

VVA 3T  
КЫРГЫЗСКО – РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи  
УДК 621.314:622.647

**ТЕМИРОВ КУБАНЫЧБЕК ОСОРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ  
ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОСТОВЫХ КРАНОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы  
и системы

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Бишкек – 2008

Работа выполнена в Алматинском институте энергетики и связи  
и в Кыргызско-Российском Славянском университете

**Научный руководитель:** - доктор технических наук,  
профессор АИЭС Сагитов П.И.

**Официальные оппоненты:** - доктор технических наук,  
профессор Бочкарев И.В.  
- кандидат технических наук,  
доцент Полянинов Г.А.

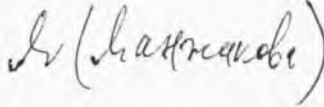
**Ведущая организация:** ОАО «Электрические станции»

Защита состоится «14» марта 2008г. в 14.00. мин. на заседании разового  
Диссертационного совета К 05.07.353 в Кыргызско-Российском Славянском  
Университете по адресу: г. Бишкек, ул. Киевская 44, ауд. 212 – Конференц – зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызско-Российского  
Славянского Университета по адресу г. Бишкек проспект ул. Киевская 44.

Автореферат разослан «10» 02 2008 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью просим  
направлять по адресу: 720000 г. Бишкек, ул. Киевская 44, Кыргызско-Российский  
Славянский Университет, диссертационный совет К. 05.06.320.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
К 05.06.320, к.т.н., доцент  Манжилова С.Ц.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Мостовые краны являются основным грузоподъемным оборудованием производственных цехов и складских помещений, обеспечивающим механизацию различных производственных процессов, особенно на вспомогательных и подсобных работах. Одним из главных направлений совершенствования такого оборудования является применение управляемых систем, позволяющих регулировать закон изменения движущей (тормозной) силы их электроприводов, обеспечивая тем самым оптимальное использование оборудования, интенсификацию производственных процессов, повышение производительности труда и безопасности работы. При этом внедрение новых прогрессивных технологий обуславливает целесообразность перехода с однодвигательного электропривода на многодвигательный.

Таким образом, разработка новых схемных решений и обобщенных методик расчёта многодвигательных электроприводов, особенно систем согласованного вращения и принудительного электрического торможения, является актуальной задачей, имеющей теоретическую и практическую ценность.

**Цель работы** - улучшение технико-экономических показателей управляемых систем динамического торможения электропривода передвижения мостовых кранов на базе комплексного расчетно-теоретического анализа инерционных нагрузок металлоконструкций кранов и разработка новых устройств для электродинамического торможения механизма передвижения мостового крана с оптимальными по быстродействию и динамическим нагрузкам механическими характеристиками двигателя.

### Задачи исследования

Для достижения указанной цели в работе предусматривается решить следующие задачи:

1. Разработать физическую и математическую модели мостового крана с учетом распределенной массы пролетного строения.
2. Разработать алгоритм расчета движения мостового крана в переходных режимах на базе динамической модели крана, состоящей из системы нелинейных дифференциальных уравнений, включающих как обыкновенные дифференциальные уравнения так и уравнения в частных производных.
3. Исследовать влияние электромагнитных переходных процессов в электроприводе на величину и характер горизонтальных динамических нагрузок металлоконструкции крана путем введения в математическую модель крана статической и динамической характеристик двигателя.
4. Выполнить оптимизацию механических характеристик привода передвижения мостового крана в режиме электродинамического торможения.
5. Разработать устройство для электродинамического торможения (УДТ) асинхронного двигателя с управляемым моментом торможения.

**Методика проведения исследований** - основные результаты диссертационной работы получены с использованием аналитических и численных методов расчетов, методов имитационного моделирования и теории автоматического регулирования, экспериментальных методов.

### Научная новизна

1. Разработана математическая модель мостового крана, учитывающая распределенную массу пролетного строения и электромеханические переходные процессы в электроприводе механизма передвижения.

2. Разработан алгоритм расчета движения мостового крана в переходных режимах на базе динамической модели крана, состоящей из системы нелинейных дифференциальных уравнений, включающих как обыкновенные дифференциальные уравнения так и уравнения в частных производных.

3. Предложены аналитические выражения для расчёта механических характеристик многодвигательного электропривода в режиме динамического торможения по схеме с ёмкостью в цепи ротора.

4. Разработано устройство для динамического торможения (УДТ) асинхронных электродвигателей механизмов передвижения грузоподъемных кранов, которое позволяет реализовать различные режимы динамического торможения.

### Практическая ценность

1. Разработана методика расчета горизонтальных инерционных нагрузок мостовых кранов, базирующаяся на совместном использовании детерминированного метода и теории планирования экспериментов. Использование данной методики позволяет определять эффективные пути снижения динамических нагрузок грузоподъемных машин при решении задач синтеза конструкций, оптимальных по динамичности.

2. Исследовано влияние движущей и тормозной силы асинхронного электропривода в режимах противовключения и динамического торможения на горизонтальные нагрузки металлоконструкции мостового крана.

3. Исследованы различные способы и схемы принудительного электрического торможения асинхронных приводов мостовых кранов. Разработана методика оптимизации механических характеристик привода в режиме динамического торможения.

4. Разработано устройство для электродинамического торможения механизма передвижения мостового крана, которое позволяет управлять тормозным моментом в процессе динамического торможения с помощью педали, а также обеспечивает возможность получения оптимальных по быстрдействию и динамическим нагрузкам механических характеристик двигателя в режиме динамического торможения.

