної механічної характеристики на іншу за рахунок зміни опору в ланцюзі ротора двигуна), найбільш «несприятливий» розгін (здійснюваний по ділянках механічних характеристик з моментом близьким до максимального), гальмування противмиканням, електродинамічне гальмування, гальмування колодковим гальмом з постійним моментом і зі ступінчастим його наростанням. Перемикання з одних механічних характеристик на інші здійснюється при досягненні швидкості пересування крана \dot{x}_K заданих значень v_i . В кінці процесів гальмування крана (при $\dot{x}_K = 0$), здійснюваних електродвигуном (противмиканням, динамічним гальмуванням) накладаються колодкові гальма з постійним гальмівним моментом.

Система диференціальних рівнянь (1) другого порядку, після заміни змінних:

$$\begin{aligned} x_K &= x(1); & \dot{x}_K &= x(2) = x1(1); & \ddot{x}_K &= x1(2); \\ x_M &= x(3); & \dot{x}_M &= x(4) = x1(3); & \ddot{x}_M &= x1(4); \\ x_\Gamma &= x(5); & \dot{x}_\Gamma &= x(6) = x1(5); & \ddot{x}_\Gamma &= x1(6), \end{aligned} \quad (11)$$

і перетворення в відповідну систему диференціальних рівнянь першого порядку інтегрується стандартним чисельним методом Рунге-Кутта.

На кожному кроці заданого інтервалу часу розраховуються переміщення, швидкості і прискорення всіх приведених мас, а також зусилля,

що діють в приводі S_{Π} , на металоконструкцію крана S_M і вантаж S_K (в горизонтальній площині). Визначаються максимальні значення зазначених зусиль на кожному етапі перехідного процесу і час їх виникнення.

3 Опис комп'ютерної програми

Спеціалізоване програмне забезпечення для багатопараметричного аналізу перехідних процесів кранів при роботі механізмів пересування [7] дозволяє здійснювати діалог з користувачем, тобто інтерактивний обмін інформацією. Основним принципом такого діалогу є незалежне формування користувачем запиту на виконання відповідного розрахунку (вводяться, вибір розрахункових схем (динамічних моделей) і режимів досліджуваних перехідних процесів) і повністю детермінована реакція системи на нього.

В залежності від вибору користувачем тієї чи іншої динамічної моделі та вибору виду перехідного режиму, на екран послідовно виводяться вікна для введення і коригування вихідної інформації (задання параметрів мостового електричного крана).

Далі за допомогою методу Рунге-Кутта інтегрується система диференціальних рівнянь і на екран виводяться графіки (у функції часу), що характеризують зміни переміщень мас, їх швидкостей і прискорень, а також зусиль, що виникають в пружних ланках (приводі механізму, металоконструкції крана і вантажних канатах).

Для ефективного використання розробленого програмного забезпечення необхідний IBM-сумісний комп'ютер, здатний підтримувати роботу операційної систем Windows 9x / NT / 2000 / XP / Vista / 7 / 10.

Блок-схема укрупненого алгоритму роботи програмних модулів наведена на рисунку 5.

