

Бардин Алексей Константинович

**Обоснование и выбор основных параметров уравновешенных механизмов подъема перегрузочных порталных кранов.**

Специальность: 05. 05. 04.

Дорожные, строительные подъемно-транспортные машины

**Автореферат**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

С-Петербург – 2001

Работа выполнена в С-Петербургском Государственном Университете  
Водных Коммуникаций

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук, профессор

Брауде В.И.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- Доктор технических наук, профессор Соколов С.А.
- Кандидат технических наук, доцент Матвеева Е.В.

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

**АООТ "ПОДЪЕМТРАНСМАШ"**

Защита состоится 18 декабря 2001 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212. 229. 24 при Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, С-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 1, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке С-Петербургского технического университета. С-Петербург, ул. Политехническая, 29, главное здание.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2001 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ДОЦЕНТ

Смирнов В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современные грузоподъемные машины (ГПМ) должны обладать высокими качественными показателями, обеспечивающими производительный, экономичный и безопасный труд. Эти свойства особенно важны для интенсивно работающих ГПМ, к числу которых относятся перегрузочные порталные краны (ПК).

В целях повышения экономичности работы грузоподъемных машин целесообразно использование энергосберегающих устройств, к числу которых относятся системы уравнивания (СУ) механизмов.

Механизм подъема является, как правило, самым энергоемким и потребляет более половины всей электроэнергии при работе ПК. Между тем возможно снижение энергоемкости механизмов подъема порталных кранов до 60%, за счет применения систем уравнивания груза, что влечет за собой существенное уменьшение затрат на электроэнергию. В связи с этим исследование, направленное на разработку теоретически обоснованного метода выбора конструкций уравновешенных механизмов подъема порталных кранов (УМППК) и их основных параметров, вполне актуальна.

Существующие способы проектирования УМППК не позволяют рационально решить проблему определения их основных параметров, преодолеть распространенный интуитивный подход к выбору предпочтительной конструкции из числа альтернативных вариантов. При этом не учитываются такие случайные особенности эксплуатации, как тип перегружаемого груза, технологический вариант работы крана, а также ряд иных особенностей, существенно влияющих на затраты мощности механизма при работе ПК. Объективное знание величины полученного экономического эффекта от использования в механизмах подъема ПК систем уравнивания части груза позволит уменьшить по сравнению с чисто интуитивными действиями опасность ошибочного определения предпочтительности и приведет к более эффективному использованию людских и материальных ресурсов.

**Цель работы.** Целью диссертационного исследования является разработка научно обоснованного метода выбора предпочтительных конструкций уравновешенных механизмов подъема (УМП) из числа альтернативных вариантов, а также оценка их экономической эффективности при использовании в перегрузочном порталном кране.

**Задачи исследования** заключаются в разработке:

- обобщенной математической модели уравновешенных механизмов подъема порталных кранов с помощью теории графов;
- критериев выбора уравновешенных механизмов подъема и их основных параметров;
- имитационной модели работы уравновешенного механизма подъема, представляющей собой системы дифференциальных уравнений движения элементов дискретных масс под действием случайных нагрузок;
- метода выбора конструкций уравновешенных механизмов подъема порталных кранов и их основных.

**Научная новизна диссертации** заключается в нижеследующем:

- разработан научно-обоснованный метод выбора конструкций уравновешенных механизмов подъема порталных кранов и их основных параметров из числа альтернативных вариантов. Этот метод отличается от известных тем, что здесь учитываются особенности конструкции УМП и случайные условия эксплуатации порталных кранов. Разработанный метод базируется на использовании элементов теорий выбора, графов, множеств и принципов имитационного моделирования;
- разработана обобщенная математическая модель уравновешенных механизмов подъема порталных кранов;
- разработана имитационная модель работы уравновешенного механизма подъема перегрузочного крана;
- разработаны критерии выбора и оценки эффективности использования систем уравновешивания в механизмах подъема перегрузочных

кранов. Критерии выбора выражены через параметры уравновешенных механизмов подъема и условия эксплуатации порталных кранов;

#### **Научные результаты работы, выносимые на защиту:**

- метод выбора предпочтительных конструкций уравновешенных механизмов подъема порталных кранов и их основных параметров. Отбор альтернативных конструктивных вариантов уравновешенных механизмов подъема порталных кранов производится с использованием элементов теории выбора;

- обобщенная математическая модель уравновешенных механизмов подъема порталных кранов, учитывающая такие факторы как случайные условия эксплуатации, особенности конструкции УМППК и т.д.;

- результаты исследования влияния системы уравновешивания на затраты энергии при работе механизмов подъема перегрузочных кранов при случайных условиях эксплуатации.

#### **Практическая ценность работы.**

В результате изучения вопроса уравновешивания части груза в механизмах подъема порталных кранов (МППК) разработан метод, позволяющий выбрать предпочтительные конструкции УМППК и их рациональные параметры при заданных условиях эксплуатации. Применение разработанного метода позволяет снизить энергоемкость механизма подъема порталного крана до 60%.

Разработан алгоритм и пакет программ для сравнения и выбора конструкций УМППК из числа альтернативных вариантов. Разработанный метод принят к использованию в конструкторском бюро порталных кранов АООТ “ПОДЪЕМТРАНСМАШ” при проектировании новых машин. Результаты работы использованы в учебном процессе СПГУВК на кафедрах ПТМ и ТЭАРП.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы докладывались на конференциях “Международная научно-техническая конференция “Транском-

97”(С-Петербург 1997г.), “Научно-методическая конференция-98, Санкт Петербургского Государственного Университета Водных Коммуникаций” (С-Петербург 1998г.), Научно-методическая конференция, посвященная 190-летию транспортного образования (С-Петербург 1999г.).

Разработанный метод выбора предпочтительных конструкций уравновешенных механизмов подъема порталных кранов и их основных параметров был доложен в отделе главного конструктора АООТ “ПОДЪЕМТРАНСМАШ”.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 работ.

