

УДК 621.874

Будиков Л. Я., Зеленко А. В.

КОНЦЕПЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ТОРМОЗНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Согласно РТМ 24.090.28-77 [1] величина тормозного момента механизма передвижения грузоподъемного крана определяется из условия погашения кинетической энергии вращающихся и поступательно движущихся масс привода и крана за заданное время или на заданном тормозном пути. При определении тормозного момента крана не учитываются упругие свойства элементов механизма и металлоконструкции, гибкий подвес груза; не ставятся задачи как оценки «качества» тормозных процессов при торможении крана по различным характеристикам, так и формирования тормозных характеристик, обеспечивающих оптимальное (рациональное) торможение.

Рекомендации РТМ 24.090.28-77 относятся к определению тормозных моментов механизмов передвижения, оборудованных автоматически срабатывающими тормозами. В настоящее время отсутствует универсальная методика расчета оптимальных (рациональных) тормозных характеристик кранов, оборудованных различными типами тормозных устройств, которая базировалась бы на многокритериальной оценке процессов торможения. Это затрудняет максимально использовать возможности управляемых тормозных устройств грузоподъемных кранов.

В работах [2–5] выполнены многопараметрические многофакторные исследования процессов разгона и торможения мостовых кранов. На базе этих исследований разработан метод расчета оптимальных (рациональных) механических характеристик механизмов передвижения, оборудованных различными типами тормозных устройств, о чем говорится ниже. Предлагаемый метод расчета базируется на детерминированном подходе к исследованию динамики кранов и математической теории планирования многофакторных экспериментов.

Целью данной работы является презентация метода расчета оптимальных тормозных характеристик механизмов передвижения грузоподъемных кранов, оборудованных различными типами тормозных устройств. Оптимизация тормозных процессов выполняется по обобщенному критерию, включающему основные параметры «качества» переходных режимов (время торможения t_m , максимальные динамические нагрузки металлоконструкции P_m^{max} и привода P_{np}^{max} , максимальная амплитуда отклонения груза от вертикали A^{max} (горизонтальная составляющая натяжения грузовых канатов P_k^{max}) и др.).

Вследствие случайного характера тормозных процессов, определяемых переменными начальными условиями торможения (скоростью крана в начале торможения, массой груза и высотой его подвеса, фазой колебания груза и др.) и видом тормозной характеристики привода, решение такой оптимизационной задачи с помощью аналитических методов расчета, опирающихся на основные положения статистической динамики грузоподъемных машин, затруднительно. Получить решение в частном виде с использованием методов оптимизации можно, если ограничить область исследований и рассматривать процесс торможения как детерминированный, т.е. при фиксированных значениях параметров крана и начальных условий торможения. В этом случае можно выделить следующие этапы расчета оптимальных тормозных характеристик механизмов передвижения грузоподъемных кранов (рис. 1).

1. Построение динамической и математической моделей торможения крана.

На первой стадии исследований эксперимент целесообразно ставить на математической модели, заключается он в определении основных параметров переходного процесса численным интегрированием уравнений движения крана при торможении по i -й характеристике.