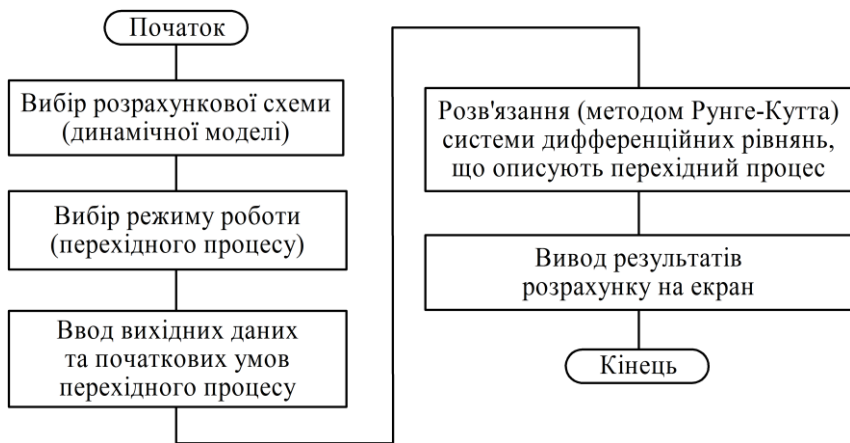


Рисунок 5 - Укрупнена блок-схема програмних модулів

В результаті роботи програми на екран виводяться до шести вікон, які містять графіки (в функції часу), що характеризують зміни: переміщень, швидкостей і прискорень приведених мас; зусиль виникаючих в пружних і в'язких ланках (привода механізму пересування, металокопонування крана і вантажних канатів); втрат електроенергії, які виникають під час перехідного процесу. Крім того, в кожному вікні програми міститься інформаційна панель, яка відображає максимальні значення зазначених величин і час їх виникнення для кожного з етапів перехідного процесу. У програмі передбачена можливість виведення результатів на друк і / або збереження їх в файлах з розширеннями bmp і wmf.

При запуску програми, файл **Move_Crane.exe**, на екрані з'являється вікно заставки с назвою, емблемою і кнопкою «Продовжити» (див. рис. 6).

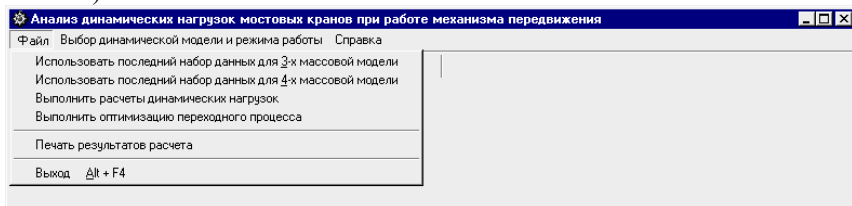


Рисунок 6 - Вікно заставки програми

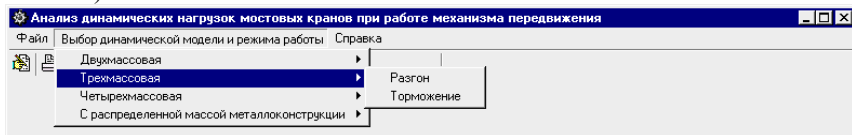
Після натискання кнопки «Продовжити» на екран виводиться вікно, яке відображує головне меню програми і запрошення для формування запити.

Головне меню містить пункти: "Файл", "Вибір динамічної моделі і режиму роботи", «Довідка». Кожен з цих пунктів розгортається в меню наступного рівня, окремі пункти якого мають трикутні стрілки. Вони означають, що дані пункти самі розкриваються в меню наступного, більш низького, рівня. Зміст пунктів головного меню наведено на рис. 7.

а)



б)



в)

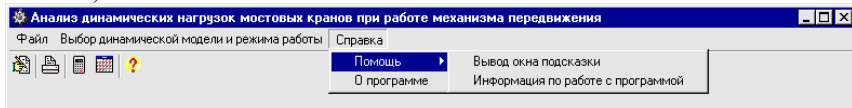


Рисунок 7 - Зміст пунктів головного меню: а) – «Файл»; б) – «Вибір динамічної моделі і режиму роботи»; в) – «Довідка»

Далі, після вибору користувачем динамічної моделі та виду перехідного режиму, на екран послідовно виводяться два вікна для введення і коригування вихідної інформації (завдання параметрів мостового електричного крана). За замовчуванням ці вікна заповнені параметрами мостового крана вантажопідйомністю 20/5 т. Всі вихідні дані можуть легко змінюватися користувачем в передбачених для цих цілей позиціях.

Як приклад, на рис. 8 представлені виводяться на екран вікна із загальною, для зазначеного крана, вихідною інформацією при обранні тримасової динамічної моделі. Вікна, представлені на рис. 5, призначені для введення і коригування загальних даних по крану, інформації за відповід-

ним механізмом пересування крана, знання наведених мас, а також відповідних коефіцієнтів жорсткості і демпфірування.