**Объем работы.** Диссертация содержит 161 стр. основного текста и состоит из введения, 4-х глав, списка литературы из 95 наименования, приложений на 30 стр. Текст содержит 42 рисунка и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется научная новизна, практическая ценность и намечаются пути внедрение результатов работы.

**В первой главе** проведен обзор, и анализ работ, посвященных исследованию систем энергосбережения используемых в механизмах грузоподъемных машин. Рассмотрены системы энергосбережения, основанные на преобразовании энергии опускания груза и торможения рабочего оборудования.

Вопросами создания систем энергосбережения и применения их в механизмах перегрузочных машин занимались ряд авторов и изобретателей. К их числу принадлежат: Лейферт Э.Т., Лесковец И.В., Пелипенко В.А., Шумков Е.Б. и др. Разработки этих авторов показали, что для ПК наилучшие результаты, с точки зрения снижения энергоемкости механизмов, достигаются при грузовом уравновешивании механизма подъема.

Анализ литературных источников по применению энергосберегающих устройств в механизмах грузоподъемных кранов показал наличие ряда методов выбора основных параметров систем энергосбережения. Однако, в этих

методах не учитываются особенности случайных условий эксплуатации и конструкций перегрузочных кранов, что не позволяет адекватно решить проблему определения основных параметров рассматриваемых систем.

В работе исследуется вопрос о возможности снижения энергоемкости механизма подъема в ПК путем перераспределения нагрузки на электродвигатель лебедки при использовании систем уравнивания груза. Результатом применения систем уравнивания в механизмах подъема является снижение затрат электроэнергии при работе перегрузочных порталных кранов до 60 %.

Для сравнения конструкций уравновешенных механизмов подъема порталных кранов выбраны экономические критерии эффективности. Отмечается целесообразность выражения критериев эффективности через характеристики уравновешенного механизма подъема и условия эксплуатации ПК. Объективное знание величины полученного экономического эффекта от использования в механизмах подъема ПК систем уравнивания позволит уменьшить по сравнению с чисто интуитивными действиями опасность ошибочного определения предпочтительности и приведет к более эффективному использованию людских и материальных ресурсов.

Во второй главе определены основные параметры, характеризующие уравновешенный механизм подъема перегрузочного крана: мощность  $N$  уравновешенного механизма подъема, передаточное отношение  $Z$  системы

уравнивания и коэффициент уравнивания  $K_{yp}$ :  $K_{yp} = \frac{M_{yp}}{M_Q}$ , где  $M_Q$ ,

$M_{yp}$  - моменты на валу грузового барабана от веса поднимаемого груза и от системы уравнивания механизма подъема.

Сформулированы основные направления исследования уравновешенных механизмов подъема порталных кранов (разработка обобщенной модели, изучение влияния случайных условий эксплуатации на показатели эффективности применения систем уравнивания в МППК, разработка методов прогнозирования экономической эффективности при применении СУ в

МППК, разработка метода оценки и выбора предпочтительных конструкций УМППК и их основных параметров.

**Вторая глава** посвящена разработке и описанию обобщенной математической модели уравновешенных механизмов подъема перегрузочных порталных кранов.

Указывается, что сложность проектирования и анализа уравновешенных механизмов подъема порталных кранов усугубляется тем, что их эффективность зависит от большого числа разнообразных факторов (особенности технологического процесса, конструкций ПК, веса поднимаемого груза и т.п.). Для анализа и выбора конструкций и основных параметров УМППК целесообразно сформировать расчетный метод, в котором, с одной стороны, учет вышеперечисленных факторов был ограничен, а с другой стороны, стимулировалось изучение случайных условий эксплуатации, знание которых необходимо для создания УМППК высокой эффективности. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают системные методы расчета. Для реализации этих требований была разработана обобщенная модель.

Обобщенная математическая модель уравновешенного механизма подъема порталного крана построена на основе единой функциональной трактовки, опирающейся на некоторые положения дискретной математики. На рис.1 в виде графа представлена обобщенная модель уравновешенного механизма подъема порталного крана. Каждая из вершин графа **Q**, **X**, **G**, **S**, **N**, **Э**, **K** определяется множеством элементов. Вершина **Q** - определяет характеристики перегружаемого груза, **X** - условия эксплуатации ПК, **G** - характеристики системы уравновешивания, **S** – расчетные модели уравновешенных механизмов подъема ПК, **N** - затрачиваемая мощность при работе УМППК, **Э** - экономические показатели (критерии выбора) эффективности применения систем уравновешивания в МП, **K** – конструкции УМППК.

Каждая из вершин графа представлена в виде множества составленного на основе вариантного метода. Так, например характеристики перегружаемого груза **Q** представляет собой множество:



$$Q = \{Q_1, Q_2\}, \quad (1)$$

где  $Q_1$  – характеристики грузов перегружаемых грейфером;  $Q_2$  – характеристики тарно-штучных грузов.

В свою очередь, каждый тип груза имеет свои разновидности:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \{Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{1j_1}\} \\ Q_2 &= \{Q_{21}, Q_{22}, \dots, Q_{2j_2}\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь  $Q_{11}, \dots, Q_{2j_2}$  - наименования (номера) разновидностей перегружаемого груза; индексы  $j_1, j_2$  - соответствуют количеству разновидностей грузов при работе в грейферном и крюковом вариантах соответственно.

