

использованию крана для выполнения технологических операций.

Литература

1. Александров М.П. Тормоза подъемно-транспортных машин. М. Машиностроение. 1976 г.
2. Костромин А.Д., Ивашков Н.И., Горобец Г.А. Крите-

рии оценки и направления развития колодочных тормозов с электрогидравлическими толкателями крановых механизмов подъема. Подъемно-транспортное дело. 2005, №1, С. 2 – 7.

3. ВНИИПТМАШ. Инструкция по монтажу и эксплуатации тормозов типа ТКГТ 200-800. М. Машгиз. 1957 г.

4. Информация для снабженца: толкатели электрогидравлические. Все краны, 2006 г., № 2, С. 34 – 36. ▲

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ТОРМОЖЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

А.Д. Костромин, канд. техн. наук,

Н.И. Ивашков, канд. техн. наук,

НПП «Подъемтранссервис», Москва

Г.А. Горобец

ГНПУП «Электрические аппараты», г. Бендеры, Молдова

Авторами на основе рассмотрения динамики процесса торможения в механизмах передвижения кранов и сравнительного анализа обычных и усовершенствованных тормозов доказано безусловное преимущество тормозных систем с усовершенствованными тормозами ТКГ-160-1 и ТКГ-200-1, укомплектованных электрогидравлическими толкателями ТЭ-30РД, которые обеспечивают безопасное и плавное торможение механизмов передвижения, улучшают эргономические показатели, повышают срок службы узлов и механизмов крана и подкрановых сооружений, позволяют в сочетании с современными схемами управления создавать подъемно-транспортное оборудование высокого технологического уровня.

В подъемно-транспортных машинах одну из основных функций перемещения и позиционирования грузов выполняют крановые механизмы передвижения. Во многом технический уровень подъемно-транспортного оборудования (производительность, долговечность, эргономические показатели) определяется величиной динамических нагрузок, возникающих в звеньях механизма передвижения при переходных процессах. В том числе при торможении и остановке машины. Существенную роль в динамике торможения играют тормозные системы, поглощающие, в зависимости от схем управления приводом, от 5 до 100% кинетической энергии, накопленной при движении крана и гру-

за. Кроме того, на них возложена функция затормаживания и удержания в неподвижном состоянии механизма при отключении электропитания двигателя привода. То есть они являются средством безопасности.

Из теории электропривода [1, 2] известно, что крановые механизмы передвижения относятся к классу механизмов, у которых сумма приведенных к валу электродвигателя моментов инерции массы крана и груза ($I_{мех} + I_{гр}$) в 10 - 30 раз превосходят момент инерции вращающихся частей привода ($I_{дв}$), то есть

$$M_{зам} = M_u = (I_{мех} + I_{гр} + I_{дв}) \frac{d\omega}{dt} \approx (I_{мех} + I_{гр}) \cdot j,$$

$$P_{зам} = P_u = (m_{мех} + m_{гр}) \frac{dV}{dt} = (m_{мех} + m_{гр}) \cdot a_3,$$

где $M_{зам}$, $P_{зам}$ – соответственно затормаживающие момент и усилие;

M_u , P_u – соответственно динамические момент и усилие;

ω – угловая скорость электродвигателя механизма;

V – линейная скорость крана (механизма);

j – угловое ускорение (замедление);

a_3 – ускорение (замедление) механизма.

Для механизмов, у которых $(I_{мех} + I_{гр}) \gg I_{дв}$, снижение динамических нагрузок при торможении обеспечивается не только ограничением величин затормаживающего момента $M_3 \leq M_{дон}$ или ускорения $j_3 \leq j_{дон}$, но также производной момента $dM/dt \leq (dM/dt)_{дон}$ или так называемого «рывка» $\rho = dj/dt \leq \rho_{дон}$, $A = da_3/dt \leq A_{дон}$. A и ρ являются, по существу, скоростью изменения ускорения.

Ограничение «рывка» снижает ударные нагрузки при выборе зазоров в приводе механизмов [2], уменьшает амплитуды колебательных процессов в его звеньях. Это существенно увеличивает срок службы механизмов и кра-

на в целом, обеспечивает оптимальные условия для подъемно-транспортных операций, создает комфортные условия в кабине оператора (крановщика).

При отмеченном выше поглощении до 100% кинетической энергии движущихся частей и значительной доле затрат времени при остановке механизма и его позиционировании, проблемы обеспечения тормозами вышеуказанных ограничений являются актуальными, а их решение позволит, помимо снижения динамических нагрузок и уменьшения подвижек груза, повысить производительность крана.

В настоящее время в приводе крановых механизмов передвижения применяют тормоза ТКГ-160, ТКГ-200 (рис. 1). Как показала практика, они не обеспечивают вышеуказанных ограничений по моменту и «рывку», которые не были учтены на стадии проектирования кранов. Для достижения приемлемой динамики торможения в эксплуатации пружины этих тормозов «распускались», что приводило к авариям и угону кранов, работающих на открытом воздухе.