### Положения, выносимые на защиту

а) Методика определения горизонтальных инерционных нагрузок мостовых кранов, базирующаяся на математической теории планирования эксперимента.

б) Анализ расчетных схем мостовых кранов.

в) Вопросы теории многодвигательной электромеханической системы в режиме согласованного вращения и электрического торможения.

г) Оптимизация механических характеристик привода передвижения мостового крана в режиме электродинамического торможения.

д) Разработка и экспериментальные исследования устройства для электродинамического торможения механизма передвижения мостового крана.

**Апробация работы.** Основные результаты выполненной работы докладывались и обсуждались: на первой Международной конференции «энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях» (АИЭиС, г. Алматы. 1998 г.); на научно – технической конференции «Современное состояние и проблемы развития электроэнергетики Кыргызстана», посвященной 40-летию кафедры «Электроэнергетика» Кыргызского технического университета (Бишкек, 1999 г.); на Международной научно-технической конференции посвященной 50-летию Кыргызского национального технического университета им. И. Раззакова. (Бишкек, 2004 г.); на первой Международной научно-технической конференции «Мехатроника - пути и перспективы развития на современном этапе» (филиал БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, июнь 2006 г.).

### Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы внедрены на ОсОО «Турборемонт» и на предприятии строящихся ГЭС ОАО «Электрические станции».

**Публикации** Основные научные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 11 печатных изданиях.

**Объем работы** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержание диссертации изложено на 168 страницах компьютерного текста, имеется 16 таблиц, 29 рисунков, акты внедрения, список литературы содержит 125 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** кратко изложены актуальность темы и основные положения диссертационной работы.

**В первой главе** приведен обзор литературы и дан анализ существующих методов расчета и исследования динамики передвижения грузоподъемных машин. Сформулированы цели и задачи исследований.

**Во второй главе** изложена сущность идей и результаты разработки алгоритма методики расчета горизонтальных инерционных нагрузок мостовых кранов, базирующейся на совместном использовании детерминированного метода и теории планирования экспериментов. Показаны преимущества разработанной методики и области ее применения.

Проведенные исследования показали, что мостовые краны представляют собой сложные динамические системы с большим числом степеней свободы. Движение их описывается, как правило, системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка

$$\ddot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}, \dot{\vec{x}}, \vec{c}, \vec{F}, t) \quad (1)$$

с начальными условиями

$$\vec{x}(0) = \vec{x}_0, \quad \dot{\vec{x}}(0) = \dot{\vec{x}}_0,$$

Здесь  $\vec{f}$  - вектор функций правых частей системы;  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  - вектор фазовых координат системы ( $n$  - число масс);  $\dot{\vec{x}}, \ddot{\vec{x}}$  - векторы, соответственно, первой и второй производных по времени от  $\vec{x}$ ;  $\vec{c}$  - вектор параметров системы;  $\vec{F}$  - вектор внешних нагрузок;  $t$  - текущее время.

Для построения математической модели максимальные значения динамических нагрузок крана были аппроксимированы соответствующими функциями и решение системы (1) заменили экспериментом на эквивалентной динамической модели. В этом случае опытом считаем каждое решение системы (1) для определённого сочетания значений констант с нахождением максимального усилия на металлоконструкцию крана. Для упрощения обработки расчётных данных осуществлён переход от системы координат  $x_1, x_2, \dots, x_k$  к новой безразмерной системе координат  $z_1, z_2, \dots, z_k$  с помощью преобразования  $Z_i = (x_i - x_i^0) / \Delta x_i$ , где точка с координатами  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0$  является центром плана;  $\Delta x_i$  - интервал варьирования фактора. В результате кодирования факторов, верхний уровень каждого из них принимает значение (+1), нижний уровень - (-1).

Для удобства модель построена в виде алгебраических полиномов, причём исследования показали, что динамические нагрузки металлоконструкций мостовых кранов достаточно точно описываются полиномиальными моделями второго порядка.

В работе обоснован выбор критерия оптимальности плана эксперимента.

В качестве примера в табл. 1. приведен план  $B_3$  для числа факторов  $k=3$ , а на рис.1. показано расположение опытных точек  $B_3$ , которые располагаются в вершинах куба и центрах граней.

Матрица плана  $B_3$

N	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	N	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
1	1	1	1	8	-1	-1	-1
2	1	1	-1	9	1	0	0
3	1	-1	1	10	-1	0	0
4	1	-1	-1	11	0	1	0
5	-1	1	1	12	0	-1	0
6	-1	1	-1	13	0	0	1
7	-1	-1	1	14	0	0	-1

В работе приведена методика обработки данных, полученных путём реализации машинного эксперимента методом наименьших квадратов.

Предлагаемая методика позволяет рассчитывать динамические нагрузки группы кранов, параметры (факторы) которых находятся в рассмотренных интервалах варьирования, причём она может быть использована для расчета самых разнообразных динамических нагрузок (в элементах привода, металлоконструкции, грузовых канатов и т.д.) различных грузоподъемных машин. При этом функции отклика, определяющие факторы с их интервалами варьирования, а также расчетная схема должны выбираться в каждом конкретном случае с учетом своей специфики.