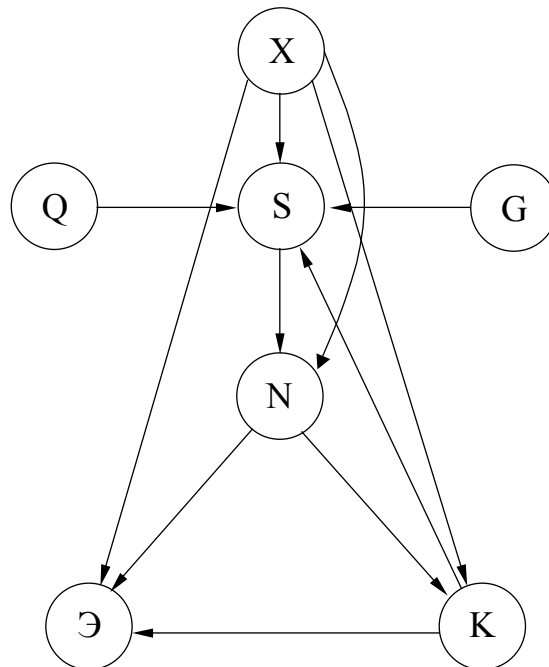


Рис. 1. Обобщенная модель уравновешенного механизма подъема перегруженного крана

Перегружаемая масса каждой разновидности груза за цикл является случайной величиной, которая определяется перечнем характеристик (закон распределения, параметры закона распределения). Возможен ряд вариантов распределения массы одного подъема. В связи с этим имеем:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Q}_{11} &= \{\mathbf{Q}_{111}, \mathbf{Q}_{112}, \mathbf{Q}_{113}\} \\ \mathbf{Q}_{12} &= \{\mathbf{Q}_{121}, \mathbf{Q}_{122}, \mathbf{Q}_{123}\} \\ &\vdots \\ \mathbf{Q}_{2j_2} &= \{\mathbf{Q}_{2j_21}, \mathbf{Q}_{2j_22}, \mathbf{Q}_{2j_23}\} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

В этих множествах:  $\mathbf{Q}_{1j_1}, \mathbf{Q}_{2j_2}$  - законы распределения масс поднимаемого груза (включающий в себя значение нормирующего коэффициента) при работе в грейферном и крюковом вариантах соответственно;  $\mathbf{Q}_{1j_2}, \mathbf{Q}_{1j_3}, \mathbf{Q}_{2j_22}, \mathbf{Q}_{2j_23}$  - определенное значение математического ожидания и среднеквадратичного отклонения масс поднимаемого груза при работе в грейферном и крюковом вариантах соответственно.

Отбор элементов множества участвующих в расчетах удобно описывать с помощью пороговых функций  $\delta$  принимающие значения  $\mathbf{0}$  или  $\mathbf{1}$ .

Другие множества обобщенной модели описываются аналогичным образом.

Во второй главе также описан алгоритм применения обобщенной модели уравновешенных механизмов подъема ПК. Рассмотрены и проанализированы основные конструкции уравновешенных механизмов подъема ПК (одна из схем представлена на рис. 2), схемы уравновешивания механизмов подъема перегрузочных кранов при работе с навалочным и тарно-штучным грузом. Приведены примеры кинематических схем лебедок уравновешенных механизмов подъема перегрузочных кранов. Сформирована система ограничений, охватывающая весь комплекс требований, предъявляемых к конструкциям уравновешенных механизмов подъема ПК.

**Третья глава** посвящена составлению динамических моделей уравновешенных механизмов подъема перегрузочных кранов. Динамические модели уравновешенных механизмов подъема, в состав которых входят расчетные схемы (см. рис.3), дифференциальные уравнения движения, математическое описание внешних воздействий и т.д. используются при имитационном моделировании работы УМП при нахождении нагрузок в элементах механизма,

затрат энергии и других расчетов, необходимых для формирования текущих данных в обобщенной модели УМППК.

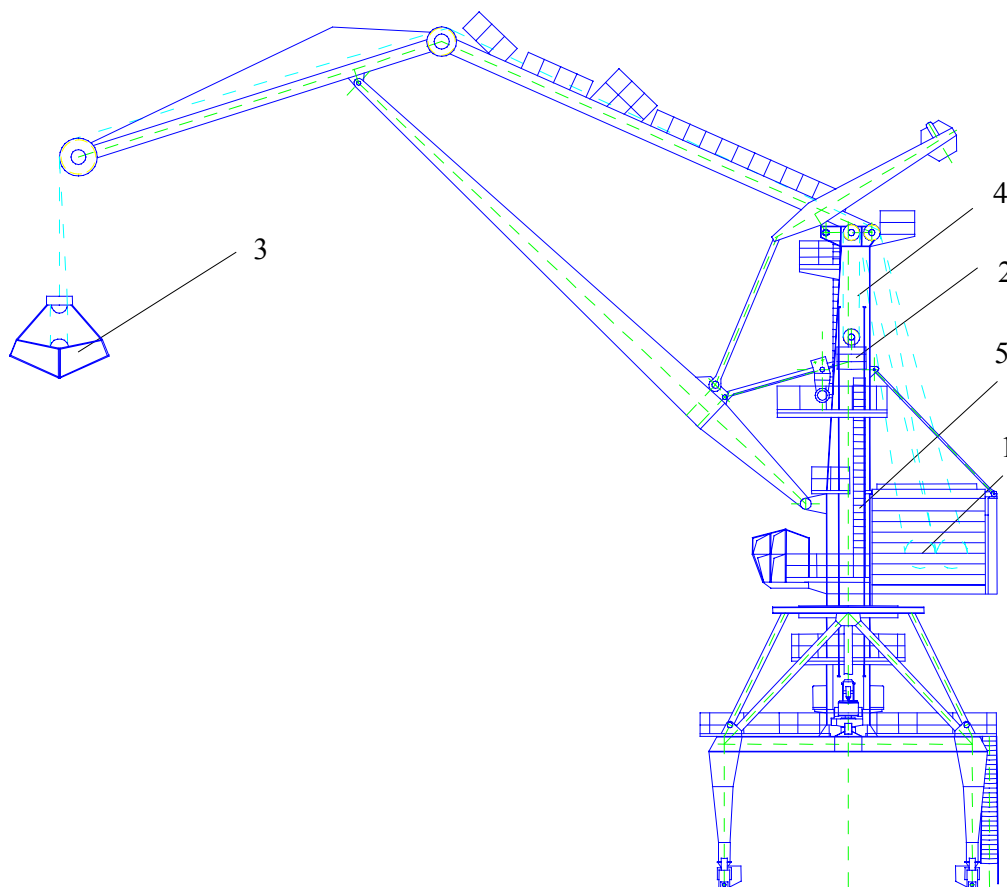


Рис. 2. Схема конструкции уравновешивания механизма подъема ПК.  
1 - лебедка механизма подъема ПК; 2 - противовес СУ; 3 - поднимаемый груз, 4 – передающий механизм;  
5 - направляющие противовеса СУМП.

