

УДК 621.873

Неженцев А.Б.¹, к.т.н.; Бойко Г.А.², к.т.н.; Збитнев П.В.², аспирант

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

²Восточнoукраинский национальный университет им. Владимира Даля

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ТОРМОЖЕНИИ МОСТОВЫХ КРАНОВ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРИВОДОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ

Аннотация. *Описана математическая модель мостового крана с частотным управлением электропривода передвижения, а также представлено программное обеспечение для реализации указанной математической модели. Выполнен анализ изменения кинематических и динамических параметров при торможении мостового крана с частотным управлением. Приведены зависимости динамических нагрузок на металлоконструкцию крана и груз, а также времени торможения крана от параметров частотного управления. Даны удобные для практического применения графики равных откликов динамических нагрузок, которые действуют на металлоконструкцию крана и груз при торможении частотно-управляемого мостового крана.*

Ключевые слова: *мостовой кран, математическая модель, переходные процессы, частотное управление, динамические нагрузки*

Анотація. *Описана математична модель мостового крана з частотним керуванням електроприводу пересування, а також представлено програмне забезпечення для реалізації вказаної математичної моделі. Виконано аналіз зміни кінематичних і динамічних параметрів при гальмуванні мостового крана з частотним керуванням. Наведено залежності динамічних навантажень на металоконструкцію крана та вантаж, а також часу гальмування крана від параметрів частотного керування. Дано зручні для практичного застосування графіки рівних відгуків динамічних зусиль, що діють на металоконструкцію крана та вантаж при гальмуванні частотно-керуваного мостового крана.*

Ключові слова: *мостовий кран, математична модель, перехідні процеси, частотне керування, динамічні навантаження*

Abstract. *A mathematical model of an overhead crane with frequency control of an electric drive of movement is described in the article. Software for implementing the mathematical model of a crane is also presented. The analysis of changes in kinematic and dynamic parameters during braking of a bridge crane with frequency control is*

© Неженцев А.Б., Бойко Г.А., Збитнев П.В.

performed. Dependences of dynamic loads on the metal structure of the crane and cargo, as well as the time of braking of the crane from the parameters of frequency control are given. The graphs of equal response of the dynamic loads acting on the crane metal structure and the dynamic loads acting on the cargo when braking the frequency-controlled overhead crane are given for practical applications.

Keywords: *overhead crane, mathematical model, transients, frequency regulation, dynamic loads*

Постановка проблемы и актуальность исследования. Все больше грузоподъемных кранов выпускаются с частотно-управляемыми электроприводами, которые имеют бесспорные преимущества по сравнению с традиционным релейно-контакторным управлением: широкий диапазон регулирования частоты вращения ротора (в том числе - выше номинальной); плавность регулирования скорости крановых механизмов; жесткие механические характеристики; незначительные потери электроэнергии; возможность использования более дешевых и надежных короткозамкнутых двигателей вместо двигателей с фазным ротором [1-8 и др.]. Поэтому актуальными являются исследования переходных процессов частотно-управляемых кранов с целью поиска путей улучшения их технико-эксплуатационных характеристик на стадии проектирования или модернизации. В первую очередь это касается процессов торможения кранов, которые осуществляются с помощью частотно-управляемых приводов передвижения.

Анализ последних исследований и публикаций. Несмотря на то, что в работах по общей теории электропривода [1, 2 и др.] частотное управление асинхронным приводом подробно изложено, остаются нерешенными множество задач по частотно-управляемым крановым механизмам. В частности, не изучены закономерности влияния параметров частотного управления на динамические нагрузки в металлоконструкции крана и груза, а также - время торможения крана.

Известно, что в расчетах крановых механизмов передвижения, согласно нормативной методике [9], необходимо учитывать: силы тяжести груза, крана и тележки; ветровые нагрузки рабочего и нерабочего состояния; динамические нагрузки поступательно движущихся масс груза, крана и тележки; динамические моменты вращающихся масс механизма; технологические нагрузки. Для расчета динамических нагрузок применяют разные математические модели грузоподъемных кранов [3, 10-12]. При этом для реализации этих моделей используют или программы общего назначения (MathCAD, Mathematica) [3, 10], которые требуют от пользователя навыков программирования, или созданные исследователями программы не

позволяют глубоко (с учетом специфических особенностей, в том числе процессов торможения) исследовать переходные режимы частотно-управляемых кранов [12]. Поэтому целесообразно совершенствовать программное обеспечение, которое позволит всесторонне исследовать кинематические и динамические параметры грузоподъемных кранов с частотно-управляемыми приводами передвижения в пуско-тормозных режимах.

Цель статьи: выполнить анализ процессов торможения мостового крана с частотно-управляемым электроприводом передвижения с помощью разработанного программного обеспечения.

Изложение основного материала.