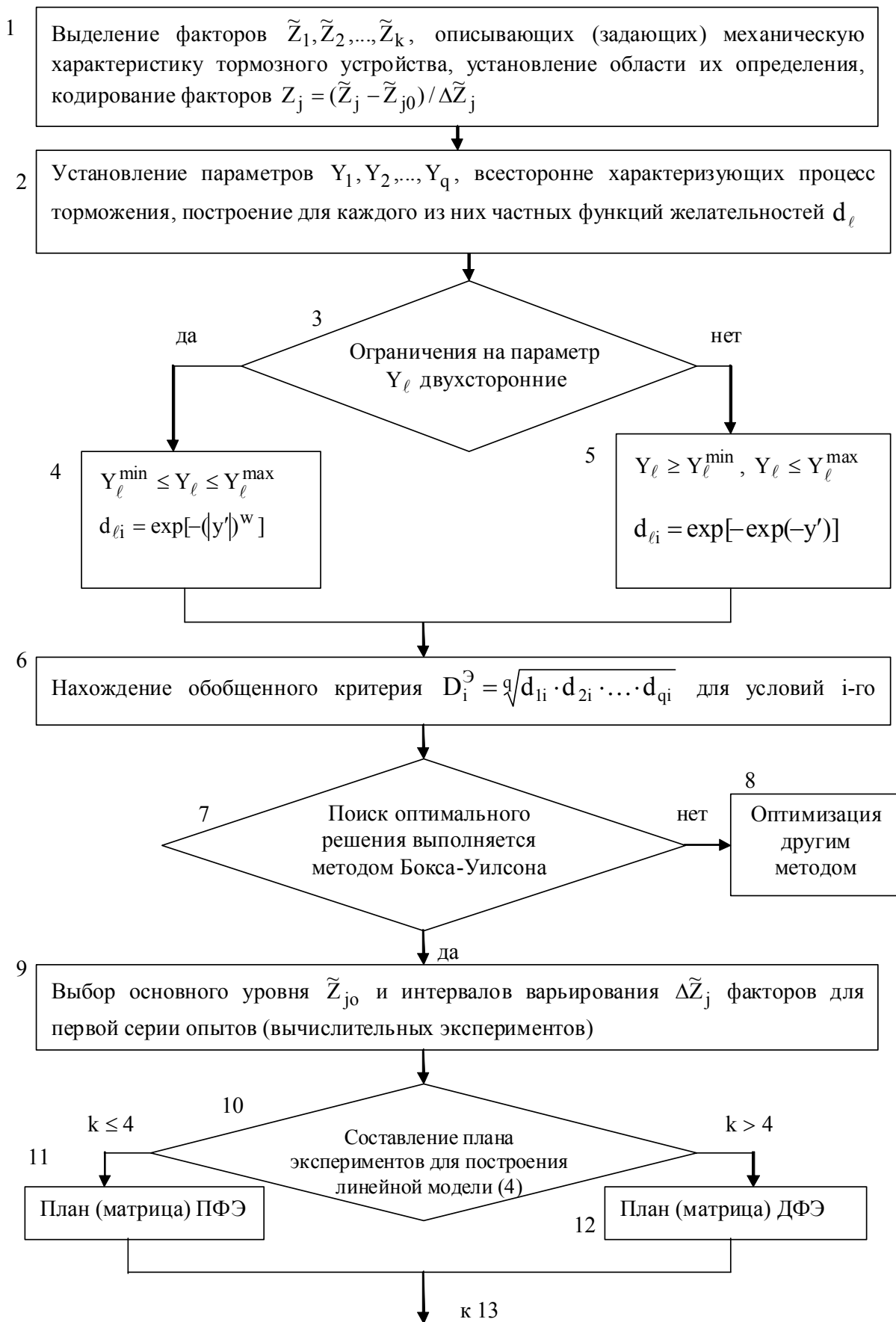


Рис. 1, лист 1. Блок-схема расчета оптимальных тормозных характеристик

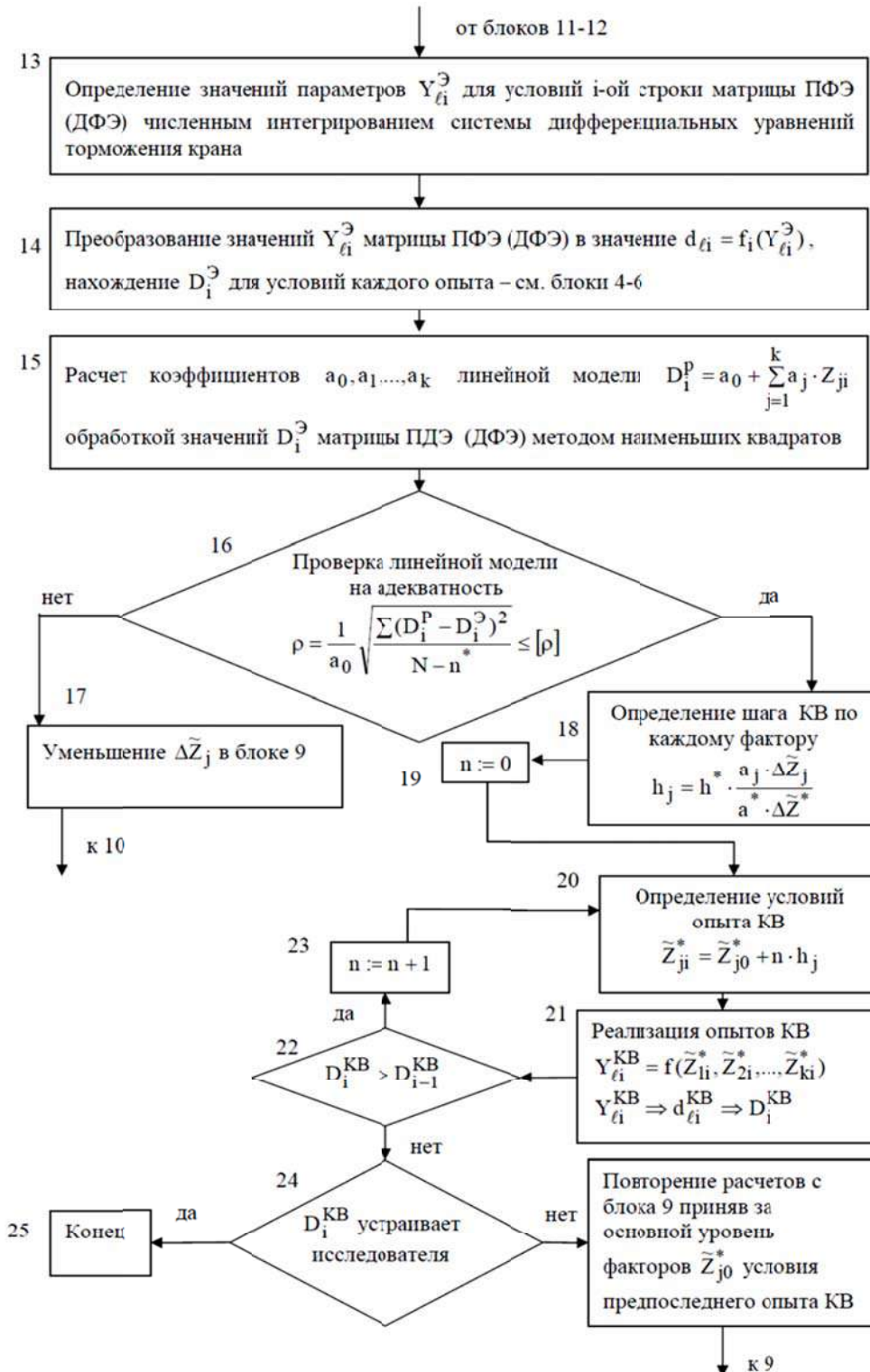


Рис. 1, лист 2. Блок-схема расчета оптимальных тормозных характеристик

2. *О независимых переменных (факторах), однозначно определяющих (задающих) тормозную характеристику механизма* (рис. 1, блоки 1–2).

В качестве примера рассмотрим случай, когда механизм передвижения крана оснащен устройством электродинамического торможения (УДТ).

В этом случае любую тормозную характеристику в режиме комбинированного торможения (вначале электродвигателем, а затем механическим тормозом) можно однозначно задать с помощью трех факторов: максимального момента M_{kq} и критического скольжения s_{kq}

электродвигателя, а также скорости крана v_{eq} , при которой отключается УДТ и срабатывает механический тормоз (рис. 2). В режиме комбинированного торможения приведенная к поступательному передвижению крана тормозная сила механизма описывается системой (1):

