

УДК 621.873

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА В РЕЖИМЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ

Неженцев А.Б., Збитнев П.В.

OPTIMIZATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF DRIVE OF BRIDGE CRANE IN MODE OF TWO-STAGE PLUGGIN BRAKING

Nezhentsev A.B., Zbitniev P.V.

Выполнен поиск оптимальных механических характеристик привода передвижения мостового крана грузоподъемностью 10 т и пролетом 22,5 м в режиме двухступенчатого противовключения. В качестве критерия оптимизации принята обобщенная функция желательности, включающая: время торможения крана, максимальные динамические нагрузки, действующие на металлоконструкцию крана и на груз, а также потери энергии при торможении противовключением. Найденные оптимальные механические характеристики позволили более чем в два раза снизить динамические нагрузки на металлоконструкцию крана и амплитуду раскачивания груза, а также на 20% уменьшить потери электроэнергии.

Ключевые слова: мостовой кран, торможение противовключением, динамические нагрузки, потери энергии, многопараметрическая оптимизация

Введение. Процессы торможения мостовых кранов, эксплуатируемых в Украине, сопровождаются большими динамическими нагрузками [1, 2, 3]. Это обусловлено как устаревшими релейно-контакторными системами управления крановыми электроприводами, так и неоптимальными режимами их работы. Ввиду многих недостатков автоматических нормально-замкнутых колодочных тормозов, широкое применение получило торможение противовключением, которое позволяет крановщикам управлять процессом торможения и уменьшать раскачивание грузов. При этом процесс торможения крана зависит главным образом от квалификации крановщика, а параметры торможения (время торможения крана, динамические нагрузки, действующие на металлоконструкцию крана и груз) имеют неопределенный характер.

Кроме того, в настоящее время отсутствуют убедительные рекомендации по выбору механических характеристик приводов передвижения кранов в режиме противовключения, обеспечивающих минимальные динамические нагрузки при максимальном быстродействии.

Существенным недостатком торможения противовключением являются повышенные потери энергии [4, 5] и повышенный нагрев двигателей, существенно снижающий срок их службы. Но до настоящего времени оценкам потерь энергии в крановых приводах практически не уделялось внимания и они не рассматривались в качестве важного показателя эффективности переходных процессов. Поэтому публикаций по этой теме очень мало.

Вместе с тем, практика эксплуатации мостовых кранов (в первую очередь тяжелого режима работы: группы классификации А6-А8) показывает, что механизмы передвижения совершают 12-17 (и выше) циклов (и, следовательно, торможений противовключением) в час. При этом потери энергии за одно торможение противовключением, например, мостового крана г/п 10 т составляют около 0,07 кВт·час, за год – более 5800 кВт·час. Для кранов больших грузоподъемностей годовые потери энергии будут существенно выше. Следовательно, решение задачи снижения потерь энергии обещает большой экономический эффект и имеет важное значение для промышленности в целом.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [6, 7] проведена оптимизация механических характеристик при динамическом торможении мостового крана, которая позволила значительно снизить динамические нагрузки на металлоконструкцию и амплитуду раскачивания груза. Однако реализация полученных оптимальных характеристик на эксплуатируемых мостовых кранах требует установки дополнительного электрооборудования, что повышает эксплуатационные затраты.

Работа [8] посвящена поиску законов оптимального управления механизмов передвижения грузоподъемных машин. Авторами математически обоснован способ устранения колебаний груза при разгоне и перемещении крана, а также синтезирован

рациональный способ управления движением крана с помощью частотного преобразователя. Однако, в этой работе рассмотрен только разгон и перемещение крана, а вопросы торможения крана не исследовались, несмотря на то, что раскачивание груза при остановке и позиционировании крана являются более важными, чем при его разгоне. Кроме того, из примерно 40 тыс. мостовых кранов, эксплуатирующихся в Украине лишь единицы оснащены частотными преобразователями, позволяющими реализовать тормозные режимы, а массовое их применение представляется весьма отдаленной перспективой.

В работе [9] решена задача минимизации среднеквадратического значения усилия, действующего в главной балке мостового крана, при перемещении груза в горизонтальной плоскости. Но также как и в предыдущей работе рассмотрен только процесс пуска крана.

В работе [10] выполнен расчет оптимальной по динамическим нагрузкам механической характеристики при торможении двухступенчатым противовключением механизма передвижения грузоподъемного крана. Однако, в обобщенном критерии не учитывался один из важнейших параметров торможения электродвигателем - потери энергии, которые для торможения противовключением весьма высоки и являются его существенным недостатком.