1. Математическая модель. Для исследования динамики передвижения мостового крана использована трехмассовая расчетная схема (см. рис. 1), которая применялась в работах многих ученых [3, 10-12].

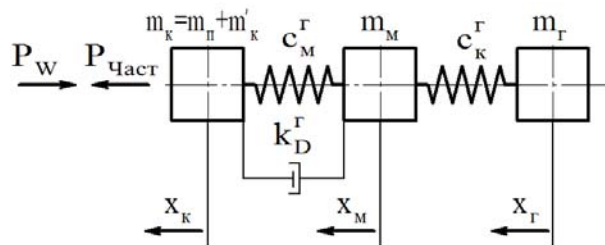


Рисунок 1 - Трехмассовая расчетная схема мостового крана

Движение трехмассовой динамической модели крана (рис. 1) описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_k \cdot \ddot{x}_k + k_m (\dot{x}_k - \dot{x}_m) + c_m (x_k - x_m) = P_{\text{част}} - P_w \cdot \text{sign}(\dot{x}_k); \\ m_m \cdot \ddot{x}_m - k_m (\dot{x}_k - \dot{x}_m) - c_m (x_k - x_m) + c_k (x_m - x_g) = 0; \\ m_g \cdot \ddot{x}_g - c_k (x_m - x_g) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 1 и в уравнениях (1) приняты обозначения: m_k – приведенная к ходовым колесам масса вращающихся частей привода (от ротора двигателя к ходовому колесу включительно) и часть массы моста, приведенная к перемещению концевых балок, кг; m_m – приведенная к середине пролета масса средних частей моста и порожней тележки, кг; m_g – масса груза, кг; c_m – коэффициент жесткости металлоконструкции крана в горизонтальной плоскости, Н/м; c_k – горизонтальная составляющая натяжения грузовых канатов, Н/м; k_m – коэффициент затухания колебаний металлоконструкции крана в горизонтальной плоскости, Н·с/м; x_k, x_m, x_g – пути, которые проходят, соответственно, массы m_k, m_m, m_g от начала координат, м; P_w – сила статического сопротивления передвижению крана, Н; $P_{\text{част}}$ – приведенная к ободу приводных ходовых колес движущая или тормозная сила привода при частотном управлении, Н

$$P_{\text{част}} = M \cdot \frac{u_m}{r} \cdot \eta^{\pm 1} = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k} \cdot \frac{u_m}{r} \cdot \eta^{\pm 1}, \quad (2)$$

где M и M_k - текущий и критический моменты двигателя, Н·м; u_m - передаточное число привода; r - радиус ходового колеса, м; $\eta^{\pm 1}$ - к.п.д. механизма передвижения крана (в двигательном режиме знак «+», в тормозных – знак «-»); s и s_k - текущее и критическое скольжения двигателя;

$$M_k = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_1^2}{\omega_{0н} \cdot x_{к.н} \cdot \left[f_{1*} \cdot \rho_{1к} \pm \sqrt{(f_{1*}^2 + \rho_{1к}^2) \cdot (f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)} \right]}; \quad (3)$$

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{f_{1*} \cdot x_{к.н}} \cdot \sqrt{\frac{f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2}{f_{1*}^2 + \rho_{1к}^2}}; \quad (4)$$

a – коэффициент, который определяется по формуле

$$a = \frac{R_1 \cdot f_{1*}^2}{R'_2 \cdot (f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)}; \quad (5)$$

U_1 - текущее значение фазного напряжения, В; $\omega_{0н}$ - синхронная скорость двигателя при номинальной частоте $f_{1н} = 50$ Гц, рад/с; $x_{к.н} = x_1 + x'_2$ - индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания при номинальной частоте (x_1 и x'_2 - соответственно, индуктивное фазное сопротивление обмоток статора и ротора, приведенное к обмотке статора), Ом; $f_{1*} = f_1 / f_{1н}$ - относительная частота тока статора (f_1 и $f_{1н}$ - текущее и номинальные значения частоты тока статора, соответственно, Гц); R_1 и R'_2 - активное фазное сопротивление обмоток статора и ротора, приведенное к обмотке статора, Ом; $\rho_{1к} = R_1 / x_{кн}$ и $\rho_{1\mu} = R_1 / x_{\muн}$ - относительные величины ($x_{\muн}$ - индуктивное сопротивление контура намагничивания при номинальной частоте, Ом).

Для обеспечения постоянства перегрузочной способности двигателя, значение фазного напряжения необходимо поддерживать согласно закону:

$$U_1 = U_{1н} \cdot \sqrt{\frac{f_{1*} \cdot \rho_{1к} \pm \sqrt{(f_{1*}^2 + \rho_{1к}^2) \cdot (f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)}}{\rho_{1к} \pm \sqrt{(1 + \rho_{1к}^2) \cdot (1 + \rho_{1\mu}^2)}}} \cdot \frac{M_c}{M_n}, \quad (6)$$

где U_{1H} - номинальное значение фазного напряжения, В; M_c - момент статического сопротивления на валу двигателя, Н·м; M_n - номинальный момент двигателя, Н·м.

