

УДК 621.86

К.А. Гончаров, Н.В. Сидоров

МЕТОДИКА ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СОВМЕСТНОГО ПОДЪЕМА ГРУЗА ДВУМЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫМИ КРАНАМИ¹

Представлены методика и математические модели, предназначенные для моделирования динамики совместного подъема груза двумя кранами. Выполнены расчеты типовых грузоподъемных машин при совместном подъеме груза для различных ситуаций: подъема груза однотипными и разнотипными кранами, подъема с корректировкой и без корректировки положения груза крановщиками.

Ключевые слова: мостовой кран, кран-манипулятор, динамический анализ, совместный подъем груза.

Необходимость спаренной работы двух кранов возникает в случае перегрузки штучного груза большей массы, чем грузоподъемность отдельного крана [1]. До настоящего времени подъем грузов двумя мостовыми кранами не включен в перечень обязательных расчетов при их проектировании. Вся ответственность за выполнение операций двумя кранами перекладывается на эксплуатационный персонал (в первую очередь на ответственных за безопасное проведение работ). Это объясняется тем, что ранее такие операции выполнялись крайне редко. Однако в условиях рыночной экономики подъем грузов двумя кранами встречается все чаще. Малые предприятия не обладают необходимым парком грузоподъемных машин, используют приспособленные помещения бывших крупных предприятий, не имеют средств на техническое перевооружение.

В статье предложены математические модели для исследования динамики совместного подъема груза двумя грузоподъемными кранами (применительно к мостовым кранам и кранам-манипуляторам).

Для исследования динамики подъема груза двумя мостовыми кранами разработана математическая модель (рис. 1), которая является дальнейшим развитием ранее предложенных моделей [2-4].

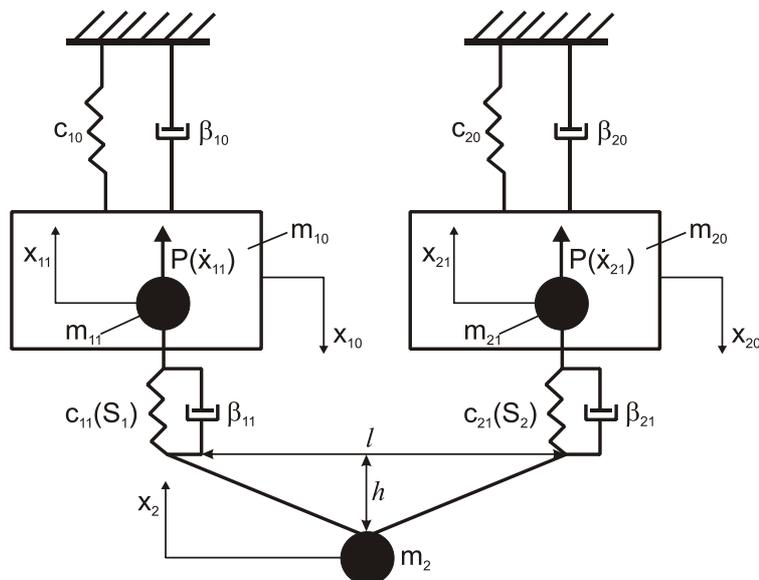


Рис. 1. Математическая модель подъема груза двумя мостовыми кранами

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых - кандидатов наук № МК-92.2014.8.

Запишем общие уравнения движения данной системы:

$$\begin{cases} m_{10}\ddot{x}_{10} + c_{11}(S_1)(x_{10} + x_2 - x_{11}) + \beta_{11}(\dot{x}_{10} + \dot{x}_2 - \dot{x}_{11}) + c_{10}x_{10} + \beta_{10}\dot{x}_{10} = 0, \\ m_{20}\ddot{x}_{20} + c_{21}(S_2)(x_{20} + x_2 - x_{21}) + \beta_{21}(\dot{x}_{20} + \dot{x}_2 - \dot{x}_{21}) + c_{20}x_{20} + \beta_{20}\dot{x}_{20} = 0, \\ m_{11}\ddot{x}_{11} - c_{11}(S_1)(x_{10} + x_2 - x_{11}) - \beta_{11}(\dot{x}_{10} + \dot{x}_2 - \dot{x}_{11}) - P(\dot{x}_{11}) = 0, \\ m_{21}\ddot{x}_{21} - c_{21}(S_2)(x_{20} + x_2 - x_{21}) - \beta_{21}(\dot{x}_{20} + \dot{x}_2 - \dot{x}_{21}) - P(\dot{x}_{21}) = 0, \\ m_2\ddot{x}_2 + [c_{11}(S_1)(x_{10} + x_2 - x_{11}) + \beta_{11}(\dot{x}_{10} + \dot{x}_2 - \dot{x}_{11})]\sin(\alpha_1) + \\ + [c_{21}(S_2)(x_{20} + x_2 - x_{21}) + \beta_{21}(\dot{x}_{20} + \dot{x}_2 - \dot{x}_{21})]\sin(\alpha_2) + m_2g = 0, \end{cases}$$