Цель статьи - развитие методики и изложение результатов поиска оптимальных механических характеристик электропривода передвижения мостового крана в режиме торможения двухступенчатым противовключением.

Материалы и результаты исследований. Поиск оптимальных механических характеристик привода передвижения мостового крана г/п 10 т и пролетом 22,5 м в режиме двухступенчатого противовключения осуществлялся методом «крутого восхождения» (Бокса-Уилсона). В качестве критерия оптимизации использовалась обобщенная функция желательности D [11], в которую были включены следующие параметры: время торможения крана t_T , максимальные значения динамических нагрузок, действующие на металлоконструкцию крана P_M^{\max} и груз P_K^{\max} , потери энергии в электроприводе $DE^{\text{прот}}$.

Значения параметров оптимизации t_T , P_M^{\max} , P_K^{\max} , и $DE^{\text{прот}}$ определялись по результатам численного интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений (1), описывающей процесс торможения двухступенчатого противовключения мостового крана, представленного трехмассовой расчетной схемой, представленной на рис. 1 [3, 5, 6, 7]. При этом максимальные значения переменных P_M^{\max} , P_K^{\max} , и $DE^{\text{прот}}$ вычислялись на каждом шаге интегрирования с помощью программного комплекса [12].

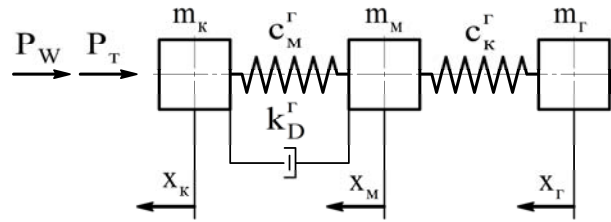


Рис. 1. Трехмассовая схема мостового крана

$$\begin{cases} m_k \cdot \ddot{x}_k + c_m^r \cdot (x_m - x_k) + \\ + k_D^r \cdot (\dot{x}_m - \dot{x}_k) = P_w + P_{\text{пр}}(\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \tilde{z}_3); \\ m_m \cdot \ddot{x}_m - c_m^r \cdot (x_m - x_k) - \\ + k_D^r \cdot (\dot{x}_m - \dot{x}_k) + c_k^r \cdot (x_g - x_m) = 0; \\ m_g \cdot \ddot{x}_g - c_k^r \cdot (x_g - x_m) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где: m_k - приведенная к ходовым колесам масса вращающихся частей механизма передвижения и масса моста, приведенная к перемещению концевых балок; m_m - приведенная к середине пролета масса средних частей моста и порожней тележки; m_g - масса груза; c_m^r - коэффициент жесткости металлоконструкции крана в горизонтальной плоскости; c_k^r - горизонтальная составляющая натяжения грузовых канатов при $(x_m - x_g) = 1$; k_D^r - коэффициент затухания колебаний металлоконструкции в горизонтальной плоскости; $P_{\text{пр}}$ - приведенная к ходовым колесам сила привода в режиме торможения противовключения; P_w - сила статического сопротивления передвижению крана; $\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \tilde{z}_3$ - факторы, задающие вид механической характеристики привода; x_k, x_m, x_g - пути, проходимые массами m_k, m_m, m_g от начала координат.

Приведенная сила электропривода в режиме торможения противовключением

$$P_{\text{пр}} = \frac{K_q \cdot (v_0 + \dot{x}_k)}{B_q + (v_0 + \dot{x}_k)^2}, \quad (2)$$

где $K_q = 2 \cdot M_k \cdot s_{\text{кк}} \cdot v_0 \cdot u \cdot z / r_k$; $B_q = s_{\text{кк}}^2 \cdot v_0^2$; $M_k = \lambda \cdot M_n$ - максимальный момент двигателя; M_n - номинальный момент двигателя; $s_{\text{кк}}$ - критическое скольжение на механической характеристике q ; v_0 - скорость передвижения крана, соответствующая синхронной частоте вращения ротора двигателя.