$$P_m = \begin{cases} -\frac{2 \cdot M_{kq} \cdot s_{kq} \cdot v_0 \cdot u \cdot \dot{x}_k \cdot \eta}{r_k \cdot (s_{kq}^2 \cdot v_0^2 + \dot{x}_k^2)} & \text{при } \dot{x}_k > v_{eq}; \\ -M_m \cdot u \cdot \eta / r_k & \text{при } \dot{x}_k \leq v_{eq}, \end{cases} \quad (1)$$

где $v_0 = v_k \cdot (v_0/v_n)$ – скорость передвижения крана, соответствующая синхронной частоте вращения ротора электродвигателя;

u – передаточное число механизма передвижения;

r_k – радиус ходового колеса;

\dot{x}_k – текущая скорость концевых балок крана;

M_m – тормозной момент механического тормоза;

η – КПД механизма передвижения;

q – номер механической характеристики.

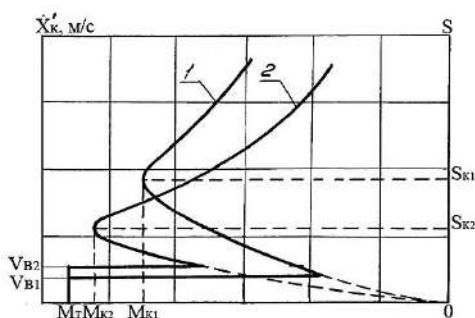


Рис. 2. Механические характеристики механизма передвижения крана при комбинировании электродинамического и механического торможения

Аналогично с помощью нескольких факторов можно задать тормозную характеристику любого тормозного устройства (например, двухступенчатого или многоступенчатого тормозов и т. д.).