В формуле (2) знак плюс перед радикалами относится к двигательному режиму, минус - к генераторному. При задании силы привода крана по формуле (2) с учетом (3)-(6) обеспечивается постоянство перегрузочной способности двигателя независимо от характера нагрузки. Механические характеристики асинхронного двигателя механизма передвижения крана при частотном управлении показаны на рис. 2.

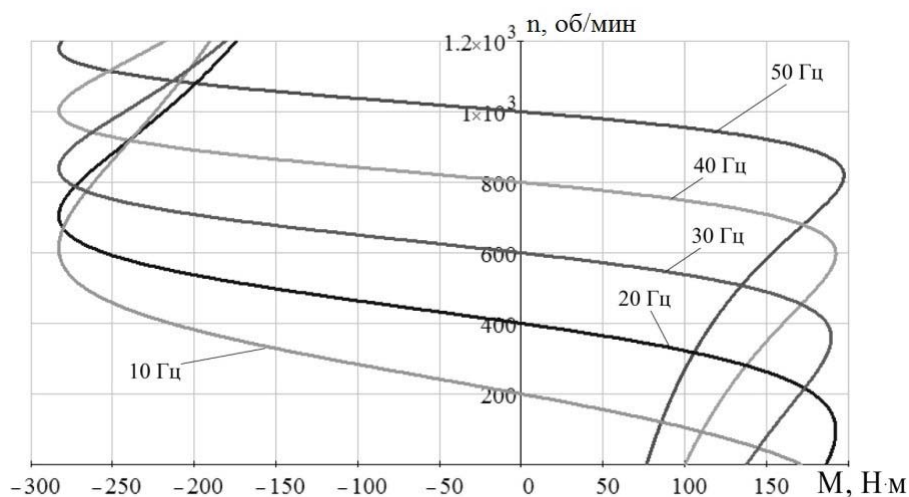


Рисунок 2 - Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном управлении

2. Программное обеспечение. Для реализации описанной выше математической модели разработана программа для исследования переходных режимов (пусковых и тормозных) при работе механизмов передвижения частотно-управляемых мостовых кранов, представленных в виде многомассовых расчетных схем. Язык разработки - объектно-ориентированная среда C # (C Sharp).

Блок-схема укрупненного алгоритма работы программы приведена на рис. 3. В результате работы программы на экран выводятся до пяти окон, содержащих графики (в функции времени), которые характеризуют изменение: перемещений, скоростей и ускорений приведенных масс; усилий, возникающих в упругих звеньях (приводе механизма, металлоконструкции и грузовых канатах). Кроме того, в окне с результатами выводится информационная панель с основными параметрами крана и переходного процесса, а также - максимальные значения указанных величин и время их возникновения для каждого из этапов переходного процесса (рис. 4).