При дослідженні перехідних процесів при пересування крана, також, задаються сила статичного опору пересуванню крана і параметри колодкового гальма цього механізму. Крім того, можливий облік результатів розгону крана при визначенні початкових умов процесу гальмування (див. рис. 8, б), тобто в якості початкових умов процесу гальмування крана можна задати переміщення і швидкості відповідних мас, які риси місце в момент закінчення процесу розгону. Також вибирається спосіб розгону електроприводу крана або за ступеневою механічною характеристикою (до шести ступенів контролера, наприклад для асинхронного електроприводу з фазним ротором) або по одній з механічних характеристик (див. рис. 8, а). Аналогічним чином здійснюється вибір гальмівного режиму з представлених на відповідних вкладках (див. рис. 8, б) при дослідженні процесів гальмування крана.

Після натискання кнопки «Далі» на екран виводиться друге вікно для введення вихідних даних, розділене на три функціональні зони. Призначення останніх полягає в наступному: завдання пускових або гальмівних характеристик приводу; завдання початкових умов досліджуваного перехідного процесу; вибір з безлічі результатів розрахунку тих графіків і величин, які слід вивести на екран (здійснюється шляхом установки прапорця у відповідному пункті). На рис. 9 наведені приклади вікон, що містять зазначену вище інформацію.

Як видно з рис. 6, а завдання тієї чи іншої механічної характеристики електродвигуна здійснюється шляхом вибору одного з залежних перемикачів (так званих "радіоклавіш"), що визначають відповідні значення коефіцієнтів K_i і B_i ($i = 1 \dots 6$) для i -ої механічної характеристики. Ці коефіцієнти можуть бути обрані з заданих за замовчуванням або введені користувачем.

а)

Анализ динамических нагрузок мостовых кранов при работе механизма передвижения

Файл Выбор динамической модели и режима работы Справка

Разгон по ступенчатой характеристике | Разгон по одной из механических характеристик

Общие данные крана	
Грузоподъемность Q , т	20
Пролет L , м	28,5
Высота подъема груза H , м	8
Режим работы ПВ, %	40
Масса крана G_k , кг	49000
Масса тележки G_t , кг	8500

Механизм передвижения крана	
Скорость передвижения крана V_k , м/с	2,083
Тип привода	раздельный
Электродвигатель:	МТБ-411-8
- мощность на валу N , кВт	16
- частота вращения n , об/мин	715
- синхронная частота n_0 , об/мин	750
- максимальный момент M_k , Н·м	620
- макс. момент ротора и муфты $(GD^2)_{H \cdot m^2}$	40,00
Передаточное число привода u	12,64
К.п.д. механизма	0,85
Радиус ходового колеса R , м	0,35

Приведенные массы	
Приведенная к ходовым колесам масса вращающихся частей привода (от ротора двигателя до ходового колеса включительно) и масса моста, приведенная к перемещению концевых балок m_k , кг	24000
Приведенная к середине пролета масса средних частей моста и порожней тележки m_m , кг	26000
Масса груза m_g , кг	20000

Коэффициенты жесткости и демпфирования	
Коэффициент жесткости металлоконструкции крана в горизонтальной плоскости C_k , Н/м	6900000
Горизонтальная составляющая натяжения грузовых канатов C_k , Н/м	20000
Коэффициент затухания колебаний (демпфирования) металлоконструкции в горизонтальной плоскости D_k , Н·с/м	0

Действующие силы	
Сила статического сопротивления передвижению крана R_w , Н	3000

Параметры колодочного тормоза механизма передвижения	
Типоразмер тормоза	ТКГ-300
Постоянное тормозное усилие создаваемое колодочным тормозом F_t , Н	13000

✓ Далее

б)

Анализ динамических нагрузок мостовых кранов при работе механизма передвижения

Файл Выбор динамической модели и режима работы Справка

Механический тормоз | Противовключение | Динамическое торможение | Комбинированное торможение | Управляемый тормоз | Ступенчатое т.