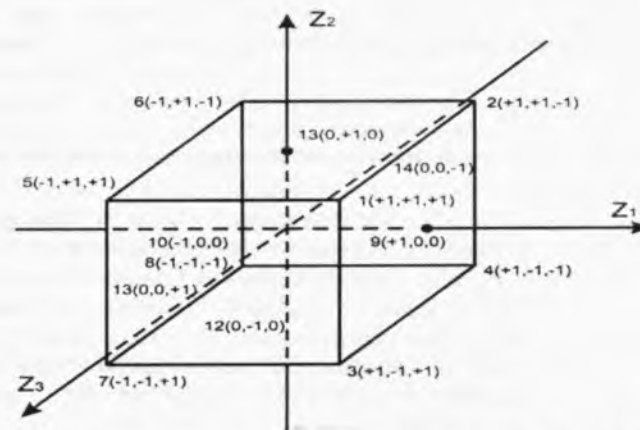


Рис.1. Расположение опытных точек плана эксперимента  $B_3$

Необходимо отметить, что эффективность новой методики тем выше, чем сложнее изучаемая система. Следовательно, предлагаемую методику целесообразно применять прежде всего в тех случаях, когда недостатки чисто детерминированного подхода проявляются наиболее сильно. При этом появляется возможность намечать эффективные пути снижения динамических нагрузок грузоподъемных машин при решении задачи синтеза оптимальных по динамичности конструкций. Поэтому разработанную методику особенно целесообразно использовать на ранней стадии проектирования грузоподъемной машины, когда неизвестны приемлемые значения динамических параметров крана и имеется возможность альтернативных решений.

**В третьей главе** описаны теоретические и экспериментальные исследования, проведенные с целью обоснования целесообразных динамических моделей мостовых кранов с учетом точности и трудоемкости определения горизонтальных инерционных нагрузок. Рассмотрены три вида динамических моделей мостового крана разной сложности: с распределенной массой пролетного строения; четырехмассовая модель, в которой металлоконструкция крана приведена к двум сосредоточенным массам; трехмассовая модель, в которой принята абсолютная жёсткость механизма передвижения.

На базе исходных дифференциальных уравнений в частных производных для каждого вида динамических моделей получены системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающие движение различных узлов крана в переходных режимах. Для решения данных систем разработаны алгоритмы и программы, позволяющие реализовать любой закон изменения движущей (тормозной) силы привода.

На рис.2. показана трёхмассовая динамическая модель мостового крана.



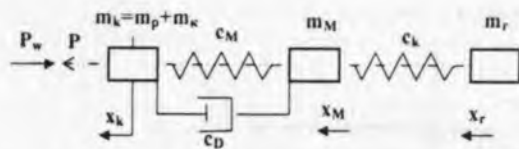


Рис.2. Трехмассовая двухсвязная динамическая модель мостового крана

Здесь использованы следующие обозначения:  $m_p$  и  $m_k$  – приведённые к ходовым колёсам масса вращающихся частей электропривода и масса концевой балки с оборудованием;  $m_M$  и  $m_r$  – массы порожней тележки и груза;  $c_M$  и  $c_k$  – коэффициенты жёсткости тележки и грузовых канатов;  $c_D$  – коэффициент затухания колебаний механизма передвижения;  $P$  – сила привода;  $P_w$  – сила статического сопротивления;  $x_i$  – текущие перемещения соответствующих узлов.

Движение трехмассовой динамической модели на рис.2. описывается дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} m_k \ddot{x}_k + c_D(\dot{x}_k - \dot{x}_M) + c_M(x_k - x_M) - P + P_w = 0, \\ m_M \ddot{x}_M + c_D(\dot{x}_k - \dot{x}_M) - c_M(x_k - x_M) + c_k(x_M - x_r) = 0, \\ m_r \ddot{x}_r - c_k(x_M - x_r) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений (2) на ЭВМ понизим порядок системы путем введения новых переменных:

$$\begin{cases} x_1 = x_k; & x_2 = \dot{x}_k; \\ x_3 = x_M; & x_4 = \dot{x}_M; \\ x_5 = x_r; & x_6 = \dot{x}_r; \end{cases} \quad (3)$$

Тогда система (2) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m_k} [-c_D(x_2 - x_4) - c_M(x_1 - x_3) + P - P_w]; \\ \dot{x}_3 = x_4; \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{m_M} [c_D(x_2 - x_4) + c_M(x_1 - x_3) - c_k(x_3 - x_5)]; \\ \dot{x}_5 = x_6; \\ \dot{x}_6 = \frac{c_k}{m_r}(x_3 - x_5). \end{cases} \quad (4)$$

С помощью разработанных моделей и программ были проведены исследования влияние движущей и тормозной силы асинхронного электропривода в режимах противовключения и динамического торможения на горизонтальные инерционные нагрузки металлоконструкции мостового крана.

При этом приведенная к ходовым колесам сила электропривода учитывалась с помощью как статических, так и динамических характеристик. Даны рекомендации по применению рассмотренных динамических моделей при расчете динамических нагрузок:

а) расчет максимальных горизонтальных инерционных нагрузок металлоконструкций мостовых кранов, с достаточной для практических расчетов точностью, можно осуществлять по трехмассовой двухсвязной динамической модели, в которой движущая (тормозная) сила привода учитывается с помощью статических характеристик электродвигателя.

б) для расчета динамических нагрузок в элементах привода пригодна четырехмассовая трехсвязная динамическая модель, в которой движущая (тормозная) сила привода задается с помощью динамических характеристик электродвигателя.

в) динамическую модель с распределенной массой пролетного строения целесообразно использовать для уточненного расчета и исследования прогибов, скоростей, ускорений, поперечных сил и изгибающих моментов в сечениях пролетного строения мостового крана при различных положениях грузовой тележки.