На основе обобщенных данных эксплуатации и теоретического анализа динамики торможения крановых механизмов, исследований влияния конструктивных элементов электрогидравлического привода тормозов (толкателей) на параметры, характеризующие процесс наложения тормозного момента, НПП «Подъемтранссервис» (ПТС) разработало [3, 4] и освоило серийное производство тормозов нового поколения для крановых механизмов передвижения. Новые тормоза ТКГ-160-1, ТКГ-200-1 (рис. 2) укомплектованы электрогидравлическим толкателем ТЭ-30РД. Они обеспечивают время срабатывания t_{cp} (время от момента отключения электродвигателя толкателя до начала контакта колодок тормоза со шкивом) не более 1 с (рис. 3) и следующие параметры торможения в 4 стадии:

на первой стадии наложения тормозного момента (t_{T1} примерно 1,0 с) M_{T1} первой ступени регулируется в пределах $0,3 - 1,0 M_{Tmax}$,

на второй стадии время t_{T12} плавного возрастания M_{T1} , до значения $M_T = M_{T1} + 0,1M_{Tmax}$ регулируется в пределах $0 - 5$ с,

на третьей стадии время t_{T23} наложения максимального тормозного момента M_{Tmax} примерно равно 1 с.

на четвертой стадии действует тормозной момент M_{Tmax}

Величина M_{Tmax} регулируется пружиной тормоза, M_{T1} – соответствующим подбором демпфирующей пружины и её

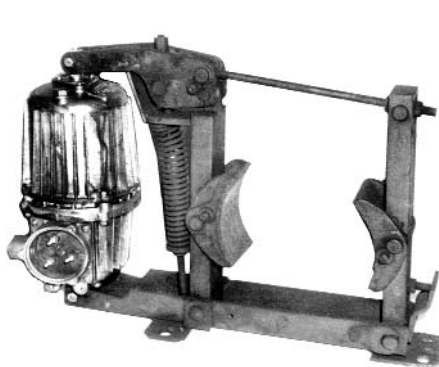


Рис. 1. Тормоз ТКГ-200 ($M_{Tmax} = 300$ Нм, время наложения тормозного момента t_{T1} примерно 0,2 с)

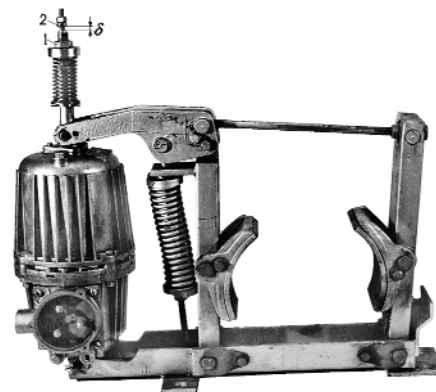


Рис. 2. Тормоз ТКГ-200-1 ($M_{Tmax} = 300$ Нм, $M_{T1} = 0,3 - 1,0 M_{Tmax}$ диапазон регулирования времени действия первой ступени торможения $t_{T12} = 2 - 8$ с, время наложения тормозного момента t_{T1} примерно 1,0 с)

первоначальным сжатием гайкой (поз. 1 рис. 2). Время t_{T23} задается регулировкой дополнительного хода (δ) штока толкателя после наложения колодок на шкив тормоза, δ регулируется гайкой и контргайкой (поз. 2 рис. 2).

Время t_{T1} для тормоза ТКГ-200-1 (с толкателем ТЭ-30РД) и для тормоза ТКГ-200 (с толкателем ТЭ-30) определялось обработкой осциллограммы изменения угловой скорости шкива при сравнительных стендовых испытаниях, проведенных НПП ПТС, и составило примерно 1,0 с для тормозов ТКГ-200-1 и примерно 0,2 с для тормозов ТКГ-200.

Значение «рывка» для тормоза ТКГ-200 ($M_{Tmax} = 300$ Нм) при допущении линейного закона изменения M_T :

$$A = \frac{M_{Tmax}}{t_{T1}} = \frac{300 \text{ Нм}}{0,2 \text{ с}} = 1500 \text{ Нм/с}$$

Для тормоза ТКГ-200-1 ($M_{T1} = 150$ Нм, $M_{Tmax} = 300$ Нм) значение «рывка» для первой ступени:

$$A_1 = \frac{M_{T1}}{t_{T1}} = \frac{150 \text{ Нм}}{1,0 \text{ с}} = 150 \text{ Нм/с}$$