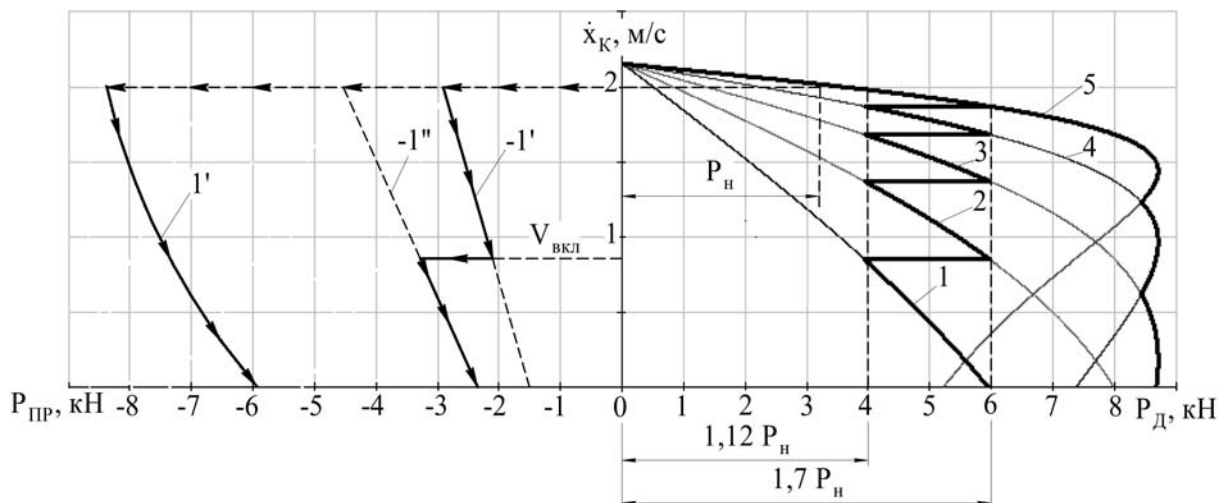


Рис. 2. Механические характеристики привода передвижения мостового крана г/п 10 т пролетом 22,5 м

На рис. 2 показаны механические характеристики привода механизма передвижения крана в двигательном режиме (характеристики 1-5) и режиме торможения противовключением (характеристики 1', -1', -1'').

Для построения обобщенной функции желательности D получены зависимости, позволяющие преобразовывать значения параметров $t_{тi}$, $P_{ми}^{max}$, $P_{ки}^{max}$, $DE_i^{прот}$ в значения безразмерных частных функций желательностей $d_{1i} = f_1(t_{тi})$, $d_{2i} = f_2(P_{ми}^{max})$, $d_{3i} = f_3(P_{ки}^{max})$, $d_{4i} = f_4(DE_i^{прот})$:

$$d_{1i} = \exp[-((2 \cdot t_{тi} - (10 + 2))/(10 - 2))^{2,164}]; \quad (3)$$

$$d_{2i} = \exp[-\exp(-5,564 + 0,371 \cdot P_{ми}^{max})]; \quad (4)$$

$$d_{3i} = \exp[-\exp(-5,934 + 0,741 \cdot P_{ки}^{max})]; \quad (5)$$

$$d_{4i} = \exp[-\exp(-5,5315 + 0,02215 \cdot DE_i^{прот})]. \quad (6)$$

На рис. 3 представлены графики частных функций желательностей $d_1, d_{2,3,4}$, безразмерная шкала y' , а также шкалы перевода значений параметров $t_{тi}$, $P_{ми}^{max}$, $P_{ки}^{max}$, $DE_i^{прот}$ в значения частных желательностей.

Значение обобщенной функции желательности D_i в i -ом опыте компьютерного эксперимента определялось по выражению

$$D_i^o = \sqrt[4]{d_{1i} \cdot d_{2i} \cdot d_{3i} \cdot d_{4i}} \quad (7)$$

В режиме двухступенчатого торможения противовключением механическая характеристика электропривода однозначно задается тремя факторами: S_{k1} и S_{k2} – критические скольжения, соответственно, на первой и второй ступенях торможения; $V_{вкл}$ – скорость крана, при которой

происходит переключение с механической характеристики (-1') на характеристику (-1'') – см. рис. 2.