При составлении динамических моделей приняты следующие допущения: рассматриваются плоские динамические модели механизмов подъема перегрузочных кранов; рассеивание энергии упругих колебаний пропорционально скорости изменения деформации соответствующих упругих звеньев; не учитываются зазоры в элементах механизмов; момент, создаваемый электродвигателями, аппроксимируется кривыми Клосса.

В качестве примера, расчетная модель УМП перегрузочного крана при работе с навалочным грузом представлена на рис. 3.

Дифференциальные уравнения, описывающие динамические процессы, происходящие в системе изображенной на рис.3. представляются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} m_3 \ddot{S}_3 &= P_3 - (S_3 - S_r) c_3 + (S_{np1} - S_3) c_{3п} - \alpha(\dot{S}_3 - \dot{S}_r) + \beta(\dot{S}_{np1} - \dot{S}_3) \\ m_n \ddot{S}_n &= P_n - (S_n - S_r) c_n + (S_{np2} - S_n) c_{nn} - \alpha(\dot{S}_n - \dot{S}_r) + \beta(\dot{S}_{np2} - \dot{S}_n) \\ m_{np1} \ddot{S}_{np1} &= G_1 - (S_{np1} - S_3) c_{3п} - \beta(\dot{S}_{np1} - \dot{S}_3) \\ m_{np2} \ddot{S}_{np2} &= G_2 - (S_{np2} - S_n) c_{nn} - \beta(\dot{S}_{np2} - \dot{S}_n) \\ m_{гр} \ddot{S}_r &= -Q + (S_3 - S_r) c_3 + (S_n - S_r) c_n + \alpha(\dot{S}_3 - \dot{S}_r) + \alpha(\dot{S}_n - \dot{S}_r) \end{aligned} \right\}, (4)$$

где  $m_3$ ,  $m_n$ ,  $m_{np1}$ ,  $m_{np2}$ ,  $m_{гр}$  - массы замыкающей, поддерживающей лебедок, противовесов и поднимаемого груза приведенные соответственно к ободу грузовых барабанов;  $P_3$ ,  $P_n$  - усилие, создаваемое электродвигателями замыкающей и поддерживающей лебедок, приведенное к ободу грузовых барабанов;  $G_1$ ,  $G_2$  - веса противовесов, приведенные к ободу грузовых барабанов замыкающей и поддерживающей лебедок;  $Q$  - вес грейфера с грузом;  $\alpha$ ,  $\beta$  - коэффициенты затухания колебаний в грузовых канатах;  $S_3$ ,  $S_n$ ,  $S_{np1}$ ,  $S_{np2}$ ,  $S_r$  - перемещение приведенных масс замыкающей и поддерживающей лебедок, противовесов и грейфера с грузом соответственно;  $\dot{S}_3$ ,  $\dot{S}_n$ ,  $\dot{S}_{np1}$ ,  $\dot{S}_{np2}$ ,  $\dot{S}_r$  - скорости соответствующих приведенных масс;  $\ddot{S}_3$ ,  $\ddot{S}_n$ ,  $\ddot{S}_{np1}$ ,  $\ddot{S}_{np2}$ ,  $\ddot{S}_r$  - ускорения соответствующих масс,  $c_3$ ,  $c_n$ ,  $c_{3п}$ ,  $c_{nn}$  - жесткости связей приведенных масс.

Рабочий цикл механизма подъема был разделен на несколько этапов (см. рис.4). Параметры расчетной модели механизма подъема перегрузочного крана в общем случае зависят от рассматриваемого этапа грузового цикла механизма подъема перегрузочного крана. Эти зависимости удобно описать с помощью пороговых функций изменяющихся во время работы механизма подъема.

На рис. 4 приняты следующие обозначения:  $G_1$ ,  $G_2$  – приведенные веса противовесов СУ замыкающей и поддерживающей лебедок,  $R$  – радиус грузовых барабанов лебедки механизма подъема,  $K_{ур}^{зам}$ ,  $K_{ур}^{под}$  - значения коэффициентов уравнивания замыкающей и поддерживающей лебедок,  $Q_n$  – номинальный вес поднимаемого груза.