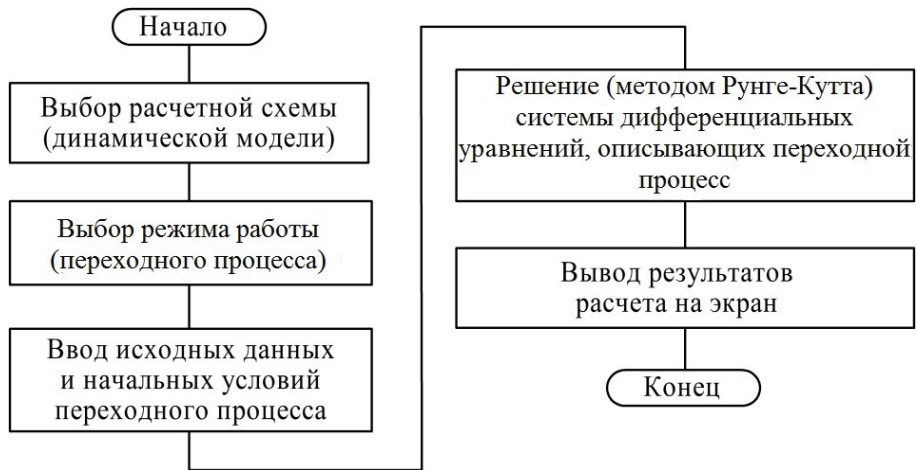


Рисунок 3 - Укрупненная блок-схема программы

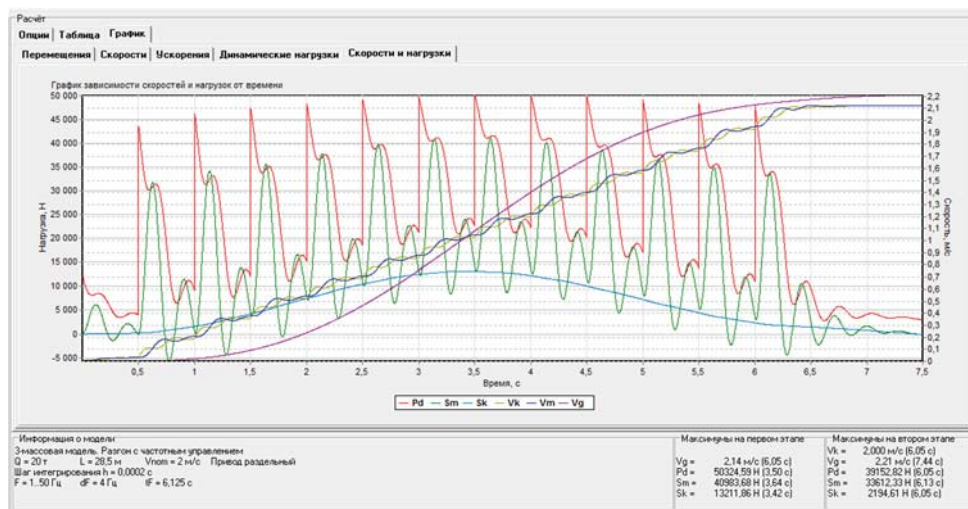


Рисунок 4 – Окно «Скорости и нагрузки» с результатами численного интегрирования типичного переходного процесса мостового крана

3. Анализ динамических нагрузок при торможении мостового крана с частотным управлением. С помощью разработанной компьютерной программы и теории планирования эксперимента был проведен анализ тормозных процессов мостового крана грузоподъемностью 20/5 т с частотно-управляемым электроприводом передвижения, а также построены полиномиальные модели динамических нагрузок и времени торможения крана.

В качестве варьируемых факторов были выбраны (см. табл. 1): время работы частотного преобразователя T_B на одной частоте, шаг изменения частоты $hч$, скорость передвижения крана V_m , на которой выключается двигатель и срабатывает колодочный тормоз.

Для оценок максимальных горизонтальных динамических нагрузок и времени торможения мостового крана была выбрана полиномиальная модель второго порядка:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i z_i + \sum_{i,l=1; i \neq l}^k b_{il} z_i z_l + \sum_{i=1}^k b_{ii} (z_i)^2, \quad (7)$$

где \hat{y} - оценка параметра, который аппроксимируется полиномом; b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} - коэффициенты регрессии; k - число факторов.

Таблица 1 - Уровни факторов и интервалы их варьирования для мостового крана г/п 20/5 т.

Область определения факторов	T_B, c	$h_{\Gamma}, \Gamma_{\Gamma}$	$V_m, m/c$
Код (z_i)	z_1	z_2	z_3
Основной уровень (код 0)	0,20	1,5	0,6
Интервал варьирования (Δz_i)	0,025	1,0	0,4
Верхний уровень (код +1)	0,225	2,5	1,0
Нижний уровень (код -1)	0,175	0,5	0,2
Звездная точка (код +1)	0,225	2,5	1,0
Звездная точка (код -1)	0,175	0,5	0,2
Дополнительная звездная точка (код +0,5)	0,2125	2,0	0,8
Дополнительная звездная точка (код -0,5)	0,1875	1,0	0,4

Поскольку число факторов $k = 3$, то общее число коэффициентов математической модели (7) равно

$$\lambda = \frac{(k+1) \cdot (k+2)}{2} = \frac{(3+1) \cdot (3+2)}{2} = 10, \quad (8)$$

а модель примет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + b_3 \cdot z_3 + b_{12} \cdot z_1 \cdot z_2 + b_{13} \cdot z_1 \cdot z_3 + b_{23} \cdot z_2 \cdot z_3 + b_{11} z_1^2 + b_{22} z_2^2 + b_{33} z_3^2. \quad (9)$$

Для проведения регрессионного анализа необходимо выбрать план проведения эксперимента. Поскольку эксперимент и регрессионный анализ проводятся на ЭВМ, то сложность обработки результатов эксперимента и число опытов плана не является главным критерием при выборе плана.

Воспользуемся планом второго порядка, построенным на основе квази- D -оптимального плана типа B_K [13]. Эти планы по величине определителя информационной матрицы и максимальной по кубу дисперсии предсказанных значений регрессионной функции сравнительно мало отличаются от D -оптимальных планов, а по

минимальной и средней дисперсии даже имеют некоторое преимущество.