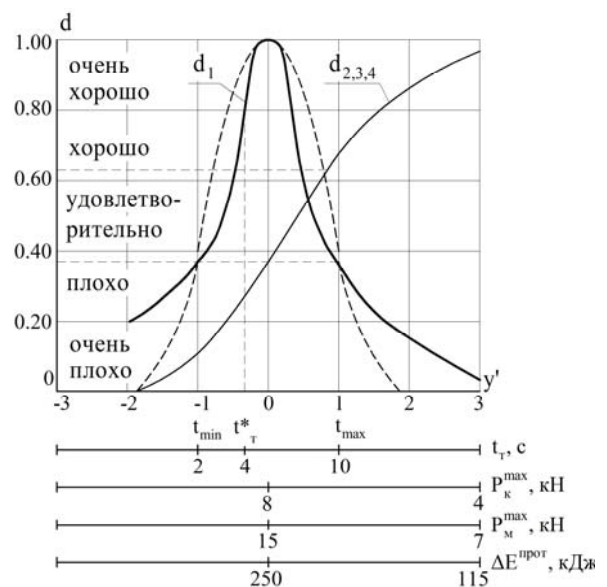


Рис. 3. Графики функций желательностей

На первом этапе оптимизации методом крутого восхождения начальная локальная область пространства D_i была описана полиномом первой степени

$$D_i^p = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j \cdot Z_{ji}, \quad (8)$$

где D_i^p – оценка аппроксимируемого обобщенного критерия; Z_j – кодированные значения варьируемых факторов (S_{k1} , S_{k2} и $V_{вкл}$); b_0, b_j – коэффициенты регрессии; k – число факторов.

Для расчета коэффициентов уравнения регрессии (8) осуществлен полный факторный эксперимент 2^3 , условия проведения которого представлены в табл. 1, а результаты – в табл. 2.

В графах 4-6 табл. 2 показаны параметры процессов торможения противовключением крана в каждом опыте, в графах 9-12 - рассчитанные по формулам (3)–(6) значения частных функций желательностей, а в графе 13 – экспериментальные значения обобщенной функции желательности D_i^3 .

Таблица 1
Условия проведения полного факторного эксперимента 2^3

Уровни факторов и интервалы варьирования	s_{k1}	s_{k2}	$V_{вкл}$, м/с
Коды (Z_j)	Z_1	Z_2	Z_3
Основные уровни (код 0)	10,0	6,0	1,0
Интервалы варьирования (ΔZ_j)	2,0	1,0	0,2
Верхние уровни (код +1)	12,0	7,0	1,2
Нижние уровни (код -1)	8,0	5,0	0,8

По результатам обработки полученных значений D_i^3 в начальной области методом наименьших квадратов рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии:

$$D^P = 0,836 + 0,002375 \cdot Z_1 + 0,017 \cdot Z_2 - 0,005375 \cdot Z_3 \quad (9)$$

Адекватность уравнения регрессии (9) проверялась с помощью коэффициента вариации по выражению

$$c = \frac{1}{b_0} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i^3 - D_i^P)^2}{N - l}} \leq \bar{b} \quad (10)$$

где N – число опытов; λ – число коэффициентов уравнения регрессии; \bar{b} – уровень значимости ($\bar{b} = 0,05$). Коэффициент вариации ρ оказался равным 0,043, что свидетельствует об адекватности уравнения (9). Значения обобщенной функции желательности D_i^P , рассчитанные по уравнению (9) приведены в графе 14 табл. 2.

Условия проведения опытов и результаты круглого восхождения по поверхности отклика представлены в табл. 3. Крутое восхождение начато из точки начальной области, соответствующей основным уровням варьируемых факторов Z_1, Z_2, Z_3 (см. опыт №0, табл. 3). Шаг круглого восхождения для фактора Z_2 принят равным $h_2 = 0,1$, а для факторов Z_1 и Z_3 рассчитан из соотношений:

$$h_1 = h_2 \cdot \frac{b_1 \cdot DS_{K1}}{b_2 \cdot DS_{K2}} = 0,1 \cdot \frac{(0,002375) \cdot 2,0}{(0,017) \cdot 1,0} = 0,0279;$$

$$h_3 = h_2 \cdot \frac{b_3 \cdot DV_{вкл}}{b_2 \cdot DS_{K2}} = 0,1 \cdot \frac{(-0,005375) \cdot 0,2}{(0,017) \cdot 1,0} = -0,0063 \text{ м/с.}$$

После округления принимаем $h_1 = 0,028$; $h_2 = 0,1$; $h_3 = -0,0065$ м/с.