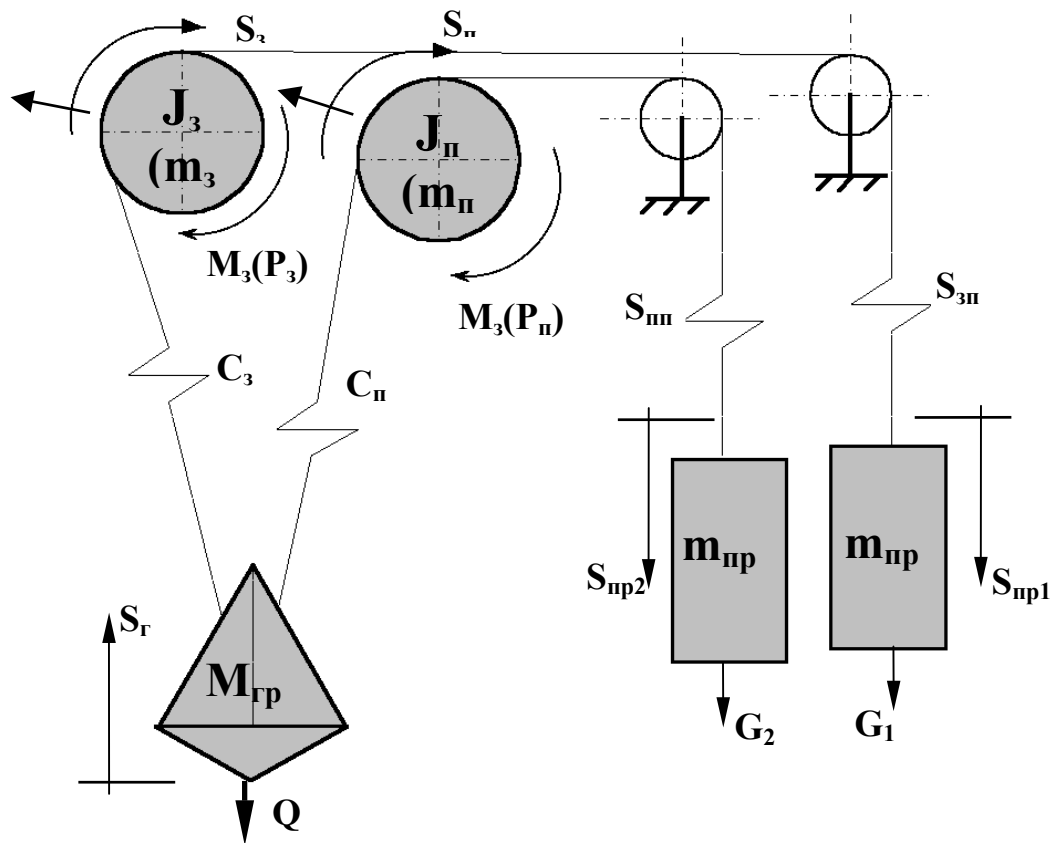


Рис.3 Упрощенная расчетная схема уравновешенного механизма подъема при работе перегрузочного крана с навалочным грузом.

Портальный кран в условиях эксплуатации находится под воздействием случайных кинематических возмущений и внешних нагрузок. Поэтому нагрузки в механизмах ПК рассматриваются как случайные процессы, представляющие реакцию динамической системы на внешние воздействия.

К числу случайных параметров определяющих случайный процесс нагружения грейферного механизма, относятся суммарный вес зачерпнутого груза и грейфера, время подключения поддерживающей лебедки, время начала торможения при подъеме, и т. д. При работе ПК с тарно-штучным грузом в качестве случайных принимаются аналогичные параметры.

В четвертой главе дается описание предлагаемого метода выбора предпочтительной конструкции уравновешенного механизма подъема ПК.

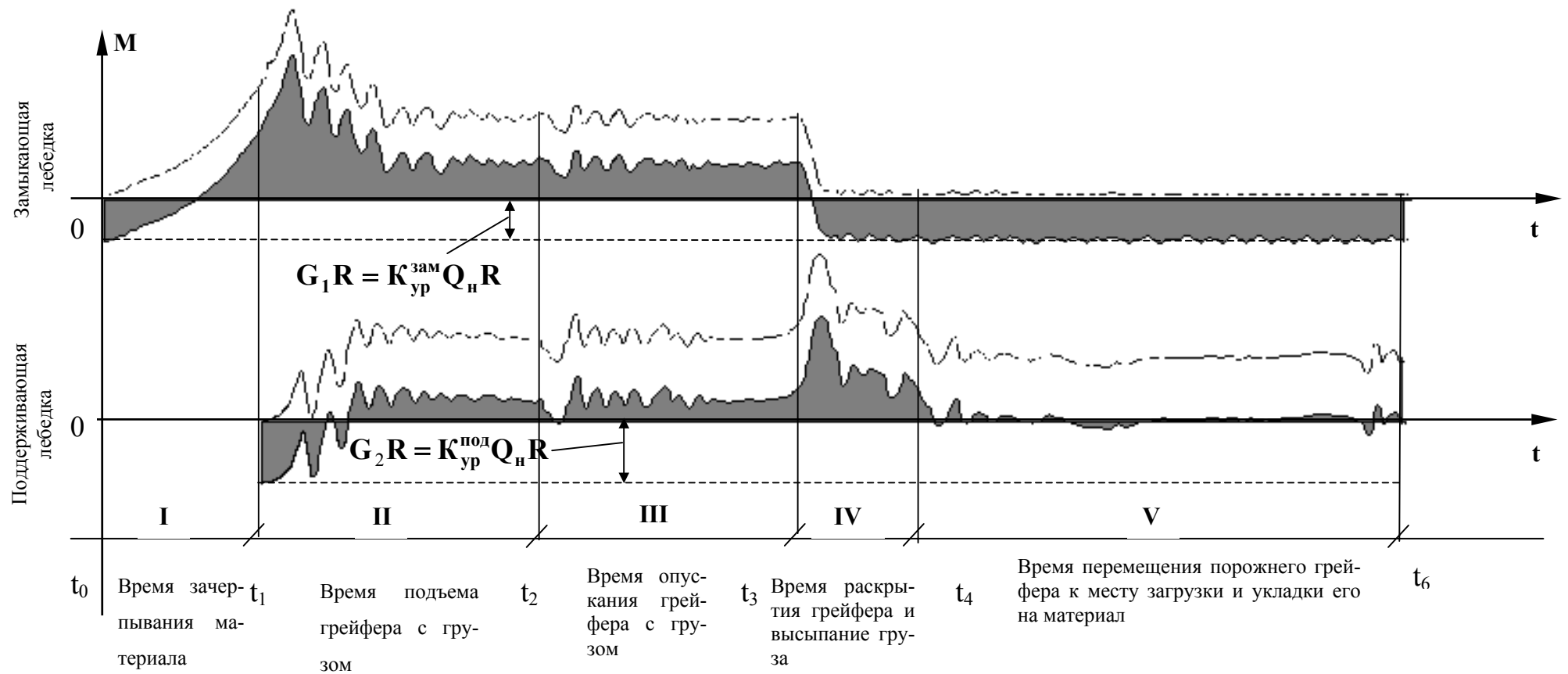


Рис. 4. Графики изменения крутящего момента на ободе грузовых барабанов замыкающей и поддерживающей лебедок за рабочий цикл механизма подъема перегрузочного крана.