3. *Выбор обобщенного критерия «качества» тормозного процесса* (рис. 1, блоки 3–6). Для оптимизации тормозных процессов надо уметь оценивать их «качество». Переходные процессы передвижения грузоподъемного крана всесторонне могут быть охарактеризованы только совокупностью параметров. В частности «качество» тормозных процессов мостовых кранов достаточно полно характеризуется с помощью упомянутых выше четырех параметров: t_{mi} , P_{mi}^{max} , P_{npi}^{max} , A_i^{max} .

При рассмотрении тормозных режимов грузоподъемных кранов априорная информация позволяет дать предварительную оценку каждому отдельному параметру переходного процесса, поэтому в качестве обобщенного критерия удобно использовать обобщенную функцию желательности Харрингтона [6]. Для ее построения необходимо получить зависимости, позволяющие преобразовывать значения параметров t_{mi} , P_{mi}^{max} , P_{npi}^{max} , A_i^{max} в значения безразмерных частных функций желательностей $d_{1i} = f_1(t_{mi})$, $d_{2i} = f_2(P_{mi}^{max})$, $d_{3i} = f_3(P_{npi}^{max})$ и $d_{4i} = f_4(A_i^{max})$, а последние – в значение обобщенной желательности D_i .

Время торможения мостовых кранов t_T ограничено с двух сторон: с одной стороны оно должно быть больше минимального времени торможения t_{min} , при котором нарушается сцепление приводных ходовых колес с рельсами, а с другой – меньше максимального времени торможения t_{max} , определяемого из особенностей технологического процесса, для которого предназначен кран. Для двухстороннего ограничения вида $t_{min} \leq t_m \leq t_{max}$ преобразование значений t_m в шкалу d_1 производится при помощи функции:

$$d_1 = \exp[-(|y'|)^w], \quad (2)$$

$$\text{где } w = \frac{\ln(\ln(1/d_1^*))}{\ln\left|(2 \cdot t_T^* - (t_{\max} + t_{\min})) / (t_{\max} - t_{\min})\right|}; \quad y' = \frac{2 \cdot t_{mi} - (t_{\max} + t_{\min})}{t_{\max} - t_{\min}}.$$

Здесь t_m^* – время торможения крана, соответствующее $d_1^* = 0,8$.

Ограничения для параметров P_m^{\max} , P_{np}^{\max} , A^{\max} носят односторонний характер. Формой их преобразования в d_2 , d_3 , d_4 служит экспоненциальная зависимость:

$$d_{2,3,4} = \exp[-\exp(-y'_{2,3,4})], \quad (3)$$

$$\text{где } y'_2 = b_{02} + b_{12} \cdot P_m^{\max}, \quad y'_3 = b_{03} + b_{13} \cdot P_{np}^{\max}, \quad y'_4 = b_{04} + b_{14} \cdot A^{\max}.$$

Коэффициенты b_{02} , b_{03} , b_{04} и b_{12} , b_{13} , b_{14} определяют, задав значению 0,37 частных функций желательностей d_2 , d_3 , d_4 соответствующие им максимально приемлемые значения P_m^{\max} , P_{np}^{\max} , A^{\max} , а значению 0,95 – желаемые значения этих параметров [2–5].

4. Расчет оптимальной тормозной характеристики механизма передвижения крана методом крутого восхождения (блоки 7–25).

Определение основного уровня \tilde{z}_{j0} и интервалов варьирования $\Delta\tilde{z}_j$ каждого фактора (рис. 1, блок 9). Значения основного уровня каждого из факторов (т. е. механическая характеристика механизма, с которой начинаются исследования) выбираются, исходя из априорной информации.

Выбор вида уравнения регрессии (рис. 1, блок 10). В проводимом исследовании ставится задача нахождения градиента функции отклика $D^p = f(Z_j)$, поэтому в качестве математической модели (уравнения регрессии) принимается полином первого порядка, который содержит информацию о направлении градиента и имеет минимальное число коэффициентов и, следовательно, требует минимального количества опытов:

$$D_i^p = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j \cdot Z_{ji}, \quad (4)$$

где a_0 , a_j – коэффициенты регрессии;

Z_{ji} – кодированное значение j -го фактора в i -ом опыте.

Выбор плана эксперимента (рис. 1, блоки 10–12). В качестве плана эксперимента при числе факторов $k \leq 4$ рекомендуется ставить полный факторный эксперимент (ПФЭ), а при $k > 4$ – дробный факторный эксперимент (ДФЭ).