Из табл. 3 видно, что первая серия опытов круглого восхождения позволила повысить значение обобщенного критерия с $D_i^3 = 0,853$ в начальной точке (опыт №0) до $D_i^3 = 0,877$ (в опыте №12). При этом максимальные нагрузки на металлоконструкцию крана P_m^{\max} снизились с 9048 Н до 8840 Н, на груз P_k^{\max} – с 6500 Н до 5610 Н, а потери энергии $DE^{\text{прот}}$ – с 151 кДж до 140,6 кДж.

Таблица 2

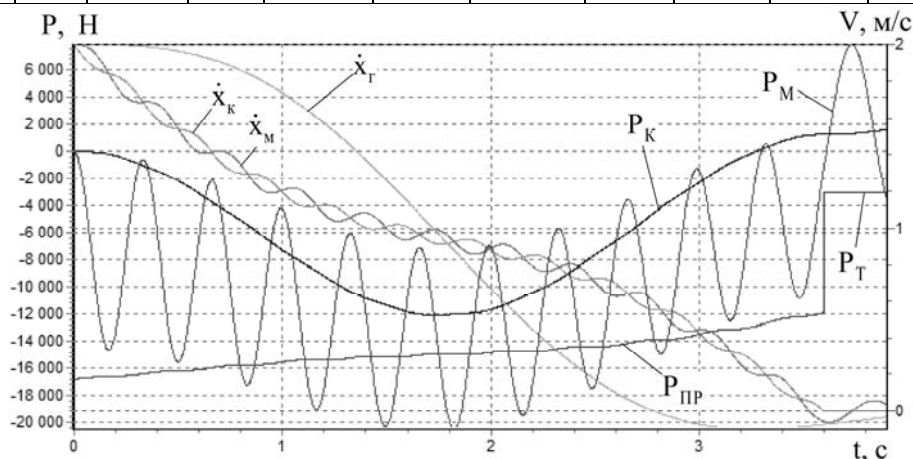
План и результаты полного факторного эксперимента 2^3

№	s_{k1}	s_{k2}	$V_{вкл}$, м/с	$t_{тi}$, с	P_{mi}^{\max} , кН	P_k^{\max} , кН	$DE^{\text{прот}}$, кДж	d_{1i}	d_{2i}	d_{3i}	d_{4i}	D_i^3	D_i^P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	12	7	1,2	7,74	8,545	5,978	139,034	0,848	0,915	0,805	0,918	0,870	0,850
2	8	7	1,2	7,22	10,575	6,181	150,418	0,926	0,827	0,775	0,896	0,854	0,845
3	12	5	1,2	7,15	10,624	7,457	160,041	0,935	0,824	0,516	0,872	0,767	0,816
4	8	5	1,2	6,56	10,575	6,613	171,425	0,986	0,827	0,703	0,838	0,832	0,811
5	12	7	0,8	8,89	7,964	4,637	131,920	0,610	0,931	0,923	0,929	0,835	0,861
6	8	7	0,8	7,28	10,575	6,181	148,993	0,913	0,827	0,775	0,898	0,853	0,856
7	12	5	0,8	8,10	7,964	4,637	145,924	0,780	0,931	0,923	0,905	0,872	0,827
8	8	5	0,8	6,87	10,770	7,151	162,999	0,964	0,815	0,590	0,864	0,796	0,822