■ уравновешенный механизм подъема; □ неуравновешенный механизм подъема

Для этого использованы элементы теорий выбора и множеств, а также принципы имитационного моделирования. В рамках теории выбора были разработаны критерии эффективности (выбора) выраженные через характеристики уравновешенных механизмов подъема и условия эксплуатации ПК:

$$\mathcal{E}_1 = NPV = \sum_k \frac{P_{k_i}}{(1+r)_k} - IC_i, \quad (5)$$

$$\mathcal{E}_2 = PI = \sum_k \frac{P_{k_i}}{(1+r)_k} : IC_i, \quad (6)$$

$$\mathcal{E}_3 = PP = \frac{IC_i}{\sum_k \frac{P_{k_i}}{(1+r)_k}}, \quad (7)$$

где  $\mathcal{E}_1(NPV)$  – чистый приведенный эффект,  $\mathcal{E}_2(PI)$  – индекс рентабельности,  $\mathcal{E}_3(PP)$  - время окупаемости инвестиций,  $P_{k_i}$  - прибыль от внедрения  $i$ -ой системы уравновешивания в механизме подъема ПК, за расчетный период  $k$ ;  $IC_i$  - величина инвестиции в ПК при использовании  $i$ -ой конструкции уравновешивания механизма подъема;  $r_i$  - коэффициент дисконтирования на инвестируемый проект  $i$ .

$$P_i = D(Z_{эл}^0 - Z_{эл_i}^{yp}) = D(N_p^0 \Pi_{осн} \frac{t_3}{365} + (\sum_{m=1}^{m_p} \sum_{n=1}^{n_{pm}} N_{m_n}^0 t_{um_n}) \Pi_{доп}) - (N_p^{yp} \Pi_{осн} \frac{t_3}{365} + (\sum_{m=1}^{m_p} \sum_{n=1}^{n_{pm}} N_{m_n}^{yp} t_{um_n}) \Pi_{доп}) \quad (8)$$

$Z_{эл}^0, Z_{эл_i}^{yp}$  - общие затраты на электричество для базового (без применения системы уравновешивания в МП) и инвестируемых вариантов соответственно;  $D$  – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты по техническому обслуживанию крана  $D < 1$ ;  $N_p^0, N_{p_i}^{yp}$  - максимальная нагрузка в кВт, создаваемая базовым и уравновешенными механизмами подъема ПК соответственно;  $i=1...w$  - номер рассматриваемой конструкции УМППК;  $t_3$  - время эксплуатации ПК за год;  $\Pi_{осн}, \Pi_{доп}$  – основная и дополнительная плата в год за 1 кВт;  $N_{m_n}, N_{m_n}^{yp}$  - мощность, затрачиваемая базовым и уравнове-

шенным механизмами за один рабочий цикл соответственно;  $n_{pm}$  - число рабочих циклов производимых ПК за навигацию по  $m$  – му технологическому варианту;  $m_p$  – расчетное число технологических вариантов работы;  $t_{um_n}$  - длительность рабочего цикла механизма подъема ПК;

В общем случае величина дополнительных инвестиций, требуемая при применения в механизме подъема портального крана системы уравнивания, рассчитывается по формуле:  $IC_i = (C_0 - C_{yp_i})d_i$ , где  $C_0$  - стоимость базового варианта МППК;  $C_{yp_i}$  - стоимость  $i$  –ой инвестируемой конструкции УМППК;  $d_i$  – коэффициент, учитывающий затраты по монтажу  $i$  – го инвестируемого проекта УМППК.

Конечной целью, в данной работе, использования обобщенной модели является определение экономической эффективности использования систем уравнивания Э при заданных условиях эксплуатации ПК. Для достижения этой цели рассматривается суграф А (см. рис. 5) с множеством вершин  $V_A = \{Э, K, X, N\}$ , который может быть представлен в виде соответствия:  $f : d \rightarrow Э$ .

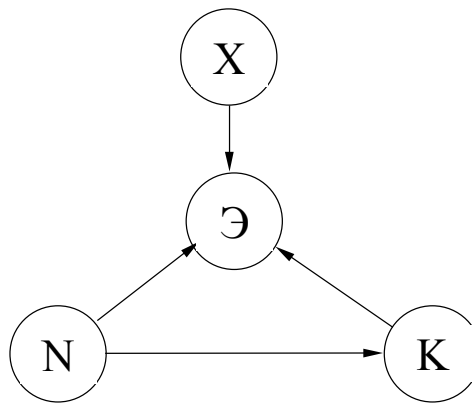


Рис. 5. Суграф А для определения элементов множества Э.

В общем случае  $d$  является прямым произведением, куда входят элементы  $K, X, N$ .

$$d = \{[\delta_{K_1} K_1, \delta_{K_2} K_2] \otimes [\delta_{X_{12}} X_{12}, \delta_{X_{22}} X_{22}] \otimes [\delta_{N_1} N_1, \delta_{N_2} N_2]\}, \quad (9)$$



Если все пороговые функции  $\delta_X, \delta_N$  в множестве (9) равны единице, то элементы множества  $\mathbf{d}$  определяются для рассматриваемой конструкции УМП при известных условиях эксплуатации ПК.