Общие данные крана	
Грузоподъемность Q , т	20
Пролет L , м	28,5
Высота подъема груза H , м	8
Режим работы ПВ, %	40
Масса крана G_k , кг	49000
Масса тележки G_t , кг	8500

Механизм передвижения крана	
Скорость передвижения крана V_k , м/с	2,083
Тип привода	раздельный
Электродвигатель:	МТБ-411-8
- мощность на валу N , кВт	16
- частота вращения n , об/мин	715
- синхронная частота n_0 , об/мин	750
- максимальный момент M_k , Н·м	620
- макс. момент ротора и муфты $(GD^2)_{H \cdot m^2}$	40,00
Передаточное число привода u	12,64
К.п.д. механизма	0,85
Радиус ходового колеса R , м	0,35

Приведенные массы	
Приведенная к ходовым колесам масса вращающихся частей привода (от ротора двигателя до ходового колеса включительно) и масса моста, приведенная к перемещению концевых балок m_k , кг	24000
Приведенная к середине пролета масса средних частей моста и порожней тележки m_m , кг	26000
Масса груза m_g , кг	20000

Коэффициенты жесткости и демпфирования	
Коэффициент жесткости металлоконструкции крана в горизонтальной плоскости C_k , Н/м	6900000
Горизонтальная составляющая натяжения грузовых канатов C_k , Н/м	20000
Коэффициент затухания колебаний (демпфирования) металлоконструкции в горизонтальной плоскости D_k , Н·с/м	0

Действующие силы	
Сила статического сопротивления передвижению крана R_w , Н	3000

Параметры колодочного тормоза механизма передвижения	
Типоразмер тормоза	ТКГ-300
Постоянное тормозное усилие создаваемое колодочным тормозом F_t , Н	13000

☒ Учитывать результаты разгона при определении начальных условий процесса торможения крана

✓ Далее

Рисунок 8 - Вікно основних вихідних даних крана, представленого тримасовою розрахунковою схемою: а) - при розгоні; б) - при гальмуванні

а)

Анализ динамических нагрузок мостовых кранов при работе механизма передвижения

Файл Выбор динамической модели и режима работы Справка

Разгон по ступенчатой характеристике | Разгон по одной из механических характеристик

Механические характеристики привода

Количество механических характеристик: 6

№ характеристики	К, Н*м/с	В, м2/с2	Скорости перехода на следующую механическую характеристику привода
1	374207,47	96,646	0,173
2	210382,34	30,548	1,054
3	118278,58	9,655	1,549
4	66497,14	3,052	1,827
5	37385,20	0,965	1,984
6	21018,25	0,305	2,185

Начальные условия процесса разгона

Перемещения: $X_k = 0$ $X_m = 0$ $X_r = 0$
 Скорости: $V_k = 0$ $V_m = 0$ $V_r = 0$
 Движение груза в начальный момент: отсутствует
 Начальное время T_n , с: 0 Шаг интегрирования h , с: 0,002
 Конечное время T_k , с: 10

Выбор результатов расчета

Перемещения

- ☒ Приведенной массы $m_k - X_k$
- ☒ Приведенной массы $m_m - X_m$
- ☒ Массы груза $m_r - X_r$

Скорости

- ☒ Приведенной массы $m_k - V_k$
- ☒ Приведенной массы $m_m - V_m$
- ☒ Массы груза $m_r - V_r$

Ускорения

- ☒ Приведенной массы $m_k - A_k$
- ☒ Приведенной массы $m_m - A_m$
- ☒ Массы груза $m_r - A_r$

Усилия

- ☒ В приводе механизма передвижения - P_d
- ☒ В металлоконструкции крана - S_m
- ☒ В грузовых канатах - S_k

Назад | Расчет без учета энергозатрат | Расчет с учетом энергозатрат

б)

Анализ динамических нагрузок мостовых кранов при работе механизма передвижения

Файл Выбор динамической модели и режима работы Справка

Механический тормоз | Противовключение | Динамическое торможение | Комбинированное торможение | Управляемый тормоз | Ступенчатое т.

Механические характеристики привода

Постоянные для соответствующей механической характеристики двигателя механизма передвижения

№ характеристики	К, Н*м/с	В, м2/с2	Выберите механическую характеристику, на которой следует осуществлять процесс торможения
1	517934,21	96,646	1
2	291186,63	30,548	2
3	163707,38	9,655	3
4	92037,56	3,052	4
5	51744,22	0,965	5
6	29091,00	0,305	6

Начальные условия процесса торможения

Перемещения: $X_k = 0$ $X_m = 0$ $X_r = 0$
 Скорости: $V_k = 2,083$ $V_m = 2,083$ $V_r = 2,083$
 Движение груза в начальный момент: отсутствует
 Начальное время T_n , с: 0 Шаг интегрирования h , с: 0,002
 Конечное время T_k , с: 10