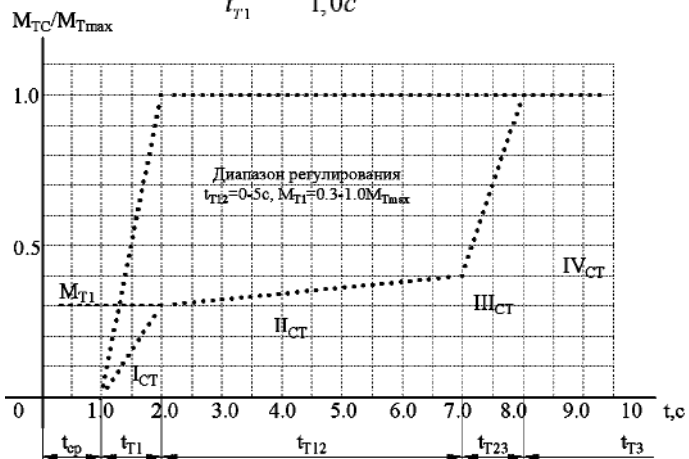


Рис. 3. Характер наложения тормозного момента и диапазон регулирования M_T/M_{Tmax} и t_{T12} тормоза ТКГ-200-1

Значение «рывка» для второй ступени:

$$A_2 = \frac{M_{T_{\max}} - M_{T1}}{t_{T12}} = \frac{150 \text{ Нм}}{1,0 \text{ с}} = 150 \text{ Нм/с.}$$

Таким образом, установлено, что предлагаемые для тормозных систем крановых механизмов передвижения модификации ТКГ-160-1 и ТКГ-200-1 обеспечивают требуемое ограничение по величине затормаживающего момента (за счет ступенчатого наложения M_T) и по «рывку», который на порядок ниже его значений в действующих тормозных системах с тормозами ТКГ-160, ТКГ-200.

Рассмотрим, каким образом выполнение требований по вышеуказанным ограничениям влияет на показатели динамики торможения: коэффициент динамичности, плавность торможения, угол отклонения груза от вертикали. Динамические нагрузки на крановые механизмы передвижения зависят от величины нагрузки, времени её наложения (нарастания) и от периода собственных колебаний (τ). Для крановых механизмов передвижения среднее значение $\tau = 0,5 \text{ с}$ [5].

С помощью известной [6] графической зависимости (рис. 4) коэффициента нарастания нагрузки (K_H) от t_{T1}/τ можно найти значение K_H для привода механизмов передвижения моста с различными тормозами, имея в виду, что для ТКГ-200 $t_{T1}/\tau = 0,2/0,5 = 0,4$ и для ТКГ-200-1 $t_{T1}/\tau = 1/0,5 = 2$. Для механизма передвижения моста, у которого в приводе применен тормоз ТКГ-200, $K_H = 1$, с тормозом ТКГ-200 $K_H = 0,65$, а с ТКГ-200-1 $K_H = 0,15$. Следовательно, динамические нагрузки, возникающие в механизмах передвижения моста при разных вариантах тормозов, можно оценить с помощью коэффициента динамичности

$$K_D = \frac{P_{\max}}{P_{CT}} = 1 + K_H.$$

Для привода механизма передвижения моста с тормозами ТКГ-200 $K_D = 2,0$; с ТКГ-200 $K_D = 1,65$; с ТКГ-200-1 $K_D = 1,15$. С нашей точки зрения плавность торможения (Π_T) более наглядно и качественно правильно можно оце-

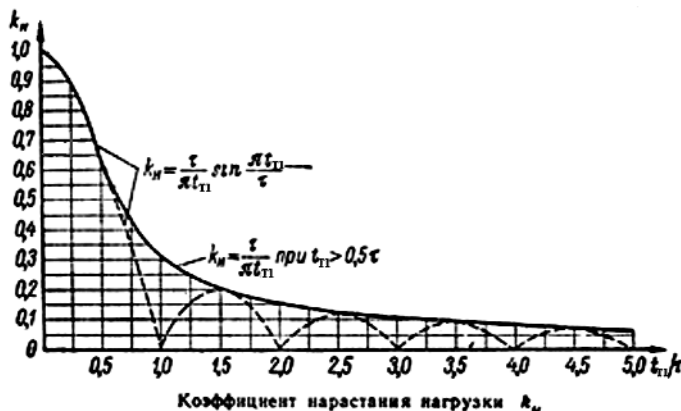


Рис. 4. Коэффициент нарастания нагрузки K_H

нить выражением:

$$\Pi_T = 1 - K_H.$$

Для рассматриваемого привода при ТКГ-200 $\Pi_T = 0,0$; при ТКГ-200 $\Pi_T = 0,35$; при ТКГ-200-1 $\Pi_T = 0,85$. При учете ступенчатого наложения нагрузки в тормозах ТКГ-200-1 $K_{HC} = M_{T1} \cdot K_H / M_{T_{\max}}$, т.е. при значении $M_{T1} / M_{T_{\max}} = 0,5 \cdot K_{HC} = 0,5 \cdot K_H \approx 0,07$, $K_{DC} = 1,07$, $\Pi_{TC} = 0,93$.