Множество (9) может быть представлено в виде соответствий:

$$\forall \mathbf{d}_{1i} \in D \Rightarrow \exists [\Theta_{e_{1i}} = f_e(\delta K_1, \delta X_1, \delta N_1)], \quad (10)$$

$$\forall \mathbf{d}_{2i} \in D \Rightarrow \exists [\Theta_{e_{2i}} = f_e(\delta K_2, \delta X_2, \delta N_2)], \quad (11)$$

где  $\mathbf{d}_{1i}, \mathbf{d}_{2i}$  – элементы множества при работе с навалочным и тарно-штучным грузом соответственно;  $i=1...w$  – номер рассматриваемой конструкции УМППК;  $e=\{1, 2, 3\}$  – количество критериев эффективности.

В общем случае имеем:

$$\mathbf{d} = \{[\delta_{K_{11}} K_{11}, \delta_{K_{12}} K_{12}, \dots] \otimes [\delta_{K_{21}} K_{21}, \delta_{K_{22}} K_{22}, \dots] \otimes [\delta_{X_{211}} X_{211}, \delta_{X_{212}} X_{212}, \dots] \otimes [\delta_{X_{221}} X_{221}, \delta_{X_{222}} X_{222}, \dots] \otimes [\delta_{N_{111}} N_{111}, \delta_{N_{112}} N_{112}, \dots] \otimes [\delta_{N_{211}} N_{211}, \delta_{N_{212}} N_{212}, \dots]\} \quad (12)$$

При работе ПК только в грейферном режиме выражение (12) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_1 &= \{[K_{11}, K_{12}, \dots] \otimes [X_{121}, X_{122}, \dots] \otimes [N_{111}, N_{112}, \dots]\} = \\ &= \{K_{11}, X_{121}, N_{111}\}, \{K_{11}, X_{121}, N_{112}\}, \dots, \{K_{12}, X_{121}, N_{111}\}, \dots =, \quad (13) \\ &= \{d_{11}, d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1i}\} \end{aligned}$$

При работе ПК только с тарно-штучным грузом выражение (12) записывается в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_2 &= \{[K_{21}, K_{22}, \dots] \otimes [X_{221}, X_{222}, \dots] \otimes [N_{211}, N_{212}, \dots]\} = \\ &= \{K_{21}, X_{221}, N_{211}\}, \{K_{21}, X_{221}, N_{212}\}, \dots, \{K_{22}, X_{221}, N_{111}\}, \dots =, \quad (14) \\ &= \{d_{21}, d_{22}, d_{23}, \dots, d_{2i}\} \end{aligned}$$

Здесь  $K_{11}, \dots$  - конструктивные варианты УМППК;  $X_{221}, \dots$  - количество часов (циклов) работы ПК за расчетный период;  $N_{111}, \dots$  - значения затрачиваемых мощностей УМППК по каждому из рассматриваемых вариантов;  $\delta, \dots, \dots$  - пороговые функции.

Каждому элементу  $\mathbf{d}_{1i}$  и  $\mathbf{d}_{2i}$  соответствует своя вероятность реализации. Каждый элемент  $\mathbf{d}_{1i}$  и  $\mathbf{d}_{2i}$  состоит из других элементов  $K, X, N$ . Элементы  $X$  и

$\mathbf{N}$  имеют свои вероятности реализаций. В соответствии с вышеизложенным полная вероятность реализации каждого элемента  $\mathbf{d}_{1i}$  и  $\mathbf{d}_{2i}$  равна:

$$p_{1i} = p_{12i}p_{13i}, \quad (15)$$

$$p_{2i} = p_{22i}p_{23i}, \quad (16)$$

где  $p_{1i}$ ,  $p_{2i}$  - вероятность реализации элементов  $\mathbf{d}_{1i}$  и  $\mathbf{d}_{2i}$ ;  $p_{12i}$ ,  $p_{22i}$  - вероятности работы порталного крана по данному технологическому варианту работы с данным количеством часов (циклов);  $p_{13i}$ ,  $p_{23i}$  - вероятности того, что при данной конструкции УМППК будет затрачиваться определенное количество мощности при работе по определенному технологическому варианту.

В общем случае, когда ПК может работать в грейферном и крюковым режимах, вероятность  $p_i$  реализации множества  $\mathbf{d}_i$  равна:

$$p_i = p_{1i}p_{2i}, \quad (17)$$

Результатом расчета является значение критериев эффективности применения СУ в МППК  $\mathbf{\Delta}_{1i}$ ,  $\mathbf{\Delta}_{2i}$ ,  $\mathbf{\Delta}_{3i}$  и вероятности их реализаций  $p_{\mathbf{\Delta}_{1i}}$ ,  $p_{\mathbf{\Delta}_{2i}}$ ,  $p_{\mathbf{\Delta}_{3i}}$ . По этим данным, лицо принимающее решение, выбирает предпочтительные конструкции УМППК и их основные параметры. В качестве примера на рис. 6 приведены результаты расчета критерия эффективности девяти вариантов конструкции УМП при различных условиях эксплуатации ПК.

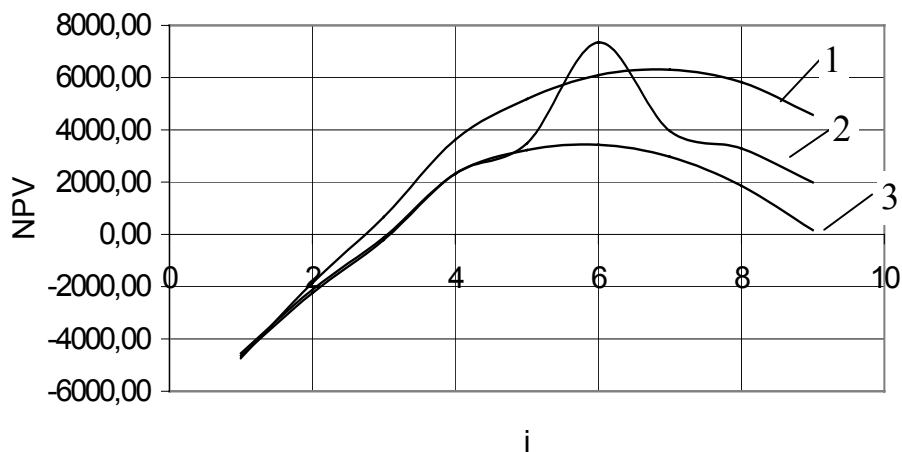


Рис. 6 Зависимость чистого приведенного эффекта (NPV) от варианта рассматриваемой конструкции УМП при эксплуатации ПК в режимах: 1, – при работе ПК в грейферном режиме ( $Q_H=10\text{т}$ ); 2 – при работе ПК с тарно-штучным грузом ( $Q_H=16\text{т}$ ); 3 – при работе ПК с навалочным и тарно-штучным грузом.