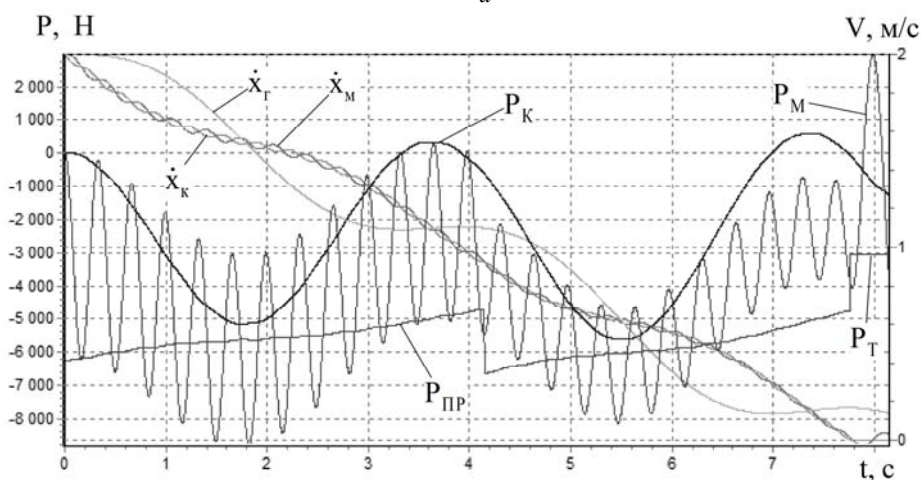
Таблиця 3

План и результаты опытов кругого восхождения

№	s_{k1}	s_{k2}	$V_{вкл}$, м/с	$t_{тi}$, с	P_{mi}^{max} , кН	P_k^{max} , кН	$ДЕ^{прот}$ кДж	d_{i1}	d_{2i}	d_{3i}	d_{4i}	D_i^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.	10,0	6,0	1,0	7,33	9,048	6,500	151,115	0,912	0,898	0,723	0,894	0,853
1.	10,028	6,1	0,9935									
2.	10,056	6,2	0,9870	7,39	9,013	6,352	147,905	0,903	0,899	0,748	0,900	0,860
3.	10,084	6,3	0,9805									
4.	10,112	6,4	0,9740	7,48	8,978	6,224	148,134	0,890	0,901	0,768	0,900	0,863
5.	10,140	6,5	0,9675									
6.	10,168	6,6	0,9610	7,60	8,941	5,951	145,591	0,871	0,902	0,807	0,905	0,870
7.	10,196	6,7	0,9545									
8.	10,224	6,8	0,9480	7,64	8,907	5,840	149,880	0,865	0,903	0,821	0,896	0,871
9.	10,252	6,9	0,9415									
10.	10,28	7,0	0,9350	7,69	8,873	5,721	141,918	0,856	0,904	0,834	0,912	0,876
11.	10,308	7,1	0,9285	7,72	8,857	5,668	140,852	0,851	0,905	0,840	0,914	0,877
12.	10,336	7,2	0,9220	7,77	8,840	5,610	140,555	0,843	0,905	0,847	0,915	0,877
13.	10,364	7,3	0,9155	7,81	8,824	5,571	140,488	0,835	0,906	0,851	0,915	0,876
14.	10,392	7,4	0,9090	7,87	8,806	5,501	140,085	0,825	0,906	0,858	0,916	0,875



а



б

Рис. 4. Торможение крана противовключением электродвигателей:
а – по характеристике 1'; б – по оптимальной характеристике (-1')-(-1'')

Если же сравнить полученные результаты двухступенчатого торможения противовключением (опыт № 12, табл. 3) с традиционным торможением противовключением по механической характеристике, соответствующей первому положению контроллера (характеристика 1' на рис. 2), то максимальные нагрузки на металлоконструкцию крана P_m^{\max} и груз P_k^{\max} снизились более чем в 2 раза, а потери энергии $DE^{\text{прот}}$ - более чем на 20%.

При этом длительность процесса торможения крана составила 7,77 с, что является приемлемым и не превышает общепринятых рекомендаций. На рис. 4 приведены графики процесса торможения мостового крана в режиме противовключения по характеристике 1' (рис 4, а) и двухступенчатого торможения противовключением крана по найденной характеристике (-1')-(-1'') (рис 4, б).

Авторами были сделаны попытки продолжить поиск лучшего решения, путем проведения второй серии опытов крутого восхождения взяв в качестве начальной точки значения факторов S_{k1} , S_{k2} и $V_{\text{вкл}}$ из опыта № 12 (табл. 3). Для этого был проведен второй полный факторный эксперимент 2^3 с центром в указанной точке аналогично описанному выше.

После обработки полученных значений D_1^3 рассчитаны коэффициенты нового уравнения регрессии. Определены величины шагов для всех факторов и реализовано второе крутое восхождение. Однако заметного улучшения обобщенного параметра оптимизации во второй серии опытов крутого восхождения получить не удалось. Это свидетельствует о том, что достигнута «почти стационарная» локальная область, где движение по направлению градиента малоэффективно.

Поэтому полученные при первом крутом восхождении механические характеристики двухступенчатого торможения противовключением (-1')-(-1'') (рис. 2) можно считать близкими к оптимальным (см. опыт № 12, табл. 3) и рекомендовать их для торможения мостовых кранов г/п 10 т.

Выводы. 1. Усовершенствованная методика поиска оптимальных механических характеристик электропривода передвижения мостового крана в режиме двухступенчатого торможения противовключением является эффективным инструментом повышения технико-экономических показателей эксплуатируемых в настоящее время грузоподъемных кранов.