Таким образом, предлагаемый критерий оценки плавности торможения (Π_T) наглядно показывает, что тормоз типа ТКГ-200 (с приводом от электромагнита переменного тока МО-201) для механизма передвижения моста крана функционально не пригоден ($\Pi_T = 0$), а тормоз ТКГ-200-1 ($\Pi_T = 0,85$) обладает явным преимуществом по сравнению с ТКГ-200 ($\Pi_T = 0,35$). Это преимущество достигается за счет выполнения ограничений по моменту и «рывку».

Известно [6], что для угла отклонения груза от вертикали существует зависимость:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_3}{g} \cdot (1 + K_H).$$

Так как для привода передвижения моста с тормозами ТКГ-200-1 $K_H = K_{HC} \approx 0$, а ступенчатое наложение тормозного момента способствует уменьшению a_3 , предлагаемые тормоза обеспечивают уменьшение раскачивания груза по сравнению с другими моделями и оптимально решают проблемы плавного и безударного торможения крановых механизмов передвижения.

Сложнее всего решить задачу оптимального затормаживания механизма передвижения моста для кранов, работающих на открытом воздухе и не имеющих специальных противоугонных захватов. В этом случае кроме обычных ограничений:

эргономических $a_3 \leq 0,4 \text{ м/с}^2$ (при длительной работе);

технологических $a_3 \leq 0,3 \text{ м/с}^2$ (для кранов для перегрузки штучных и пакетированных грузов без учета действия ветра и уклона);

по сцеплению ходовых колес с подкрановыми рельсами $a_3 \leq 0,9 \text{ м/с}^2$ (для кранов со всеми приводными колесами, работающих на открытом воздухе);

накладывается требование к суммарному тормозному моменту тормозной системы механизма передвижения $M_{T_{\max}}$ для удержания крана в нерабочем состоянии при максимальной ветровой нагрузке на кран:

$$M_{T_{\max}} = K_1 \cdot \frac{D_{\text{кр}} \cdot \eta_0}{2i_0} \cdot (P_{B1}^3 + P_{y1} - W_{C1})$$

$$P_{T_{\max}} = K_1 \cdot (P_{B1}^3 + P_{y1} - W_{C1}),$$

где:

P_{B1}^3 – максимальная ветровая нагрузка на кран без груза в нерабочем состоянии;

P_{y1} – горизонтальная составляющая веса крана от уклона кранового пути;

W_{C1} – сопротивление перемещению крана без груза от

сил трения ходовых колес;

$K_f = 1,2$ – коэффициент запаса торможения.

В качестве примера решения задачи оптимального (плавного) торможения крана без противоугонных захватов, работающего на открытом воздухе, с применением в тормозной системе тормозов нового поколения рассмотрим мостовой кран грузоподъемностью $Q = 20000$ кг, массой 73000 кг, с четырьмя двухколесными приводными тележками и четырьмя электродвигателями МТН 311-6 (с фазным ротором) механизма передвижения моста. Максимальная скорость передвижения моста $V_0 \leq 1,5$ м/с. Минимальная его скорость при оперативном торможении электродвигателями $V_0 = 0,5$ м/с. (схема торможения противовключением с введением ступеней сопротивления в фазный ротор) и $V_0 = 0,2$ м/с (схема электродинамического торможения).

Расчитанные по существующим методикам нагрузки для различных вариантов действия ветра, уклона, груза для рассматриваемого крана приведены в графическом виде на рис. 5. Представлены усилия ступенчатого затормаживания, рассчитанные с учетом требований безопасности и рекомендаций (по времени действия и величине затормаживающего усилия первой и второй ступеней) [1, 7]. Суммарный затормаживающий момент тормозной системы второй ступени ($P_{T2} = 37600$ Н) $\Sigma M_{T2} = 480$ Нм, для первой ступени ($P_{T1} = 17300$ Н) $\Sigma M_{T1} = 220$ Нм. Для привода механизма передвижения крана выбраны четыре тормоза ТКГ-200-1 с настройкой $M_{T1} = 55$ Нм, $M_{T2} = M_{Tmax} = 120$ Нм, время $t_{T12} = 3$ с.

По разработанной НПП ПТС методике и программам были рассчитаны для различных вариантов нагрузок (см. рис. 5) зависимости параметров динамических процессов затормаживания: $S = f_1(V_0, t)$, $S^* = f_1^*(V_0, t)$, $V = f_2(V_0, t)$, $V^* = f_2^*(V_0, t)$, $a_3 = f_3(V_0, t)$. В графическом виде эти зависимости представлены на рис. 6 - 11.

Функции S^* и V^* позволяют по заданному выбегу (пути торможения) S определить для рассматриваемого варианта нагрузки и принятой системы торможения время торможения, замедление a_3 и необходимую скорость крана перед началом торможения. Например, для случая нагрузки (см. рис. 11) при заданном выбеге $S \leq 7$ м с помощью функций S^* и V^* получаем, что $V_0 \leq 1,1$ м/с, $a_3 \leq 0,3$ м/с², $t \leq 8,2$ с.