где $c_{11}(S_1)$ и $c_{21}(S_2)$ – жесткости подъемных канатов первого и второго кранов соответственно, зависящие от натяжений канатов S_1 и S_2 ; β_{10} и β_{20} – коэффициенты демпфирования мостов кранов; β_{11} и β_{21} – коэффициенты демпфирования подвесок груза; $P(\dot{x}_{11})$ и $P(\dot{x}_{21})$ – приведенные движущие усилия электропривода; $x_{10}, x_{11}, x_{20}, x_{21}, x_2$ – перемещения приведенных масс мостов m_{10}, m_{11} , приведенных масс приводов m_{20}, m_{21} и массы груза m_2 соответственно.

Результаты динамического расчета подъема груза массой 20 т двумя мостовыми кранами с одинаковыми характеристиками показаны на рис. 2. При этом механизмы подъема кранов работают в одном режиме, электродвигатели запускаются одновременно. Характеристики кранов: пролет – 22,5 м, грузоподъемность – 10 т, $m_{10}=m_{11}=33,9$ т, $m_{20}=m_{21}=4,4$ т, $c_{10}=c_{20}=14,5$ МН/м, $c_{11}=c_{21}=33,8$ МН при отвесе каната 1 м; тип каната – 14-Г-В-Н-Р-Т-1770(180) ГОСТ 7667-80; характеристики электродвигателей взяты из [3].

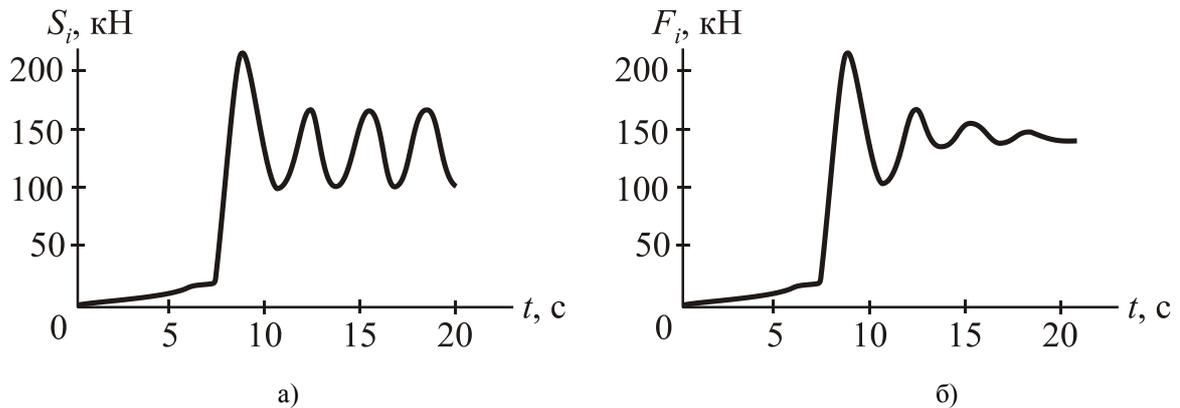


Рис. 2. Силовые характеристики нагруженности при одновременном подъеме груза:
а – силы натяжения канатов; б – усилия в мостах кранов

На представленных графиках видна доотрывная стадия, при которой груз ещё не перемещается, а подъёмный канат постепенно натягивается. После этого происходит отрыв груза от основания. Усилия в канатах и мостах достигают максимальных значений, и начинается многочастотный динамический процесс. Через 10-20 с амплитуды колебаний постепенно уменьшаются и стабилизируются на номинальных значениях.

При подъеме груза двумя мостовыми кранами с одинаковыми характеристиками динамические процессы абсолютно идентичны. Однако такая ситуация нереализуема на практике. Во-первых, даже два крана одной модели будут иметь различные характеристики ввиду их вероятностной природы (например, различны жесткости мостов из-за индивидуальных отклонений при изготовлении и разных величин усталостных повреждений и остаточных деформаций). Во-вторых, операторы мостовых кранов не могут абсолютно синхронно управлять электроприводами механизмов подъема.