Выбор результатов расчета

Перемещения

- ☒ Приведенной массы $m_k - X_k$
- ☒ Приведенной массы $m_m - X_m$
- ☒ Массы груза $m_r - X_r$

Скорости

- ☒ Приведенной массы $m_k - V_k$
- ☒ Приведенной массы $m_m - V_m$
- ☒ Массы груза $m_r - V_r$

Ускорения

- ☒ Приведенной массы $m_k - A_k$
- ☒ Приведенной массы $m_m - A_m$
- ☒ Массы груза $m_r - A_r$

Усилия

- ☒ В приводе механизма передвижения - P_d
- ☒ В металлоконструкции крана - S_m
- ☒ В грузовых канатах - S_k

Назад | Расчет без учета энергозатрат | Расчет с учетом энергозатрат

Рисунок 9 - Вікно програми для завдання коефіцієнтів механічних характеристик електроприводу, початкових умов і виведення результатів розрахунку: а) - при розгоні; б) - при гальмуванні

На рис. 9 в зоні вибору результатів розрахунку, що виводяться на екран, за замовчуванням прапорцями відзначені всі пункти, але якщо будь-які з результатів перехідного процесу не потрібно виводити для перегляду, то відповідні прапорці слід зняти клацанням лівої кнопки миші.

Наявність у вікні кнопки «Назад» дозволяє повернутися до вибору другої динамічної моделі крана, іншого способу розгону або гальмування або просто до першого вікна з вихідною інформацією.

Запуск процедури інтегрування здійснюється кнопкою «Розрахунок без урахування енерговитрат». На кожному кроці заданого інтервалу часу розраховуються переміщення, швидкості і прискорення всіх приведених мас, а також зусилля, що діють в приводі S_{Π} , на металокопцю крана S_M і вантажу S_K (в горизонтальній площині). Визначаються максимальні значення зазначених зусиль на кожному етапі перехідного процесу і час їх виникнення.

Кнопка «Розрахунок з урахуванням енерговитрат» розгортає вікно, наведене на рис. 10, що містить електричні параметри електродвигуна для розрахунку коефіцієнтів K_j і B_j механічної характеристики [8]. Після натискання розташованої у вікні кнопки «Виконати розрахунок», крім розрахунків, вироблених при натисканні кнопки «Розрахунок без урахування енергозатрат», буде виконано розрахунок енергії витраченої на розгін або гальмування крана, розрахунок втрат енергії в ланцюгах ротора і статора, а також сумарної енергії спожитої електроприводом за час досліджуваного процесу.

Для розрахунку коефіцієнтів K_j і B_j на основі електричних параметрів необхідно клацанням лівої кнопки миші встановити прапорець (в нижній частині вікна, наведеного на рис. 7), в іншому випадку значення коефіцієнтів K_j і B_j будуть взяті з відповідних форм, описаних вище (див. рис. 9).

За результатами виконаних розрахунків на екран виводяться графіки в функції часу, що характеризують зміну переміщень мас, їх швидкостей і прискорень, зусиль виникаючих в пружних ланках (приводі механізму, в елементах металокопцю і вантажних канатах). Крім перерахованих графіків, у вікні з результатами, виводиться інформаційна панель, яка містить основні відомості про кран (вантажопідйомність, проліт, швидкість відповідного механізму), інформація про те, яка обрана розрахункова схема, який досліджується перехідний процес і яким чином задається зусилля приводу, включаючи значення коефіцієнтів K_j і B_j . Тут же виведені значення максимальних зусиль, що виникають в приводі механізму, в елементах металокопцю і вантажних канатах і час їх виникнення, для кожного з етапів перехідного процесу. Приклади отриманих результатів наведено на рис. 11, 12.

Анализ динамических нагрузок мостовых кранов при работе механизма передвижения

Файл | Выбор динамической модели и режима работы | Справка

Механический тормоз | Противоключение | Динамическое торможение | Комбинированное торможение | Управляемый тормоз | Ступенчатое т.