В работе приведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований переходных режимов мостового крана при разгоне и торможении, которое подтвердило адекватность разработанных математических моделей и реальных физических процессов. Так, при использовании трёхмассовой модели средние значение экспериментальных и расчётных ускорений середины моста крана ( $x_M$ ) как при разгоне, так и при торможении крана практически совпадают, а отличие значений ускорений концевых балок ( $x_k$ ) не превышает 7%.

**Четвертая глава** посвящена разработке схем управления и исследованиям многодвигательных асинхронных электроприводов передвижения мостовых кранов в различных режимах работы. В основу разработки новых схем электромеханической системы согласованного вращения (ЭМС СВ) положено изучение поведения многодвигательных систем в статических и динамических режимах. В работе показано, что регулирование уравнительных моментов в ЭМС СВ возможно воздействием как на статорные, так и на роторные цепи двигателей. Очень важным показателем ЭМС СВ является характер протекания переходных процессов. Взаимосвязанность машин системы за счет электрической связи между роторами накладывает специфические особенности в характер протекания переходных процессов. Наибольший практический интерес представляет величина угла рассогласования роторов машин и ее изменение в период пуска или сброса и наброса нагрузки. В работе приведено описание разработанной схемы управления электропривода передвижения мостового крана, содержащего два двигателя с фазными роторами, расположенными на концах фермы крана. Схема имеет общий тиристорный регулятор в цепи роторов, управление которым ведётся в зависимости от угла рассогласования. Описана также схема трёхступенчатой предварительной синхронизации, которая позволяет устанавливать роторы двигателей в одинаковое угловое положение, обеспечивая

тем самым синхронный разгон при повторном пуске. Предложены также схемные решения, обеспечивающие синхронизацию роторов ЭМС СВ на ходу.

Рассмотрены вопросы аналитического описания многодвигательной ЭМС СВ. Получены уравнения, которые позволяют проводить исследования влияния параметров системы и вводимых элементов на её основные показатели. Корректность полученных уравнений подтверждена экспериментальной проверкой (например, расхождение расчётной и экспериментальной кривой угла рассогласования составляет не более 10%).

ЭМС СВ представляет из себя упругую систему типа «пружина -масса», которая может впадать в колебательной режим. При сравнении различных систем, были рассмотрены зоны динамически устойчивой работы системы, а также возможности расширения этой зоны без ухудшения статических показателей. Показано, что хотя ЭМС СВ по схеме рабочий вал по сравнению с уравнильным и дистанционным валом менее подвержен автоколебательным режимам, вследствие того, что по требованиям статических показателей работает всегда в нагруженном режиме, имея какой-то минимально допустимый нагрузочный момент, следовательно и положительное демпфирование нагрузки на валу, все же сопротивление в роторной цепи значительно снижает жесткость механических характеристик по S и система становится склонной к колебаниям. Расчет динамики ЭМС СВ без учета внешних демпфирующих факторов можно считать приемлемыми для всех систем, т.к. это значительно упрощает расчеты и определяет как бы нижнюю границу устойчивости системы. Это объясняется тем, что все внешние демпфирующие факторы, как правило, являются успокоителями колебаний.

Рассмотрена схема электродинамического торможения с ёмкостью в цепи ротора на примере двухдвигательной системы (рис.3).

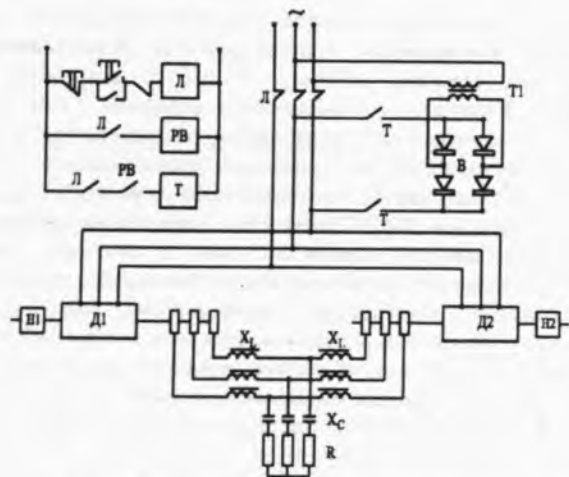


Рис. 3. Схема электродинамического торможения

Принимая, что машины ненасыщены, выражения для расчёта их тормозных моментов получены в следующем виде:

$$M_{(12)T} = \frac{M_p s_T}{S_{p.T}} \left\{ \frac{1 - \cos a}{a \left[ 1 + \frac{D_T^2}{a^2} \left( \frac{S_T}{S_{p.T}} \right)^2 \right]} + \frac{1 + \cos a}{1 + D_T^2 \left( \frac{S_T}{S_{p.T}} - \frac{S_{p.T}}{S_T} \right)^2} \right\} (\mp)$$

$$(\mp) \frac{s_T D_T}{S_{p.T}} \left\{ \frac{1}{a^2 \left[ 1 + \frac{D_T^2}{a^2} \left( \frac{s_T}{S_{p.T}} \right)^2 \right]} - \frac{1 - \left( \frac{s_T}{S_T} \right)^2}{1 + D_T^2 \left( \frac{S_T}{S_{p.T}} - \frac{S_{p.T}}{S_T} \right)^2} \right\} \sin a \quad (5)$$

$$a = \frac{r_2^1}{r_2^1 + 2R'}; \quad M_p = \frac{1.46 I_{ЭКВ}^2 x_\mu^2 S_{p.T}}{n_0 (r_2^1 + 2R')}$$

где:  $S_{p.T} = \sqrt{\frac{2'x_c}{x_2^1 + x_\mu}}$  - резонансное скольжение;  $S_T = n/n_0$  - скольжение

ротора в режиме динамического торможения;  $D_T = \sqrt{\frac{2'x_c (x_2^1 + x_\mu)}{r_2^1 + 2R'}}$  -

добротность динамического торможения;  $r_2^1, x_2^1, x_c, x_\mu, R'$  - приведённые параметры роторной цепи электрической схемы замещения двигателя.