Таким же образом по заданному времени торможения можно определить выбег S^* и скорость V^* , или по заданной начальной скорости торможения V^* определить выбег S^* и время торможения. То есть графические зависимости, представленные на рис. 6 – 11, являются номограммами расчета параметров динамики торможения для различных вариантов сочетания внешних нагрузок и программ параметров торможения (M_{T1}/M_{Tmax} , t_{T12}).

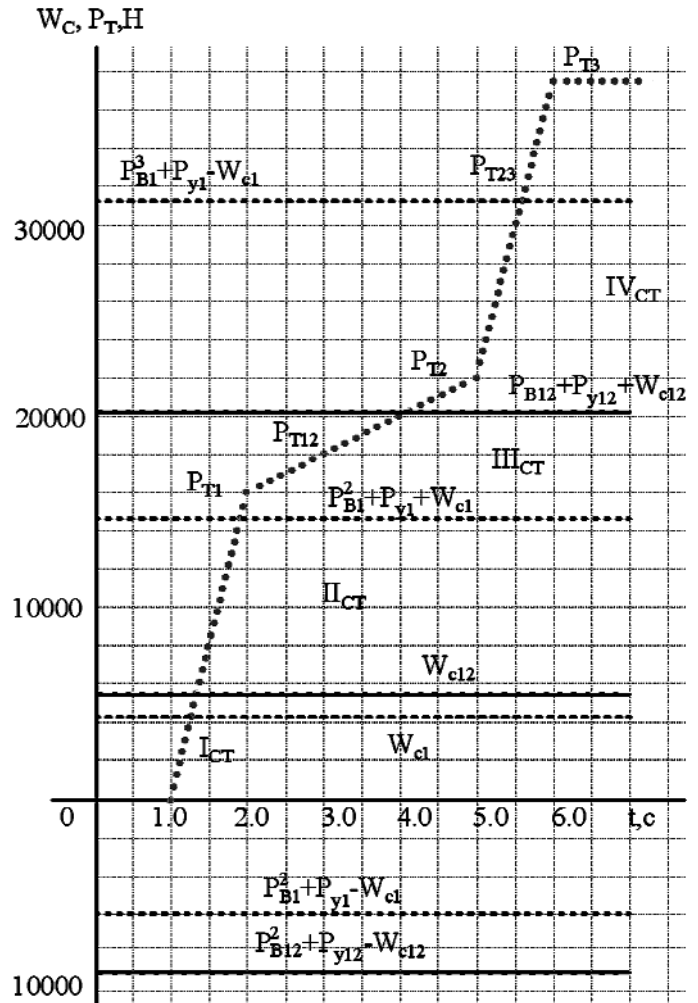


Рис. 5. Расчетные значения нагрузки на кран мостовой контейнерной ($Q = 20000$ кг) для различных вариантов действия ветра (P), уклона (P_y), груза ($P_{T1} - P_{T3}$), предлагаемое затормаживание тормозной системой с ТКГ-200-1:

$W_{C1} = 4300$ Н - сопротивление перемещения крана от сил трения ходовых колес для крана без груза; $W_{C12} = 5600$ Н - то же для крана с грузом; $P_{y1} = 2190$ Н - горизонтальная составляющая веса крана от уклона кранового пути; $P_{y12} = 2790$ Н - то же крана совместно с грузом; $P_{B1}^2 = 8300$ Н - максимальная ветровая нагрузка на кран без груза в рабочем состоянии; $P_{B12}^2 = 12500$ Н - то же на кран с грузом; $P_{B1}^3 = 32500$ Н - максимальная ветровая нагрузка на кран без груза в нерабочем состоянии

Из приведенных выше графических зависимостей V , S , a_3 для различных вариантов нагружения видно, что все ограничения и требования к динамике торможения с системой торможения, использующей тормоза ТКГ-200-1, как при служебном, так и при экстренном торможении (в т.ч. при отключении электропитания) выполнены с обеспечением плавного торможения.

Отметим, что при служебном торможении (при $V_0 = 0,5$ м/с, $P_e = P_y = 0$, $Q = 0$) тормозной системой с ТКГ-200-1 максимальное замедление $a_3 \leq 0,25$ м/с², а с ТКГ-200 –