Электрические параметры двигателя механизма передвижения крана

Трехфазный ток статора холостого хода электродвигателя I_c , А	30,20	Активное сопротивление ротора R_r , Ом	0,103
Линейный трехфазный номинальный ток ротора электродвигателя I_r , А	49,50	Активное сопротивление статора R_c , Ом	0,285
Э.Д.С. между кольцами неподвижного разомкнутого ротора электродвигателя E_r , В	207,0	Внутреннее реактивное сопротивление ротора X_r , Ом	0,250
Соотношение I_b/I_{cx} $z1$	3,00	Внутреннее реактивное сопротивление статора X_c , Ом	0,430
Соотношение R_r/R_{rn} $z2$	0,416	Сопротивление ротора, дополнительное R_{rd} , Ом	0,900
Коэффициент трансформации K_e	1,73	Коэффициент кратковременной перегрузки двигателя	2,8

Параметры сопротивления передвижению

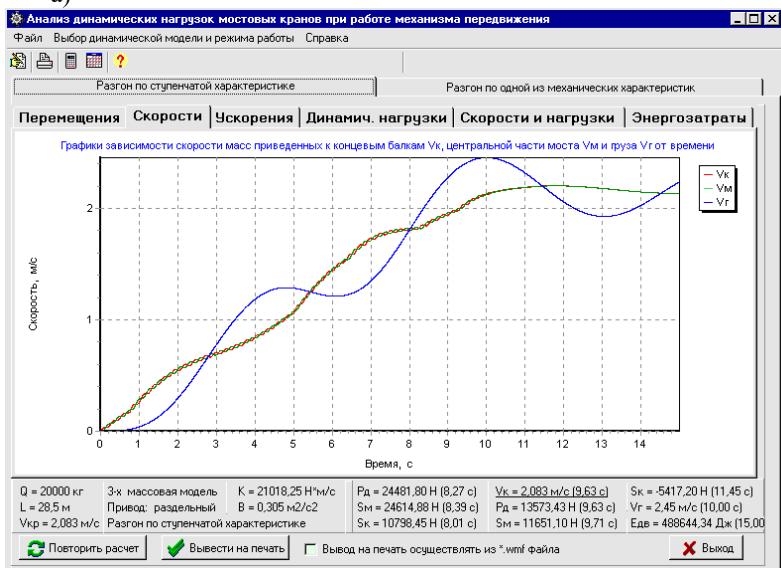
Диаметр цапфы ходового колеса D_c , мм	180,0	Коэффициент учитывающий трение реборд о головку рельса K_p	1,10
Коэффициент трения подшипников M_{sk}	0,017	Расчетный угол уклона подкранового пути	0,00
Коэффициент трения качения стальных ходовых колес по рельсу F_{tk} , мм	0,80		

☐ Коэффициенты К и В рассчитываются на основе электрических параметров двигателя

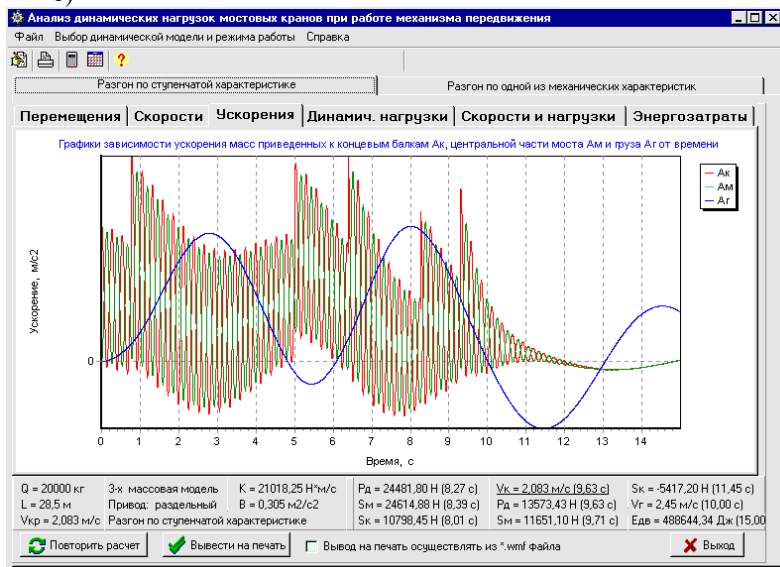
[Назад](#) [Выполнить расчет](#)