Рассмотрен также ещё ряд различных способов и схем торможения многодвигательных ЭМС СВ, в том числе электродинамическое торможение с индуктивным реостатом и конденсатором в роторной цепи, наличие которых обеспечивает расширение возможностей динамического торможения. Для всех схем приведены формулы, позволяющие рассчитывать механические характеристики двигателей в режиме торможения. Проведён анализ этих характеристик и даны рекомендации по выбору параметров схем.

Возможны различные виды согласованного останова двигателей ЭМС СВ. Наиболее просто можно осуществить согласованный останов двигателей отключением одного из приводов статоров двигателей системы с одновременным увеличением общего сопротивления в цепях роторов с таким расчетом, что критическое скольжение системы равнялось примерно  $Sm1 = 2/50$ . В этом случае резко падают приводные составляющие моментов, и двигатель ЭМС СВ согласованно останавливаются, имея на валах лишь уравнильные моменты. Для сокращения свободного выбега и более точного останова двигателей с углом  $\theta = 0$  можно применить режим динамического торможения ЭМС СВ. Показано, что выбор оптимального способа торможения должен осуществляться с учётом конкретных эксплуатационных требований, предъявляемых к мостовым кранам.

**Пятая глава** посвящена оптимизации механических характеристик привода передвижения мостового крана в режиме электродинамического торможения.

Электродинамическое торможение привода передвижения мостового крана может осуществляться по механическим характеристикам, вид которых зависит от следующего: способа возбуждения двигателя в режиме динамического торможения (независимое торможение, самовозбуждение, смешанное возбуждение); схемы соединения источника постоянного тока с обмоткой статора (симметричная, несимметричная); величины тока возбуждения; величины сопротивления добавочных резисторов в цепи ротора.

Показано, что для механизмов передвижения кранов наиболее целесообразным является применение режима динамического торможения с независимым возбуждением. Поскольку симметричные схемы не могут быть использованы для асинхронных двигателей с фазным ротором (так как обмотка фазного ротора не рассчитана на поле третьих гармоник), то выбрана несимметричная схема. Тогда, при выбранном способе возбуждения двигателя и схеме соединения обмоток, любую механическую характеристику, из семейства универсальных характеристик можно однозначно задать с помощью двух факторов: тока возбуждения  $I_a$  и сопротивления цепи ротора  $R_p$ .

Критический момент  $M_k^*$  и критическое скольжение  $S_k^*$  для крановых двигателей в режиме динамического торможения могут быть определены по выражениям:

$$M_k^* = \frac{24B(I_{\text{кн}}/I_{0x})^2 U_{\text{ном}} I_{0x}}{1 + 0.505(I_{\text{кн}}/I_{0x}) n_n}; \quad (6)$$

$$S_k^* = (0.58 \frac{I_{\text{кн}}}{I_{0x}} + 0.40) \frac{R_p I_{0x}}{U_{\text{фн}}}, \quad (7) \quad \text{где}$$

$I_{\text{кн}} = K_{\text{кв}} I_a$  - трехфазный ток статора, эквивалентный по м.д.с. постоянному току возбуждения,  $K_{\text{кв}}$  - коэффициент эквивалентности (для принятой нами несимметричной схемы подключения фаз статора  $K_{\text{кв}} = 0,816$ );  $I_{0x}$  - ток холостого хода в двигательном режиме при номинальном напряжении;  $U_{\text{фн}}$  - номинальное напряжение;  $R_p'$  - приведенное к статору сопротивление цепи ротора (с учетом добавочных резисторов).

Форма механических характеристик привода при динамическом торможении оказывает существенное влияние на величину динамических нагрузок металлоконструкции крана, амплитуду раскачивания груза, время торможения, а также на характер протекания переходного процесса. Например, при торможении по механическим характеристикам с большим значением  $S_k^*$  ( $S_k^* \geq 1$ , рис.4) максимальные динамические нагрузки возникают в начале процесса торможения вследствие значительного скачка момента двигателя. При этом торможение осуществляется на устойчивом участке механической характеристики, оказывающем демпфирующее воздействие на колебания металлоконструкции и груза. При других значениях  $S_k^*$  двигатель может работать на неустойчивом участке характеристики. Поэтому необходимо оптимизировать

механическую характеристику привода передвижения, т.е. найти такую, при которой тормозные параметры будут наиболее приемлемыми.