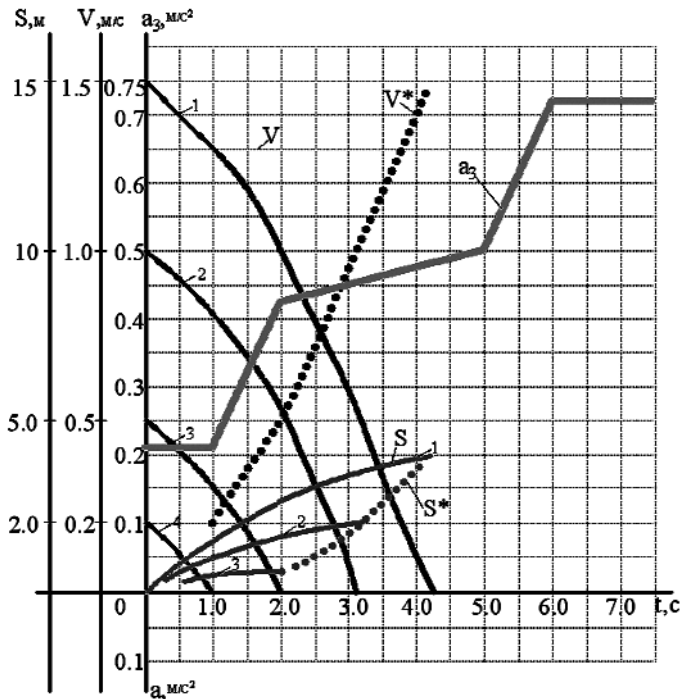


Рис. 6. Зависимости S , V и a_3 от V_0 и t при $P_{T1} = 16000$ Н, $P_{T12} = 16000 - 22000$ Н, $P_{T23} = 22000 - 37600$ Н, $P_{T3} = 37600$ Н для крана без груза ($m = 73000$ кг), $P_{BI}^2 = 8300$ Н (встречно), $P_{y1} = 2190$ Н (встречно), $W_{c1} = 4300$ Н

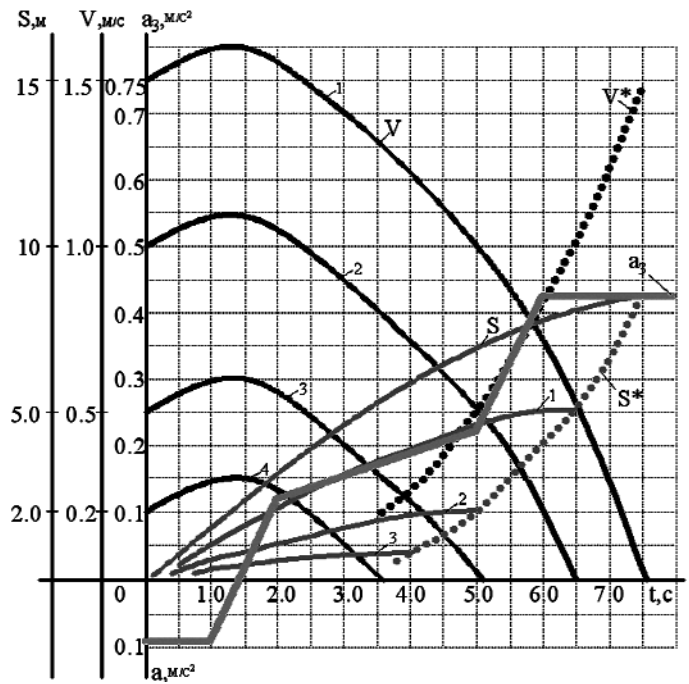


Рис. 8. Зависимости S , V и a_3 от V_0 и t при $P_{T1} = 16000$ Н, $P_{T12} = 16000 - 22000$ Н, $P_{T23} = 22000 - 37600$ Н, $P_{T3} = 37600$ Н для крана без груза ($m = 73000$ кг), $P_{BI}^2 = 8300$ Н (попутно), $P_{y1} = 2190$ Н (попутно), $W_{c1} = 4300$ Н

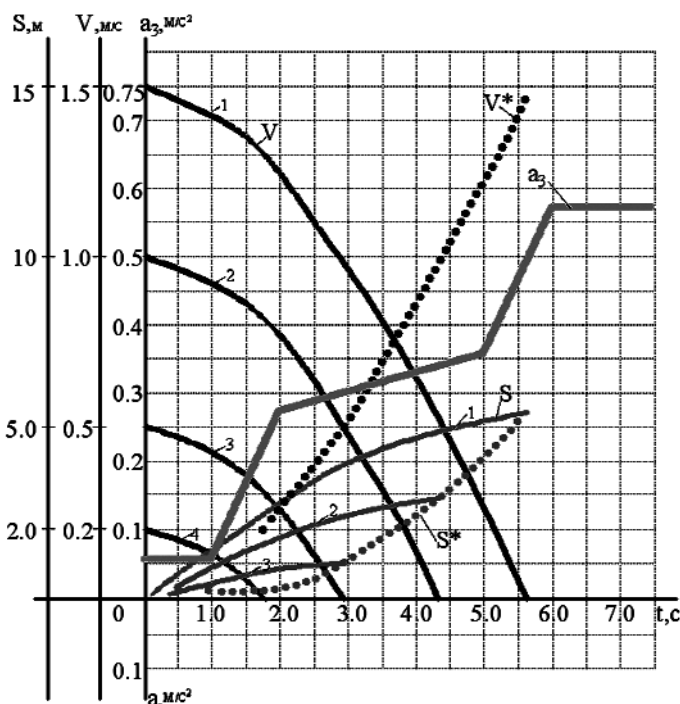


Рис. 7. Зависимости S , V и a_3 от V_0 и t при $P_{T1} = 16000$ Н, $P_{T12} = 16000 - 22000$ Н, $P_{T23} = 22000 - 37600$ Н, $P_{T3} = 37600$ Н для крана без груза ($m = 73000$ кг), $P_B = P_y = 0$, $W_{c1} = 4300$ Н