Обобщая все вышеизложенное, предлагается метод оценки и выбора предпочтительной конструкции уравновешенного механизма подъема портального крана и ее основных параметров. Данная методика представлена в виде совокупности некоторых правил, определяющих последовательность, которую необходимо выполнить для решения поставленных задач. На рис.7. представлена структурная схема алгоритма выбора конструкции уравновешенного механизма подъема ПК и его основных параметров.



Рис.7. Структурная схема алгоритма выбора конструкции УМППК и ее основных параметров.

## **Основные результаты и выводы по работе**

В диссертационной работе решена научная задача, имеющая важное народно-хозяйственное значение и заключающаяся в разработке метода выбора предпочтительных конструкций уравновешенных механизмов подъема порталных кранов и их основных параметров. Для этого сформирована обобщенная модель уравновешенных механизмов подъема, в рамках которой учитываются связи параметров механизма со случайными условиями эксплуатации перегрузочного порталного крана.

При решении поставленной задачи:

1. Рассмотрены основные системы энергосбережения, применяемые в механизмах грузоподъемных машин. Установлено, что наиболее перспективной с точки зрения повышения экономической эффективности механизмов подъема порталных кранов за счет снижения затрат на электроэнергию являются системы с весовыми накопителями энергии (системы уравновешивания).

2. Разработана система экономических критериев, для обоснования и выбора предпочтительных конструкций УМППК и их основных параметров. Экономические критерии связаны с характеристиками уравновешенных механизмов подъема и условиями эксплуатации ПК.

3. Сформированы требования, предъявляемые к порталным кранам при применении систем уравновешивания в механизмах подъема. К их числу относятся наличие поворотной колонны и кинематической связи механизма подъема с уравновешивающим противовесом, а также возможность применения в грейферном механизме подъема отдельного уравновешивания замыкающей и поддерживающей лебедок. Целесообразно обеспечить движения противовесов по всей длине колонны с направляющими.

4. Разработана имитационная модель УМП в виде системы дифференциальных уравнений со случайными начальными условиями и границами перемещений элементов УМП. Эта модель позволяет определять исходные данные для расчета критериев эффективности (выбора).

5. Исследовано влияние систем уравнивания на экономическую эффективность механизмов подъема ПК. Установлено, что существует параболическая связь между затрачиваемой мощностью УМППК и коэффициентом уравнивания  $K_{ур}$  системы уравнивания механизмов.

Значения коэффициентов уравнивания, при которых экономически целесообразно применять весовые СУ механизмов подъема ПК, находятся в пределах  $K_{ур}=0.2-0.6$

В замыкающей и поддерживающей лебедках грейферного механизма подъема рекомендуется  $K_{ур}=0.2-0.35$  и  $K_{ур}=0.3-0.45$  соответственно. При перегрузки ПК тарно-штучных грузов рекомендуемое значение  $K_{ур}$  лежат в пределах от 0.45 до 0.6. При этом экономия затрат электроэнергии в замыкающей лебедке составляет 30-40%, и значительно больше в поддерживающей. При работе ПК в крюковом режиме экономия энергии достигает 20-40%.

6. Исследовано влияние характеристик технологических вариантов работы ПК на эффективность применения СУ в МППК. В случаях, когда известны условия эксплуатации ПК, возможно значительное (до 40-60%) снижение затрат на электроэнергию. Проведенные исследования показали, что наилучшие показатели критериев эффективности имеют грейферные механизмы подъема порталного крана с отдельным уравниванием замыкающей и поддерживающей лебедок.

7. Проверена адекватность обобщенной модели УМППК. Для этого было произведено сравнение фактических затрат мощности (определяемых при эксплуатации порталных кранов) с расчетными значениями, которые были определены с использованием обобщенной модели УМППК. Сравнение результатов расчета показали их хорошую сходимость.

8. Разработан алгоритм и пакет программ для сравнения и выбора конструкций УМППК из числа альтернативных вариантов. Разработанный метод принят к использованию в конструкторском бюро порталных кранов АОТ "ПОДЪЕМТРАНСМАШ".

**Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

1. Бардин А.К. Критерии выбора основных параметров системы уравновешивания механизма подъема кранов. Сб. научных трудов, посвященный 190 –летию транспортного образования., 0, Часть 1., С-Пб., СПГУВК, 1999 г. 19-23 с.

2. Бардин А.К. Математическая модель уравновешенного грейферного механизма подъема. Сб. научных трудов “Судостроение и судоремонт” С-Пб, СПГУВК, 1999, 109-111 с.

3. Бардин А.К. Снижение нагруженности и повышение надежности кранов и перегружателей путем уравновешивания механизма подъема. Тезисы докладов на Международной научно-технической конференции “Транском-97” "Управление и информационные технологии на транспорте" С-Пб, СПГУВК, 1997, 54-55 с.

4. Бардин А.К. Методика выбора параметров уравновешенных механизмов подъема кранов. Тезисы докладов научно-методической конференции-98, С-Пб, СПГУВК 1998, 173 с.

5. Бардин А.К. Применение энергосберегающих технологий в механизмах подъема кранов. Тезисы докладов научно-методической конференции, посвященной 190 –летию транспортного образования. Часть 1., С-Пб., СПГУВК, 1999 г. 97 с.