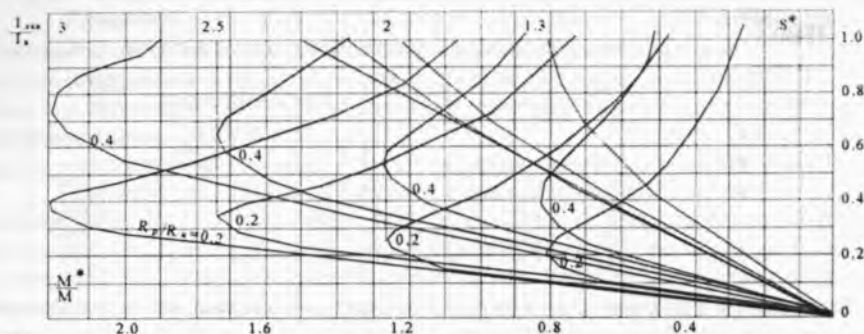


Рис.4. Универсальные механические характеристики асинхронных электродвигателей в режиме динамического торможения

Решение поставленной оптимизационной задачи рассмотрено на базе мостового крана грузоподъемностью 20/5т., динамическую модель которого представим в виде трех массовой двухсвязной расчетной схемы (см.рис. 2). Движение трехмассовой модели в переходных режимах описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений (2), в которых сила привода, приведенная к ходовым колесам крана, в режиме динамического торможения определяется по формуле:

$$P_{\text{тор}} = \frac{K_q x_2}{B_q + (x_2)^2}, \quad (8)$$

где  $K_q = 2M_{kq}^* S_k^* V_0 \frac{i_m}{r} \eta$ ;  $B_q = (S_k^* kq)^2 V_0^2$ ;  $M_{kq}^*$   $S_k^*$  - максимальный момент и критическое скольжение на q-той механической характеристике.

Оптимизация выполнена по обобщенному критерию, включающему следующие величины: значения максимальных динамических нагрузок на металлоконструкцию  $S_m^{\text{max}}$ , время торможения крана  $t_{\text{тор}}$ , амплитуду отклонения груза от вертикали после остановки крана  $A^{\text{max}}$ .

Таким образом, задача определения оптимальной механической характеристики привода сводится к нахождению таких значений  $M_k^*$  и  $S_k^*$ , которым соответствует механическая характеристика, обеспечивающая наиболее приемлемые значения  $S_m^{\text{max}}$ ,  $t_{\text{тор}}$ ,  $A^{\text{max}}$ .

Оптимизация выполнена методом крутого восхождения, в котором поиск оптимума осуществляется по градиенту функции отклика. Процедура оптимизации проиллюстрирована в работе на примере двигателя типа МТВ 411-8 электропривода передвижения мостовых кранов грузоподъемностью 20/5 т. Выбираем области варьирования параметров механической характеристики  $M_k^*$  и  $S_k^*$ . Затем по результатам реализованного плана эксперимента (см. табл.2)



получаем линейное уравнение регрессии, связывающее указанные параметры с обобщенным параметром оптимизации  $D$ . В работе подробно описана методика определения значений  $M_k^*$  и  $S_k^*$ , обеспечивающих оптимум параметра  $D$ .

Таблица 2

### План и результаты полного факторного эксперимента

№	$Z_1$ ( $M_k^*$ )	$Z_2$ ( $S_k^*$ )	$S_m^{max}$ , кН	$t_{top}$ , с	$A^{max}$ , м	Частные функции желательности			$D$
						$d_1$	$d_2$	$d_3$	
1	1	1	41,37	5,7	0,404	0,243	0,855	0,698	0,525
2	-1	1	39,01	5,9	0,354	0,341	0,845	0,758	0,603
3	1	-1	42,96	5,6	0,440	0,182	0,859	0,648	0,466
4	-1	-1	40,60	5,9	0,345	0,274	0,845	0,767	0,562

При электродинамическом торможении мостового крана по оптимальной механической характеристике, в отличие от торможения колодочным тормозом, существенно уменьшаются максимальная величина инерционных нагрузок металлоконструкции крана, амплитуда и время раскачивания груза после остановки крана. Поэтому электродинамическое торможение приводов передвижения мостовых кранов по оптимальным механическим характеристикам является эффективным средством снижения уровня динамических нагрузок мостовых кранов, повышения их производительности, улучшения условий работы машинистов кранов.

**В шестой главе** описано разработанное автором устройство для электродинамического торможения (УДТ) механизма передвижения мостового крана, а также приведены результаты экспериментальных исследований этого устройства.

Функциональная схема УДТ приведена на рис.5

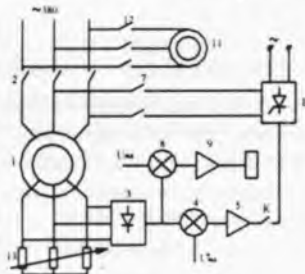


Рис.5. Функциональная схема УДТ

УДТ асинхронного двигателя 1, подключенного к сети через контакты 2, содержит трехфазный выпрямитель 3, вход которого подключен к обмотке ротора двигателя. Выход выпрямителя 3 через блок сравнения 4 и усилитель постоянного тока 5 подсоединен ко входу управляемого тиристорного выпрямителя В, выход которого с помощью контакта 7 подключен к обмотке статора электродвигателя. Кроме того к выходу выпрямителя 3 подсоединен один

из входов блока сравнения 8, выход которого через усилитель 9 подключен к обмотке реле 10. Последнее управляет контактами 12, которые служат для подключения к сети привода толкателя колодочного тормоза 11.

Разработанное УДТ позволяет реализовать следующие режимы динамического торможения с независимым возбуждением:

- автоматический без обратной связи (выключатель  $K$  разомкнут);
- автоматический с отрицательной обратной связью от обмотки ротора двигателя (выключатель  $K$  замкнут);
- управляемый (посредством педали осуществляется изменение  $U_{зад}$ ).