Рисунок 10 - Вікно, що містить електричні параметри електроприводу пересування крана

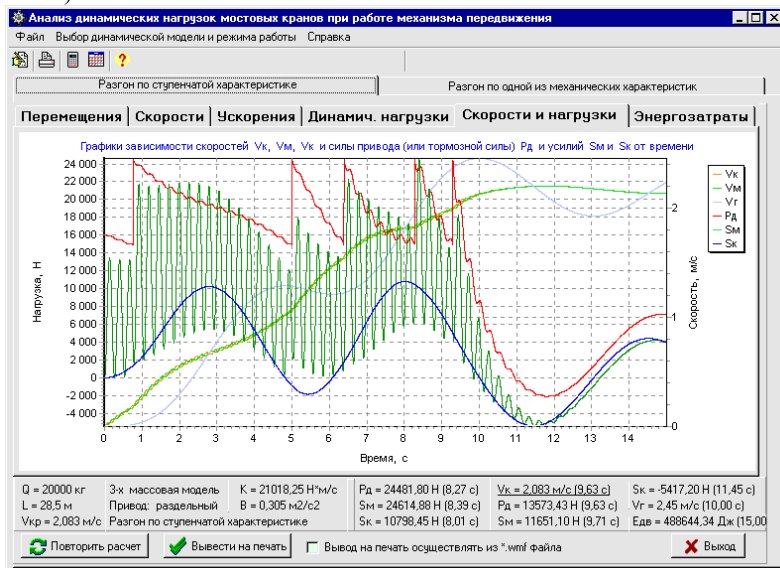
а)



б)



в)



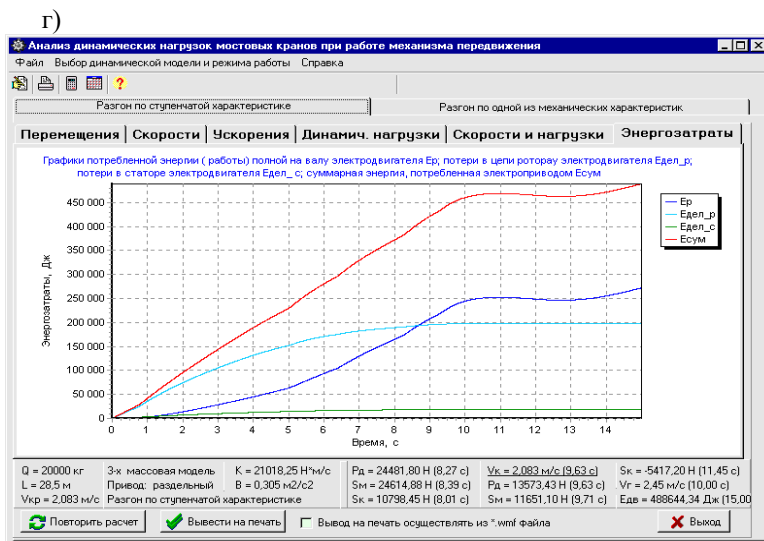


Рисунок 11 - Графіки перехідних процесів при розгоні мостового крана по ступінчастій характеристиці: а) і б) – відповідно, швидкості і прискорення приведених мас; в) і г) - навантаження в пружних зв'язках і втрати енергії