2. В результате оптимизации механических характеристик электропривода передвижения мостового крана грузоподъемностью 10 т и пролетом 22,5 м в режиме двухступенчатого торможения противовключением максимальные нагрузки на металлоконструкцию крана и груз

снизились более чем в 2 раза, а потери энергии - более чем на 20%.

Литература

1. Гайдамака В.Ф. Работа грузоподъемных машин при бесступенчатом торможении. – Х.: Вища школа. Изд-во при ХГУ, 1988. - 141 с.
2. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов. - М.: Машиностроение, 1987. - 160 с.
3. Будиков Л.Я., Неженцев А.Б., Нгуен Ньят Куанг. Динамические нагрузки при торможении грузоподъемных кранов // Конструирование и производство транспортных машин. Респ. межвед. науч.- техн. сборник. - Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. Вып. 12. - С. 116-120.
4. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. –560 с.
5. Неженцев А.Б. Потери энергии при торможении противовключением кранов мостового типа // Підйомно-транспортна техніка. 2007. - № 1(21). - С. 22-30.
6. Неженцев А.Б., Будиков Л.Я., Бежок Г.В., Аветисян С.М. Выбор оптимальной механической характеристики привода передвижения мостового крана в режиме динамического торможения // Конструирование и производство транспортных машин. Респ. межвед. науч.- техн. сборник. - Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. Вып. 18. - С.74-79.
7. Неженцев А.Б., Пожидаев В.Ф., Аветисян С.М., Балицкая Т.Ю. Оптимизация механической характеристики механизма передвижения грузоподъемного крана в режиме динамического торможения // Вісник Східноукраїнського національного ун-ту ім. В.Даля, №11(69). – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В.Даля, 2003. – С. 181-190.
8. Ловейкін В.С. Динамічна оптимізація режиму руху кранового механізму переміщення / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич // Підйомно-транспортна техніка. - 2013. - № 3. - С. 5-21.
9. Ловейкін В.С. Оптимізація перехідного процесу пуску механізму переміщення мостового крана за критерієм середньоквадратичного значення зусилля у мостовій балці / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, В.В. Крушельницький // Підйомно-транспортна техніка. - 2015. - № 3. - С. 27-35.
10. Збитнев П.В., Будиков Л.Я., Асеев А.М. К вопросу формирования тормозных процессов мостовых кранов. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля № 6 (195), ч. 2, 2013. - С. 110-115.
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. – 279 с.
12. Аветисян С.М., Неженцев А.Б. Программное обеспечение для исследования переходных процессов грузоподъемных кранов (часть 1: при работе механизмов передвижения) // Підйомно-транспортна техніка. – 2003. - №4(8). - С. 33-48.

References

1. Gaydamaka V.F. Rabota gruzopod'yomnykh mashin pri besstupenchatom tormozhenii. – KH.: Vishcha shkola. Izd-vo pri KHGU, 1988. - 141 s.