Для экспериментальной проверки работоспособности и эффективности предложенного УДТ, автором был разработан и изготовлен специальный испытательный стенд. В работе приведено подробное описание этого стенда. Для измерения оборотов двигателя был разработан и изготовлен датчик оборотов, состоящий из неподвижного геркона и постоянного магнита, закреплённого на шкиве, который связан с валом двигателя ременной передачей.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что разработанный блок контроля положения обмотки ротора двигателя позволяет в широких пределах регулировать и, в зависимости от условий эксплуатации, задавать время отключения УДТ с одновременным замыканием колодочного тормоза. Таким образом, разработанный блок не только эффективен как средство контроля динамического торможения, обеспечивающее безопасность торможения кранового электропривода при исчезновении электроэнергии, но и позволяет устранить традиционный недостаток динамического торможения – малую величину момента торможения на низких частотах вращения ротора двигателя. Это достигается тем, что торможение электропривода осуществляется в два этапа: вначале электродвигатель работает в режиме динамического торможения, которое обеспечивает плавное затормаживание привода с номинальной на пониженную частоту вращения, а затем (когда напряжение в цепи ротора и тормозной момент двигателя уменьшается до определенной величины) срабатывает блок контроля, вследствие чего отключается УДТ и замыкается колодочный тормоз, что приводит к полной остановке механизма.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ работ по динамике передвижения мостовых кранов показывает, что применение чисто детерминированного подхода к задачам динамики грузоподъемных машин не дает возможности получить одновременно точное и простое решение, позволяющее рассчитывать инерционные нагрузки, судить о влиянии основных факторов на величину этих нагрузок и намечать эффективные пути их снижения.

2. На основе предлагаемого подхода к решению задач динамики грузоподъемных машин, базирующегося на совместном использовании детерминированного метода и математической теории планирования



эксперимента, разработана инженерная методика расчета инерционных нагрузок грузоподъемных кранов.

3. Разработана математическая модель мостового крана, учитывающая распределенную массу пролетного строения и электромеханические переходные процессы в электроприводе механизма передвижения. Разработан алгоритм решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающий движение мостового крана в переходных режимах и включающий уравнения в частных производных и обыкновенные дифференциальные уравнения.

4. Исследовано влияние приведенной силы привода передвижения мостового крана на величину и характер горизонтальных инерционных нагрузок в различных переходных режимах: двигательном, торможении противовключением, динамического торможения. Отмечена необходимость учета силы привода с помощью механических характеристик в расчетах инерционных нагрузок привода и металлоконструкций мостовых кранов.

5. Исследовано влияние электромагнитных переходных процессов в электроприводе и металлоконструкции мостового крана путем введения в математическую модель крана динамической характеристики двигателя.

6. Выбрана, теоретически и экспериментально обоснована наиболее приемлемая по точности и трудоемкости определения инерционных нагрузок динамическая модель мостового крана на основе исследования расчетных схем с сосредоточенными и распределенными параметрами пролетного строения, а также учета механических характеристик приводного двигателя.

7. Предложены схемы синхронизации и динамического торможения двигателей электромеханической системы согласованного вращения. Для всех указанных схем получены аналитические уравнения, которые позволяют проводить исследования влияния параметров схем на основные показатели привода.

8. Разработана методика оптимизации механических характеристик привода передвижения мостового крана в режиме динамического торможения по обобщенному критерию, включающему максимальные инерционные нагрузки металлоконструкций, время торможения крана и амплитуду раскачивания груза после остановки крана.

9. Разработано, изготовлено и испытано устройство для динамического торможения асинхронного электропривода, позволяющее осуществлять оптимальное по динамическим нагрузкам и быстрдействию торможения мостового крана. Для проведения испытаний был разработан и изготовлен специальный испытательный стенд. Данное устройство динамического торможения внедрено на двух предприятиях КР, что подтверждено соответствующими актами.

#### Список опубликованных работ:

1. Сагитов П.И., Темиров К.О. Многодвигательный электропривод механизма передвижения мостового крана. //Сб. научных трудов по материалам первой международной конференции//. Алматы. 1998.- С.102-105.

2. Темиров К.О. Динамическая устойчивость ЭМС СВ двухдвигательной системы электропривода передвижения мостового крана. //Сб. научных трудов по материалам международной научно-технической конференции//. Бишкек. КТУ. 2000 г.- С. 134-139.

3. Сагитов П.И., Темиров К.О. Уравнительные схемы многодвигательного электропривода синхронного вращения на базе электрических валов. //Научно-технический журнал «Известия вузов»// № 4. Бишкек. 2005г.- С. 3-7.

4. Темиров К.О., Келебаев К. Уравнительные схемы многодвигательного электропривода синхронного вращения. //Научно-технический журнал «Известия вузов»// № 3. Бишкек. 2005.- С. 72-76.

5. Темиров К.О., Айткеев А.И. Нормальный режим работ электродвигателей в условиях повышенной влажностью окружающей среды. //Сб. по научным трудам и рац. предложениям//. «Кыргызэнергохолдинг», Бишкек. 1997 г.- С. 17-18.

6. Темиров К.О. Исследование влияния электромагнитных процессов привода передвижения крана на горизонтальные инерционные нагрузки металлоконструкции. //Научно-технический журнал «Известия вузов»// № 3. Бишкек. 2005г.-С. 165-169.

7. Аккозиев И.А., Темиров К.О., Алгоритм построения методики определения горизонтальных инерционных нагрузок мостовых кранов //Научно-технический журнал «Известия вузов»// № 4. Бишкек. 2005 г. - С. 172-175.

8. Темиров К.О. Оптимизация механических характеристик привода передвижения мостового крана в режиме электродинамического торможения. //Проблемы автоматики и управления// /Научно-технический журнал/. Институт автоматики. Бишкек. 2005 г.-С. 63-66.