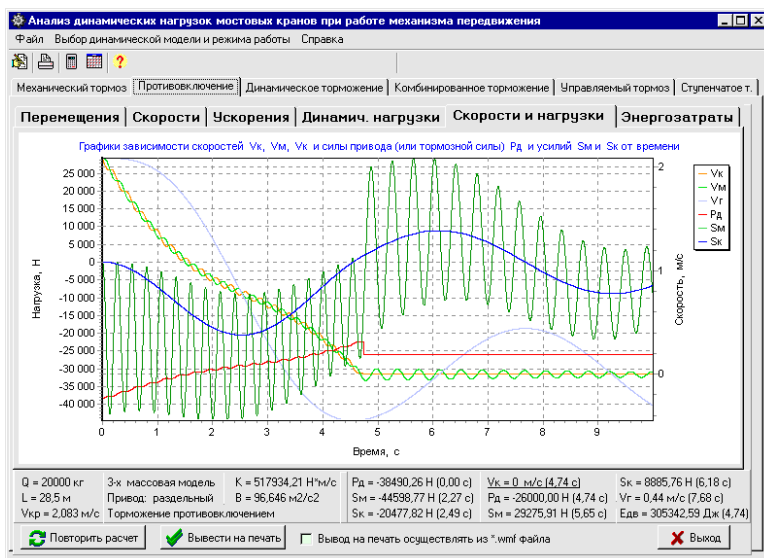


Рисунок 12 - Графіки швидкостей і навантажень при гальмуванні мостового крана в режимі противмикання

Висновки. Використання програмного забезпечення «Комп'ютеризована система багатопараметричного аналізу перехідних режимів при роботі механізму пересування вантажопідіймальних кранів мостового типу» значною мірою полегшує і прискорює проведення досліджень перехідних процесів вантажопідіймальних кранів. За її допомогою, можливо виконати оцінку впливу різних параметрів системи «привід - металоконструкція - вантаж» на характер перехідного процесу і величину максимальних динамічних навантажень.

Крім цього програма забезпечує ряд сервісних функцій:

- дозволяє повернутися назад для вибору іншої розрахункової моделі або перехідного режиму, для виконання розрахунків з іншими вихідними параметрами вантажопідіймального крана;

- здійснювати вивід отриманих результатів (графіків) на друк шляхом вибору відповідних кнопок в активному вікні;

- зберігати отримані результати (графіки) в файлах з розширеннями bmp і emf.

- зберігати і завантажувати вихідні дані останнього реалізованого перехідного процесу;

- надає довідкову інформацію по роботі з програмою, дозволяє використовувати вбудовані калькулятор і календар.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Динаміка машин. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2013. – 227 с.

2. Лобов Н.А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути: учебное пособие / Н.А. Лобов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 232 с.

3. Ловейкін В.С. Динаміка і оптимізація режимів руху мостових кранів. Монографія / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. – 310 с.

4. Неженцев А.Б. Анализ динамических нагрузок при торможении мостовых кранов с частотным управлением приводов передвижения / А.Б. Неженцев, Г.А. Бойко, П.В. Збитнев // Підійомно-транспортна техніка, №3(55). - Одеса, 2017. – С. 8-20.

5. Будиков Л.Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа. Изд. 2-е / Л.Я. Будиков. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В.Даля, 2003. – 210 с.

6. Ловейкін В.С. Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідіймних машин: монографія / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – К.: Компрінт, 2012. – 298 с.

7. Аветисян С.М. Программное обеспечение для исследования переходных процессов грузоподъемных кранов (часть 1: при работе механизмов передвижения) / С.М. Аветисян, А.Б. Неженцев // Підйомно-транспортна техніка, № 4(8). - Дніпропетровськ, 2003. – с. 33-48.

8. Неженцев О.Б. Аналіз перехідних процесів при гальмуванні мостових кранів // Modern research in world science. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Lviv, Ukraine. 2023. Pp. 312-318. ISBN 978-966-8219-86-3

9. Динамічні навантаження у вантажопідйомних машинах : навч.-метод. посібник / О.В. Григоров, В.В. Офій, А.С. Рахманий. - Х. : НТУ "ХПІ", 2006. - 68 с.

10. Динаміка вантажопідйомних та будівельних машин: монографія / Човнюк Ю.В., Сівак І.М. – К.: Видавництво «АграрМедіаГруп», 2014. – 740 с.

11. Неженцев О.Б. Урахування зведеної сили асинхронного електропривода з частотним управлінням у математичних моделях кранів // Сучасний рух науки: тези доп. XI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 8-9 жовтня 2020 р. – Дніпро, 2020. – Т.2. – С. 83-85.

12. Неженцев О.Б. Визначення впливу швидкості пересування мостового крана на динамічні навантаження і втрати енергії // Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України: тези доповідей I Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції, м. Київ, 15 березня 2021 р. / редкол. О.С. Волошкіна та ін. – К.: ІТТА, 2021. – С. 691-693.