Общее число опытов плана B_K определяется формулой:

$$N_B = N_1 + 2k, \tag{10}$$

где $N_1 = 2^k$ - число опытов ядра плана, которое является полным факторным экспериментом при варьировании факторов на двух уровнях; $2k$ - число опытов в звездных точках плана.

План, построенный на базе плана B_3 , представлен в таблице 2 (графы 2-4). В графах 5-7 показаны натуральные значения кодированных факторов, а в графах 8-10 показаны результаты компьютерного эксперимента, расчетные значения и их разность для динамических нагрузок P_M в металлоконструкции крана.

Таблица 2 - Динамические нагрузки P_M в металлоконструкции мостового крана г/п 20/5 т при торможении с частотным управлением

№ опыта	z_1	z_2	z_3	$T_B, \text{с}$	$h_{\text{ц}}, \text{Гц}$	$V_m, \text{м/с}$	$P_M, \text{кН}$	$\hat{P}_M, \text{кН}$	$\Delta P_M, \text{кН}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	0,225	2,5	1,0	-37,4	-38,1	0,7
2	1	1	-1	0,225	2,5	0,2	-43,8	-43,9	0,1
3	1	-1	1	0,225	0,5	1,0	-33,2	-34,2	1,0
4	1	-1	-1	0,225	0,5	0,2	-30,1	-30,8	0,7
5	-1	1	1	0,175	2,5	1,0	-40,0	-40,4	0,4
6	-1	1	-1	0,175	2,5	0,2	-46,8	-46,2	-0,6
7	-1	-1	1	0,175	0,5	1,0	-31,2	-31,9	0,7
8	-1	-1	-1	0,175	0,5	0,2	-28,6	-28,6	0,0
9	0	0	0	0,20	1,5	0,6	-27,6	-28,2	0,6
10	1	0	0	0,225	1,5	0,6	-29,5	-28,2	-1,3
11	-1	0	0	0,175	1,5	0,6	-28,5	-28,2	-0,3
12	0	1	0	0,20	2,5	0,6	-42,6	-41,7	-0,9
13	0	-1	0	0,20	0,5	0,6	-32,0	-30,9	-1,1
14	0	0	1	0,20	1,5	1,0	-27,6	-28,1	0,5
15	0	0	-1	0,20	1,5	0,2	-27,6	-29,3	1,7
16	0,5	0	0	0,213	1,5	0,6	-27,8	-28,2	0,4
17	-0,5	0	0	0,188	1,5	0,6	-28,2	-28,2	0,0
18	0	0,5	0	0,20	2,0	0,6	-35,5	-32,9	-2,6
19	0	-0,5	0	0,20	1,0	0,6	-30,8	-27,5	-3,3
20	0	0	0,5	0,20	1,5	0,8	-27,6	-28,0	0,4
21	0	0	-0,5	0,20	1,5	0,4	-27,6	-28,6	1,0

По аналогичной методике были проведены компьютерные эксперименты для динамических нагрузок P_K , действующих на груз, а также для времени торможения крана t_m с частотным управлением привода передвижения крана.

После обработки результатов компьютерного эксперимента были рассчитаны коэффициенты регрессии и получены аппроксимирующие полиномы (11-13) для расчета и исследования динамических нагрузок P_M и P_K , а также времени торможения крана t_m :

$$\hat{P}_M = -28,2 - 5,4Z_2 + 0,6Z_3 + 1,15Z_1Z_2 + 2,3Z_2Z_3 - 8,1Z_2^2 - 0,45Z_3^2; \quad (11)$$

$$\hat{P}_K = -13,5 + 1,25Z_1 - 6,0Z_2 - 0,5Z_3 + 0,6Z_1Z_2 - 2,2Z_2Z_3 - 1,1Z_2^2 - 0,15Z_3^2; \quad (12)$$

$$\hat{t}_m = 6,3 + 0,8Z_1 - 5,3Z_2 - 0,7Z_3 - 0,7Z_1Z_2 - 0,3Z_1Z_3 + 1,6Z_2Z_3 + 4,26Z_2^2. \quad (13)$$

Поскольку нами проводился компьютерный эксперимент, то проверку адекватности аппроксимирующего полинома невозможно осуществить по традиционному критерию Фишера, поскольку ошибка повторного «опыта» в каждой точке плана и дисперсия опытов равны нулю. Поэтому степень рассеяния оценок уравнений регрессии (11-13) оценивалась коэффициентом вариации по формуле

$$\rho = \frac{1}{y_{cp}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{N - \lambda}}, \quad (14)$$

где λ - число коэффициентов уравнения регрессии; α - уровень значимости (принятый равным 0,05). Уравнение регрессии считается адекватным, если $\rho < \alpha$. В нашем случае величина коэффициента вариации ρ не превышала 0,05.