$a_3 \leq 0,43$ м/с². В случае служебного торможения (при $V_0 = 0,5$ м/с, $P_{BI}^2 = 8300$ Н встречно, $P_{y1} = 2190$ Н встречно) с ТКГ-200-1 $a_3 \leq 0,42$ м/с², а с ТКГ-200 $a_3 \leq 0,73$ м/с².

Предлагаемое новое поколение тормозов крановых ме-

ханизмов передвижения прошло поднадзорную с участием Ростехнадзора опытную эксплуатацию на механизме передвижения моста мостового крана ($Q = 20000$ кг) на Карачаровском механическом заводе (с 20.10.93 г). При этом отмечено, что за время эксплуатации не было отказов указанных тормозов и замечаний по их работе. Экспериментально подтверждено отсутствие при торможении толчков, «рывков», резких замедлений и «срыва» ходовых колес крана. Улучшены эргономические показатели крана, подтверждено удобство управления им после непродолжительной адаптации крановщика.

Тормоза ТКГ-160-1 и ТКГ-200-1 рекомендованы РД24.090.102-01 «Основные требования безопасности к устройству и эксплуатации ветрозащитных систем мостовых и козловых кранов» как эффективное средство плавной остановки с постепенным возрастанием тормозного момента.

Автоматические нормально замкнутые тормоза ТКГ-160-1 и ТКГ-200-1 взаимозаменяемы, а электрогидравлический толкатель ТЭ-30РД, используемый в качестве их привода, унифицирован по корпусным деталям и электродвигателю, соответственно, с тормозами ТКГ-160 и ТКГ-200 и электрогидравлическим толкателем ТЭ-30, входящим в состав последних.

Учитывая накопленный положительный опыт эксплуатации кранов с тормозной системой на базе тормозов ТКГ-160-1 и ТКГ-200-1, их можно рекомендовать к широкому внедрению на действующих и вновь проектируемых крано-

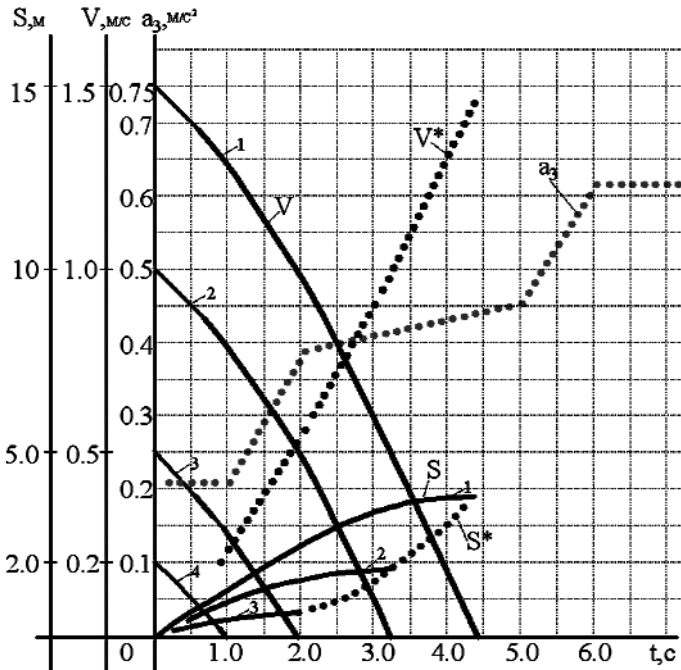


Рис. 9. Зависимости S , V и a_3 от V_0 и t при $P_{T1} = 16000$ Н, $P_{T12} = 16000 - 22000$ Н, $P_{T23} = 22000 - 37600$ Н, $P_{T3} = 37600$ Н для крана с грузом ($m = 93000$ кг), $P_{B12}^2 = 12050$ Н (встречно), $P_{y12} = 2790$ Н (встречно), $W_{c12} = 5500$ Н