Проведение вычислительного эксперимента (рис. 1, блоки 13–14). Как отмечено выше, на первой стадии исследований эксперимент целесообразно ставить на математической модели крана (вычислительный эксперимент). Каждому опыту соответствует решение системы дифференциальных уравнений движения крана для случая торможения по одной из механических характеристик, определяемой значениями факторов \tilde{z}_{ji} в i -м опыте полного (дробного) факторного плана. В качестве результатов эксперимента принимаются полученные в i -м опыте значения t_{mi} , P_{mi}^{\max} , P_{npi}^{\max} , A_i^{\max} , которые преобразуются в частные желательности d_{ei} , а затем в обобщенный критерий оптимизации D_i^p при реализации ПФЭ (ДФЭ).

Построение уравнения регрессии (статистической модели) и проверка ее адекватности (рис. 1, блоки 15–17). Коэффициенты a_0 , a_1 , ..., a_j уравнения регрессии (4), которое адекватно описывает значения D_i^p на локальном участке поверхности отклика, рассчитываются обработкой методом наименьших квадратов полученных в результате вычислительного эксперимента значений обобщенного критерия оптимизации D_i^p .

В качестве оценки точности аппроксимации принята вариация:

$$\rho = \frac{1}{a_0} \sqrt{\frac{\sum (D_i^P - D_i^Э)^2}{N - n^*}} < \alpha, \quad (5)$$

где $D_i^Э$ и D_i^P – значения обобщенной функции желательности, полученные в вычислительных экспериментах и предсказанные уравнением регрессии (4) для условий i -го опыта ПФЭ (ДФЭ);

N и n^* – соответственно число опытов матрицы планирования и число коэффициентов уравнения регрессии;

$\alpha = 0,05$ – принятый в технике уровень риска.

Крутое восхождение по поверхности отклика (рис. 1, блоки 18–25). После построения линейной модели для каждого фактора рассчитывается шаг крутого восхождения (КВ). Шагом по наиболее сильно действующему фактору задаются, а по остальным факторам шаг рассчитывается из отношения:

$$\frac{h^*}{h_j} = \frac{a^* \cdot \Delta \tilde{z}^*}{a_j \cdot \Delta \tilde{z}_j}, \quad (6)$$

где h^* , h_j – шаг крутого восхождения по наиболее сильно действующему и j -му факторам;

a^* , a_j – коэффициенты уравнения регрессии при соответствующих факторах;

$\Delta \tilde{z}^*$, $\Delta \tilde{z}_j$ – натуральные значения интервалов варьирования соответствующих факторов.

Движение по градиенту продолжается до тех пор, пока имеет место улучшение обобщенного критерия оптимизации $D_i^Э$. Как только его значение начнет уменьшаться, то либо задача оптимизации решена (если исследователя удовлетворяют полученные результаты), либо проводится новая серия опытов с центром \tilde{z}_{j0}^* , соответствующим условиям лучшего достигнутого результата (см. рис. 1).

ВЫВОДЫ

Презентуемый метод расчета позволяет рассчитывать оптимальные (рациональные) по обобщенному критерию тормозные характеристики механизмов передвижения грузоподъемных машин, оборудованных различными типами тормозных устройств. Он дополняет метод расчета механизмов передвижения грузоподъемных машин, изложенный в [1].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. РТМ 24.090.28-77. Краны грузоподъемные. Механизм передвижения. Метод расчета. – М. : НИИинформтяжмаш, 1978. – 28 с.
2. Будиков Л. Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа / Л. Я. Будиков. – Луганск : изд-во ВНУ, 2003. – 210 с.
3. Будиков Л. Я. Многопараметрический анализ динамики торможения грузоподъемных кранов противовключением электродвигателей / Л. Я. Будиков, С. Ф. Канава // Подъемно-транспортная техника. – Днепропетровск : изд-во ДИИТ, 2009. – № 3. – С. 115–125.
4. Leonid Budikov. Multiparameter multiple factor analysis of the climbing cranes' dynamics. – Lublin, "TeKa". Vol XA, 2010. – P. 50–56.
5. Будиков Л. Я. О формировании оптимальных тормозных характеристик механизмов передвижения грузоподъемных кранов на базе многопараметрического анализа переходных процессов / Л. Я. Будиков, Р. В. Шишкин // Подъемные сооружения. Специальная техника. – Одесса : ООО «Крантест», 2012. – № 7–8 (126). – С. 19–22.
6. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение ; София : Техника, 1980. – 304 с.