Полученные уравнения регрессии (11 - 13) могут использоваться для расчета P_M , P_K и t_m при любых значениях факторов T_B, h_{Γ}, V_m в исследованной области их определения. При этом точность расчета динамических нагрузок почти такая же, как и при решении системы дифференциальных уравнений (1). Кроме того, уравнение регрессии позволяют исследовать влияние каждого фактора и их взаимодействие на величину максимальных динамических нагрузок.

На рис. 5, 6 приведены графики переходных процессов при торможении мостового крана г/п 20/5 т при частотном управлении, а на рис. 7-9 - графики зависимостей максимальных динамических нагрузок P_M , P_K и времени торможения крана t_m от изменения шага частоты преобразователя h_{Γ} .

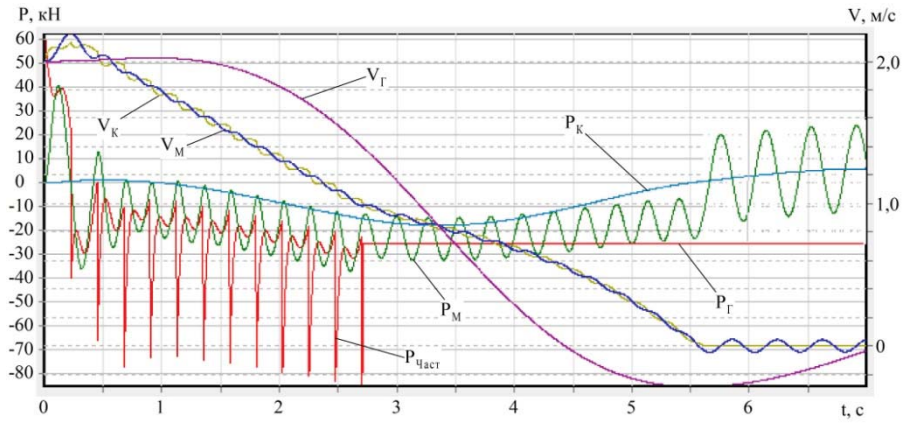


Рисунок 5 - Графики торможения мостового крана г/п 20/5 т при частотном управлении (Опыт №1: $T_B = 0,225$ с, $h_{\text{ч}} = 2,5$ Гц, $V_m = 1,0$ м/с)

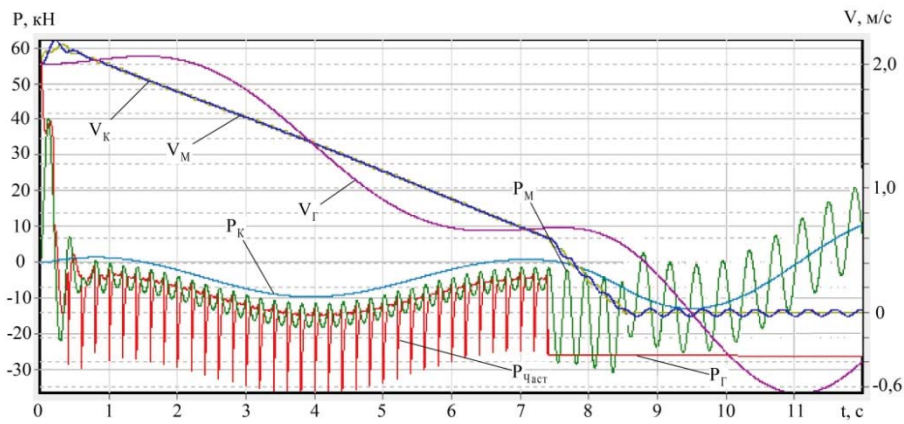


Рисунок 6 - Графики торможения мостового крана г/п 20/5 т при частотном управлении (Опыт №19: $T_B = 0,2$ с, $h_{\text{ч}} = 1,0$ Гц, $V_m = 0,6$ м/с)

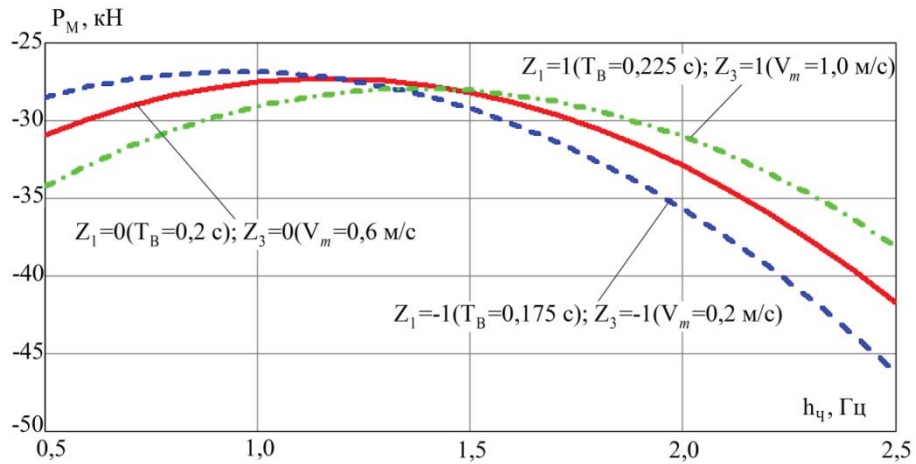


Рисунок 7 – Зависимость максимальных динамических нагрузок P_M от изменения шага частоты частотного преобразователя $h_{\text{ч}}$