2. Lobov N.A. Dinamika gruzopod"yemnykh kranov. - M.: Mashinostroyeniye, 1987. – 160 s.
3. Budikov L.Ya., Nezhentsev A.B., Nguyen N'yat Kuang. Dinamicheskiye nagruzki pri tormozhenii gruzopod"yemnykh kranov // Konstruirovaniye i proizvodstvo transportnykh mashin. Resp. mezhved. nauch.- tekhn. sbornik. - Khar'kov: Vishcha shkola. Izd-vo pri Khar'k. un-te, 1980. Vyp. 12. - S. 116-120.
4. Klyuchev V.I. Teoriya elektroprivoda. – M.: Energoatomizdat, 1985. –560 s.
5. Nezhentsev A.B. Poteri energii pri tormozhenii protivoklyucheniym kranov mostovogo tipa // Pidyomno-transportna tekhnika. 2007. - № 1(21). - S. 22-30.
6. Nezhentsev A.B., Budikov L.Ya., Bezhok G.V., Avetisyan S.M. Vybory optimal'noy mekhanicheskoy kharakteristiki privoda peredvizheniya mostovogo kрана v rezhime dinamicheskogo tormozheniya // Konstruirovaniye i proizvodstvo transportnykh mashin. Resp. mezhved. nauch.- tekhn. sbornik. - Khar'kov: Vishcha shkola. Izd-vo pri Khar'k. un-te, 1986. Vyp. 18. - S.74-79.
7. Nezhentsev A.B., Pozhidayev V.F., Avetisyan S.M., Balitskaya T.YU. Optimizatsiya mekhanicheskoy kharakteri-stiki mekhanizma peredvizheniya gruzopod"yemnogo kрана v rezhime dinamicheskogo tormozheniya // Visnik Skhidnoukrai□ns'kogo natsional'nogo un-tu im. V.Dalya, №11(69). – Lugans'k: Vid-vo SNU im. V.Dalya, 2003. – S. 181-190.
8. Loveykin V.S. Dynamichna optymizatsiya rezhymu rukhu kranovoho mekhanizmu peremishchennya / V.S. Loveykin, Yu.O. Romasevych // Pidyomno-transportna tekhnika. - 2013. - № 3. - S. 5-21.
9. Loveykin V.S. Optymizatsiya perekhidnoho protsesu pusku mekhanizmu peremishchennya mostovoho kрана za kryteriyem seredn□okvadratynchoho znachennya zusylyya u mostoviy baltsi / V.S. Loveykin, YU.O. Romasevych, V.V. Krushel□nyts□kyu // Pidyomno-transportna tekhnika. - 2015. - № 3. - S. 27-35.
10. Zbitnev P.V., Budikov L.Ya, Aseyev A.M. K voprosu formirovaniya tormoznykh protsessov mostovykh kranov. // Visnik Skhidnoukrai□ns'kogo natsional'nogo univrsitetu im. V.Dalya № 6 (195), ch. 2, 2013. - S. 110-115.
11. Adler Yu.P., Markova Ye.V., Granovskiy Yu.V. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy. - M.: Nauka, 1976. – 279 s.
12. Avetisyan S.M., Nezhentsev A.B. Programmnoye obespecheniye dlya issledovaniya perekhodnykh protsessov gruzopod"yemnykh kranov (chast' 1: pri rabote mekhaniz-mov peredvizheniya) // Pidyomno-transportna tekhnika. – 2003. - №4(8). - S. 33-48.

Неженцев О.Б., Збітнєв П.В. Оптимізація механічних характеристик приводу пересування мостового крана у режимі двоступеневого противмикання

Виконано пошук оптимальних механічних характеристик приводу пересування мостового крана вантажопідйомністю 10 т і прольотом 22,5 м в режимі двоступеневого противмикання. В якості критерію оптимізації прийнято узагальнену функція бажаності, яка містить: час гальмування крана, максимальні динамічні навантаження, що діють на металоконструкцію крана і на вантаж, а також втрати енергії при гальмуванні противмиканням. Знайдені оптимальні механічні характеристики дозволили більш ніж в два рази знизити динамічні навантаження на металоконструкцію крана і амплітуду розгойдування вантажу, а також на 20% зменшити втрати електроенергії.

Ключові слова: мостовий кран, гальмування противмиканням, динамічні навантаження, втрати енергії, багатопараметрична оптимізація.

Nezhentsev A.B, Zbitniev P.V. Optimization of mechanical characteristics of drive of bridge crane in mode of two-stage pluggin braking

*Braking processes of bridge cranes, which is operated in Ukraine, entail high dynamic loads and loss of energy. So, search of optimum characteristics of movement mechanism drive of the bridge crane carrying capacity 10 t and a span of 22.5 m in the mode of a two-stage pluggin braking was performed. Optimizing was performed on nonlinear mathematical model of the bridge crane, which was submitted as a three-mass design scheme. Method of steep ascension was applied to this end. The desirability of a generalized function, comprising: deceleration time of the crane, maximum dynamic loads arising in metal construction and on cargo, loss of energy during two-stage pluggin braking was adopted as an optimization criterion. The best mechanical characteristics was found It have allowed to reduce dynamic loads on the metal structure of the crane and the amplitude of sway of cargo more than twice, as well as it have allowed to reduce an electricity losses on 20%. **Keywords:** bridge crane, pluggin braking, dynamic loads, loss of energy, optimization*

Неженцев Олександр Борисович – к.т.н., доцент, доцент кафедри прикладної механіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна, e-mail: nezhentsev@meta.ua

Збітнєв Павло Володимирович – аспірант кафедри підйомно-транспортної техніки, Східноукраїнський національний університет ім. В.Далія, м. Северодонецьк, Україна, e-mail: zbitniev@gmail.com

Рецензент: **Носко П.Л.**, д.т.н., професор

Стаття подана: 25.11.2015