В связи с этим исследовалась нагруженность двух неидентичных кранов. При этом характеристики первого крана аналогичны предыдущему расчетному случаю. Приведенное тяговое усилие второго крана на 5% ниже, жесткость металлоконструкции – на 5% выше. Моменты запуска двигателей кранов смещены на 1 с.

Результаты динамического расчета подъема груза двумя мостовыми кранами с различными характеристиками без учета влияния стилей управления операторов (без корректировки) показаны на рис. 3.

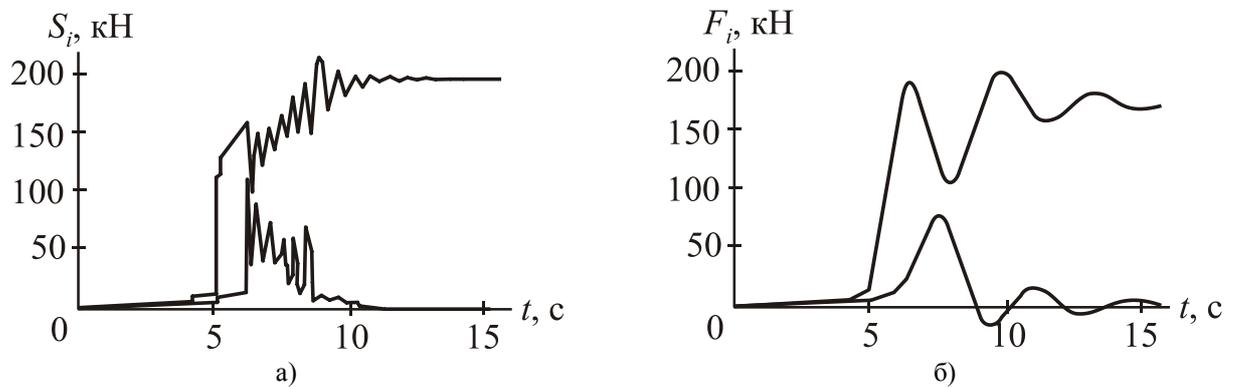


Рис. 3. Силовые характеристики нагруженности при подъеме без корректировки:
а – силы натяжения канатов; б – усилия в мостах кранов

Результаты динамического расчета подъема груза двумя мостовыми кранами без корректировки, но с торможениями в начале послеотрывной стадии (с целью уменьшения колебаний на низкой частоте) показаны на рис. 4.

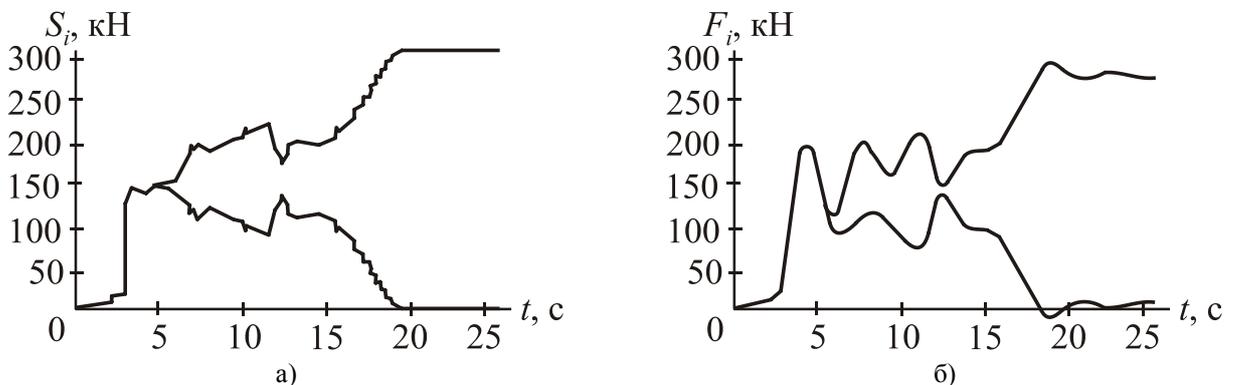


Рис. 4. Силовые характеристики нагруженности при подъеме с торможениями:
а – силы натяжения канатов; б – усилия в мостах кранов

Остановки механизмов подъема в начале послеотрывной стадии (в данном случае двигатель первого крана останавливался дважды, а второго – трижды) предотвращают раскачивание груза.