9. Темиров К.О. Схемы синхронизации и несимметричные режимы двигателей электромеханической системы синхронного вращения //Вестник КРСУ// №5, 2005 г.-С.97-101.

10. Сагитов П.И., Темиров К.О. Активные уравнительные схемы электромеханических систем согласованного вращения, управляемые по статормым цепям. //Сб. научных трудов по материалам первой международной научно-технической конференции//. Филиал БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова Бишкек., июнь 2006 г.- С. 40-44.

11. Темиров К.О. Расчет динамической устойчивости методом структурного анализа //Вестник Павлодарского Государственного Университета им. С. Торайгырова// №3 Павлодар 2007 г.- С. 128-133.

## Резюме

Темиров Кубанычбек Осорович. «Разработка и исследование управляемых систем динамического торможения электропривода передвижения мостовых кранов»;

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. – “Электротехнические комплексы и системы”.

*Ключевые слова: переходные процессы, механизм передвижения, электродинамическое торможение, устойчивость, динамика, модель, управляемая систем, структурная схема, оптимальное управление, система возбуждения.*

В диссертационной работе решаются задачи по исследованию управляемых систем динамического торможения электропривода при передвижении мостовых кранов и разработке эффективных путей снижения динамических нагрузок. Изложена сущность идей и алгоритм методики горизонтальных инерционных нагрузок мостовых кранов, базирующейся на совместном использовании детерминированного метода и теории планирования экспериментов. Показаны преимущества разработанной методики и области ее применения.

Рассмотрены динамическая модель мостового крана с распределенной массой пролетного строения, четырех и трехмассовая динамические модели. Исследовано влияние движущей и тормозной силы асинхронного электропривода в режимах противовключения и динамического торможения на горизонтальные инерционные нагрузки металлоконструкции мостового крана. Даны рекомендации по применению рассмотренных динамических моделей при расчете динамических нагрузок.

Раскрыты вопросы оптимизации механических характеристик привода передвижения мостового крана в режиме электродинамического торможения.

Разработано устройство для электродинамического торможения механизма передвижения мостового крана, приведены результаты экспериментальных исследований этого устройства.

## Резюме

Темиров Кубанычбек Осорович. «Көпүрө крандын жылып жүрүүсүндөгү динамикалык токтоосунун электроприводдук башкаруу системасын изилдөө жана иштеп чыгуу».

05.09.03 – “Электротехникалык комплекстер жана торчолор” адистиги боюнча техника илимдеринин кандидаты деген илимий даражасын алуу үчүн диссертация эмгеги.

*Ачкычтык сөздөр: өтмө жараян, жылып жүрүү механизми, электродинамикалык токтотуу, туруктуулук, динамика, түзүлүш, башкаруу системасы, структуралык схема, оптималдуу башкаруу, козголтуу системасы.*

Бул диссертациялык жумушта көпүрө крандын жылып жүрүүсүндөгү динамикалык токтоосунун электроприводдук башкаруу системасын изилдөө маселеси чечилген жана динамикалык жүгүн эффективдүү азайтуу жолдорун иштеп чыгуу, ой жүгүртүүлөр маңызы коюлган. Көпүрө крандын горизонталдык инерциялык жүгүнүн алгоритм методикасы, детерминикалык методдун базасында биргеликте колдонуу жана эксперименталдык пландоо теориясы колдонулган. Иштелип чыккан методдордун артыкчылыгы жана колдонуу областары көрсөтүлгөн.

Көпүрө крандын динамикалык модели менен бөлүштүрүү аралык түзүлүштөрүн, төрттүк жана үч массалык динамикалык моделдери каралган. Асинхрондук электроприводтун токтотуу күчүнүн каршы жандыруу режимининдеги жылышуу тийиштиги изилденген жана , көпүрө крандын металлоконструкциясынын горизонталдык инерциялык жүгүнө болгон динамикалык токтолушу аныктанылган. Динамикалык моделди колдонуу, динамикалык жүгүн эсептөөдө сунушталган.

Көпүрө крандын электродинамикалык токтолуу режиминде приводдун оптималдуу механикалык мүнүздөмөлөрүнүн суроолору ачылган.

Ошондой эле көпүрө крандын жылып кыймылдоо механизминде электродинамикалык токтотуусу үчүн иштелип чыккан түзүлүштөр, эксперименталдык изилдөө жыйынтыгында берилген.

### Summary

Temirov Kybanychbec Osorovich. "Creation and research of dynamic braking controllable system for electric drive of bridge crane movement."

The Ph. Thesis for the scientific degree of candidate of technical sciences. Speciality 05.09.03 – Electromechanical system and complexes

*Key word: an intermittent process, accent mechanism, electrodynamic braking, stability, dynamic, model, system of management, repair disconnecting, structural scheme, optimum management.*

In this dissertation paper it is served the research tasks of dynamical loads under bridge cranes transportation and effective reductions way. Also this paper is expounded to essence of ideas and algorithm of horizontal, intentional leads of bridge cranes methodic, which is based on joint usage of determined method and experiments planning theory. The advantages of developed methodic and field of its using are showed.

The dynamic model bridge cranes with spread mass of span construction, fourth third mass dynamic models. It is investigated the brake and moved force influence of asynchronous electric drive in regimes of off and dynamic braking on horizontal inertial metal construction's leads of bridge cranes. Recommendation by application of considered dynamic model at dynamic leads countered given. Mechanical drive characteristic optimization questions of bridge cranes moving in regime of electrodynamic braking are discovered. Also it's carried out the installation for electrodynamic mechanism braking of bridge cranes transportation, the result of experimental researchment if that installation is given.