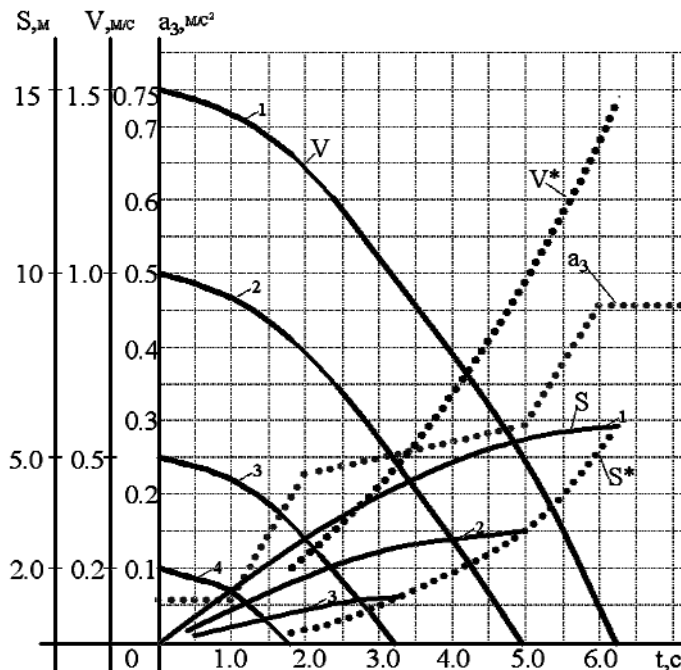


Рис. 10. Зависимости S , V и a_3 от V_0 и t при $P_{T1} = 16000$ Н, $P_{T12} = 16000 - 22000$ Н, $P_{T23} = 22000 - 37600$ Н, $P_{T3} = 37600$ Н для крана с грузом ($m = 93000$ кг), $P_{B12} = P_{y12} = 0$, $W_{c12} = 5500$ Н

вых механизмах передвижения. Для этого необходимо разработать соответствующие нормативные и руководящие документы по проектированию тормозных систем крановых механизмов передвижения. Базой для них могут стать предлагаемые элементы методологических основ расчета

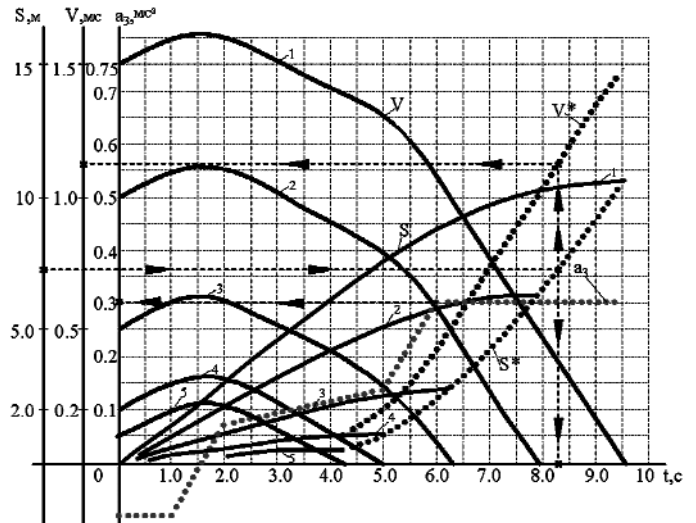


Рис. 11. Зависимости S , V и a_3 от V_0 и t при $P_{T1} = 16000$ Н, $P_{T12} = 16000 - 22000$ Н, $P_{T23} = 22000 - 37600$ Н, $P_{T3} = 37600$ Н для крана с грузом ($m = 93000$ кг), $P_{B12}^2 = 12050$ Н (попутно), $P_{y12} = 2790$ Н (попутно), $W_{c12} = 5500$ Н

и оценки параметров динамики торможения. Новые тормозные системы обеспечивают безопасное и плавное торможение механизмов передвижения, улучшают эргономические показатели крана, повышают срок службы узлов, механизмов, машины и подкрановых сооружений. Позволяют в сочетании с современными типами схем управления создавать подъемно-транспортное оборудование высокого технологического уровня.

Литература

1. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод. Справочник. Москва, Энергоатомиздат, 1988 г.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. Москва, Энергоатомиздат 1985 г.
3. Костромин А.Д., Надев А.Ф., Юнгеров В.С., Ивашков Н.И., Вотинцев В.Г. Электрогидравлический толкатель. Патент на изобретение № 206290 от 27.06.96 г.
Костромин А.Д., Надев А.Ф., Юнгеров В.С., Ивашков Н.И., Вотинцев В.Г., Изверский В.Р. Электрогидравлический толкатель. Свидетельство на полезную модель № 2847 от 16.09.96 г.
5. Герасимьяк Р.П., Параил В.А. Электроприводы крановых механизмов. Москва, Энергия, 1970 г.
6. Дукельский А.И. Справочник по кранам т. 1. Ленинград, Машиностроение, 1971 г.
7. Дукельский А.И. Справочник по кранам т. 2. Ленинград, Машиностроение, 1973 г.
8. Александров М.Т. Тормоза подъемно-транспортных машин. Москва, Машиностроение 1976 г.