Из рис. 3 и 4 видно, что подъем без корректировки вызывает перегрузку одного из кранов, связанную с перераспределением нагрузки из-за большей высоты подъема его грузозахватного органа. Одним из способов решения проблемы асинхронного управления кранами и несогласованной работы приводов является введение систем управления кранами наподобие системы многих единиц, применяемой на железнодорожных локомотивах [1]. Однако внесение изменений в электросхему выпущенных 15-20 лет назад кранов, как правило, невозможно. В связи с этим следует рассмотреть влияние стилей управления операторов кранов на динамическую нагруженность при совместном подъеме груза.

Для устранения перегрузки машинисты кранов должны предупреждать появление разницы в положении грузозахватных органов (выполнять корректировку). При забегании одного из механизмов подъема вперед необходимо остановить его до тех пор, пока положение грузозахватных органов кранов не выровняется. Результаты динамического расчета подъема груза с корректировкой показаны на рис. 5. Видно, что подъем с корректировкой позволяет избежать перегрузки одного из кранов, но вызывает опасное раскачивание груза в горизонтальной плоскости. Для исследуемых кранов амплитуда горизонтальных маятниковых колебаний груза составляет 280-320 мм.

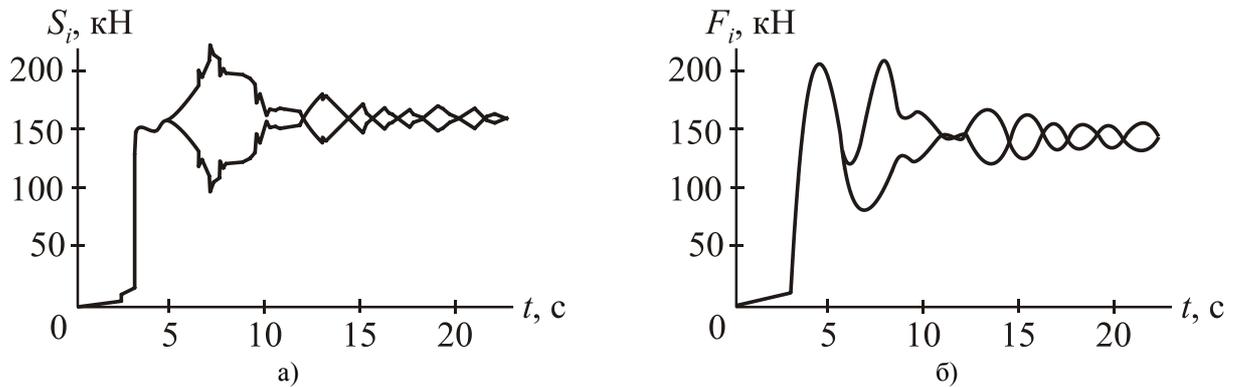


Рис. 5. Силовые характеристики нагруженности при подъеме с корректировкой:
а – силы натяжения канатов; б – усилия в мостах кранов

Рассмотренный подход может использоваться и для исследования динамики совместного подъема груза другими грузоподъемными машинами. В настоящий момент на основе [5; 6] разрабатываются модели для исследования динамической нагруженности при подъеме груза двумя кранами-манипуляторами.

Расчетная схема показана на рис. 6. Считается, что при подъеме груза операторы выполняют корректировку, стараясь сохранить его горизонтальное положение.