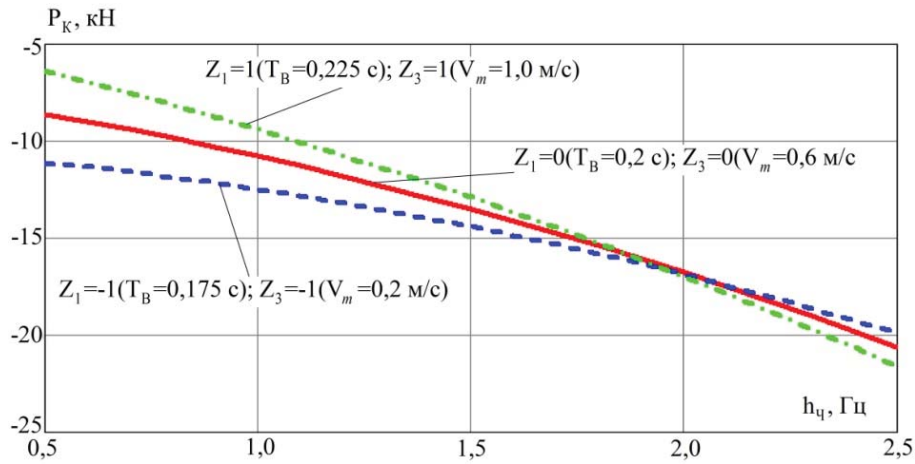


Рисунок 8 - Зависимость максимальных динамических нагрузок P_K от изменения шага частоты преобразователя h_q

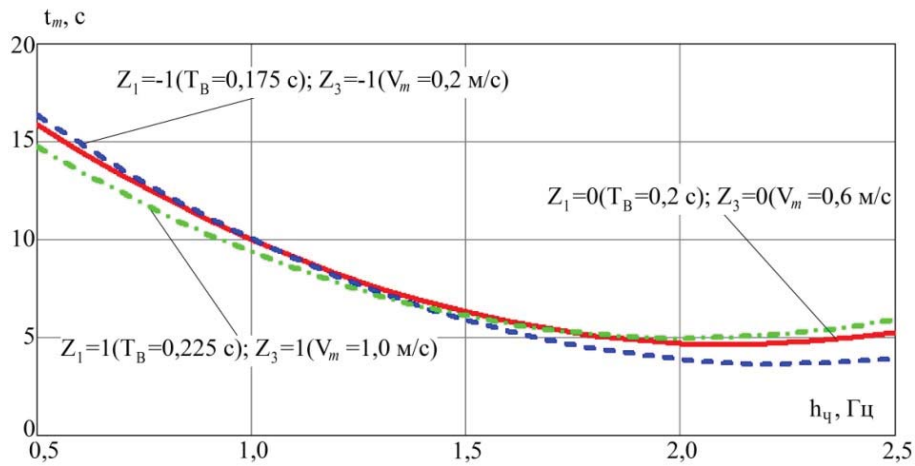


Рисунок 9 - Зависимость времени торможения крана t_m от изменения шага частоты частотного преобразователя h_q

Для практических расчетов динамических нагрузок удобны графики линий равных откликов параметров P_M и P_K (рис. 10), которые аппроксимируются уравнениями регрессии (11)-(13) в зависимости от времени работы частотного преобразователя z_1 и шага изменения частоты z_2 при фиксированном значении z_3 (например, $z_3 = 0$). Отметим, что рассчитывать максимальные динамические нагрузки и время торможения крана с помощью формул (11)-(13) и линий равных откликов (на рис. 10) можно только для рассмотренного мостового крана в исследованной области определения факторов.