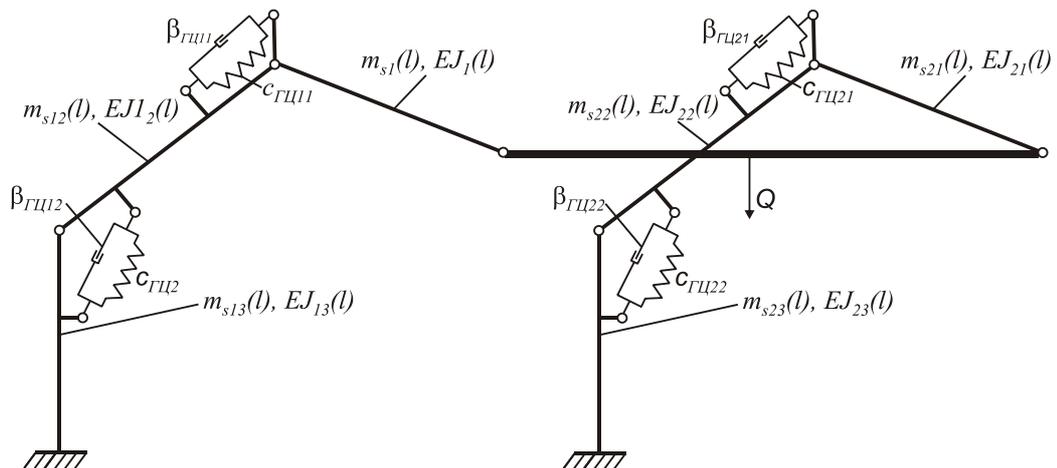


Рис. 6. Расчетная схема подъема длинномерного груза двумя кранами-манипуляторами

На рис. 7 показаны результаты моделирования динамики подъема груза массой 1,5 т двумя трехзвенными гидравлическими кранами-манипуляторами машины АСТ-4-А. Динамические характеристики кранов приведены в [7; 8]. Масса груза – 1,2 т. Начало движения рукоятей смещено на 1 с.

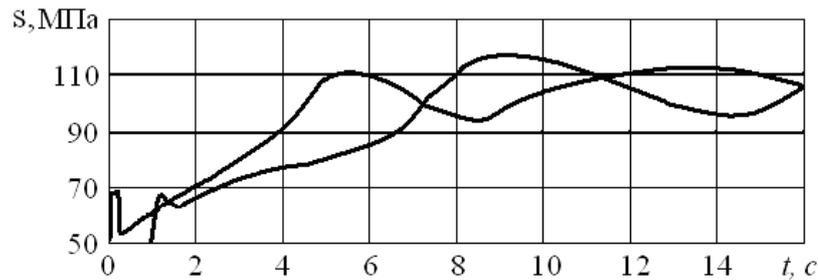


Рис. 7. Напряжения в корневом сечении рукояти

Основные выводы по результатам научных исследований:

1. Предложены методика моделирования и многомассовая динамическая модель подъема груза двумя мостовыми кранами, учитывающие стадийность подъема, переменность жесткости каната, режимы двигателей, перекос груза, влияние стилей управления крановщиков на нагруженность.

2. При подъеме операторы совместно работающих кранов должны выполнять корректировку положения груза последовательным включением и выключением приводов механизмов подъема. В противном случае весовая нагрузка будет распределяться неравномерно, что может привести к возникновению аварийной ситуации. Однако корректировка вызывает раскачивание груза, поэтому груз должен придерживаться обслуживающим персоналом с помощью канатов или лямок.

3. Разработанная компьютерная программа может использоваться при подготовке технологических карт подъема грузов на предприятиях [9]. Результаты исследования планируются к внедрению в ООО «Промбезопасность» (г. Брянск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин, Н.П. Обеспечение безопасности работ при перемещении тяжеловесных грузов двумя спаренными кранами / Н.П. Гаранин, А.В. Раскатов, А.М. Терехов // Подъемно-транспортное дело. – 2012. – №5-6. – С.13-15.
2. Лагерев, И.А. Влияние подкрановой конструкции на динамическую нагруженность мостового крана / И.А. Лагерев // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2011. – №5. – Ч. 3. – С. 3-10.
3. Лобов, Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
4. Лобов, Н.А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути / Н.А. Лобов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 232 с.
5. Лагерев, А.В. Универсальная методика динамического анализа гидравлических кранов-манипуляторов / А.В. Лагерев, А.А. Мильто, И.А. Лагерев // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2013. – №3. – С. 24-31.
6. Лагерев, А.В. Универсальная методика определения напряжений в стержневых элементах конструкций гидравлических кранов-манипуляторов в задачах динамики / А.В. Лагерев, А.А. Мильто, И.А. Лагерев // Вестн. БГУ. – 2013. – №4. – С. 21-26.
7. Лагерев, А.В. Оптимизация конструкции крана-манипулятора машины для сварки магистральных трубопроводов при модернизации / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Подъемно-транспортное дело. – 2013. – №3. – С. 7-10.
8. Лагерев, А.В. Модернизация крана-манипулятора самоходной энергетической машины АСТ-4-А / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев, В.В. Говоров // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2010. – №4. – С. 59-66.
9. Методические рекомендации о порядке разработки проектов производства работ грузоподъемными машинами и технологических карт погрузочно-разгрузочных работ: РД 11-06-2007.

Материал поступил в редколлегию 20.01.14.