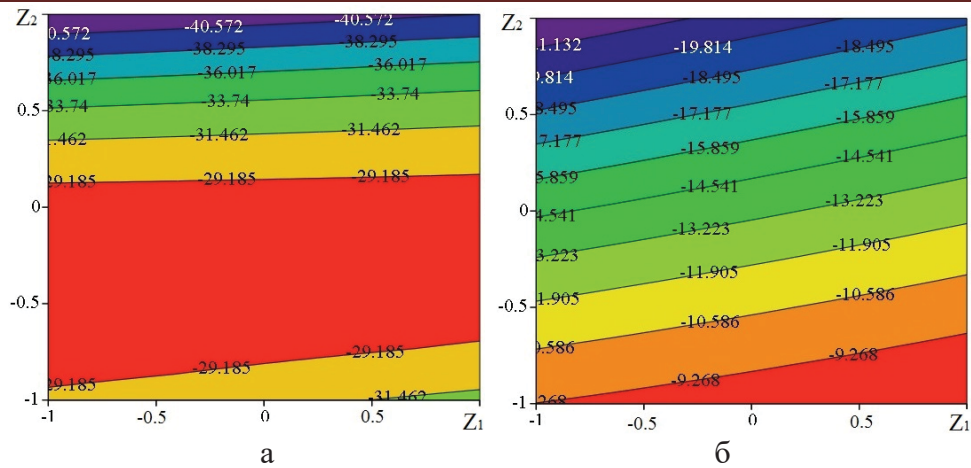


Рисунок 10 - Линии равных откликов динамических нагрузок P_M (а) и P_K (б) при: $z_1=-1...+1$ ($T_B=0,175...0,225$ с), $z_2=-1...+1$ ($h_f=0,5...2,5$ Гц), $z_3=0$ ($V_m=0,6$ м/с)

Выводы:

- динамические нагрузки в металлоконструкции крана и горизонтальные усилия, действующие на груз, имеют общую тенденцию к снижению при уменьшении шага изменения частоты и увеличении времени работы частотного преобразователя;

- с увеличением шага изменения частоты от 0,5 до 2,5 Гц динамические нагрузки на металлоконструкцию крана и динамические нагрузки, действующие на груз, возрастают соответственно на 60% и на 42 - 70%, а время торможения крана уменьшается в три раза;

- при увеличении времени работы частотного преобразователя (от 0,175 до 0,225 с) на одной частоте, наблюдается рост времени торможения крана до 20%, а динамические нагрузки на металлоконструкцию крана и динамические нагрузки на груз изменяются от 8 до 15%;

- с увеличением скорости передвижения крана, при которой срабатывает колодочный тормоз, с 0,2 до 1,0 м/с динамические нагрузки на металлоконструкцию крана изменяются в пределах 14%, а динамические нагрузки, действующие на груз – от 28 до 58%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко.- М.: Академия, 2007. - 360 с.
3. Ловейкин В.С. Анализ динамики механизма передвижения мостового крана с частотным управлением привода / В.С. Ловейкин, Ю.А. Ромасевич // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. –

№3. – С. 1–10.

4. Григоров О.В. Аналіз пуско-гальмівних процесів кранових механізмів з частотно-регульованим приводом / О.В. Григоров, В.В. Стрижак // Вестник ХНАДУ. – 2012. - Вып. 57. – С. 249-256.

5. Збітнєв П.В. Математична модель приведеної сили електропривода крана з частотним управлінням / П.В. Збітнєв, О.Б. Неженцев // Тези доповідей всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів «Інновації молоді - машинобудуванню». Секція «Машинобудування», підсекція «Прикладна механіка». – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 23-25.

6. Збітнєв П.В. Зниження динамічних навантажень при гальмуванні мостового крана з частотним керуванням / П.В. Збітнєв, О.Б. Неженцев // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей V Міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016.) / Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – С. 207-208.

7. Збитнев П.В. К вопросу снижения динамических нагрузок при торможении частотно-управляемого мостового крана / П.В. Збитнев, А.Б. Неженцев // Майбутній науковець – 2016: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. 2 груд. 2016 р., м. Сєвєродонецьк. Ч.ІІ. – Сєвєродонецьк: Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля, 2016. – С. 102-105.

8. Zbitniev P. Analysis of the dependence between loads of an overhead crane and the parameters of a frequency control / P. Zbitniev, O. Nyezhenstsev // International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2016», 16-18 of November 2016 in KNUGA. – Kyiv: KNUGA, 2016. – P. 181.

9. РТМ 24.090.28–77. Краны грузоподъемные. Механизм передвижения. Метод расчета.

10. Ловейкін В.С. Динамічна оптимізація режиму руху кранового механізму переміщення / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич // Підйомно-транспортна техніка. - 2013. - № 3. - С. 5-21.

11. Неженцев А.Б. Оптимизация механических характеристик привода передвижения мостового крана в режиме двухступенчатого противовключения / А.Б. Неженцев, П.В. Збитнев // Вісник Східноукраїнського національного ун-ту ім. В.Даля, №7(224). – Сєвєродонецьк: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2015. – С. 36-42.

12. 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. – 2003. – №4. – С. 33–48.

13. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (Справочное издание) / [Бродский В.З., Бродский Л.И., Голикова Т.И. и др.] – М.: Металлургия, 1982.- 752 с.