

устройство; ИУ1 и ИУ2 – исполнительные устройства; РО – регулирующий орган объекта; О – объект (сварочная головка), БП – блок питания.

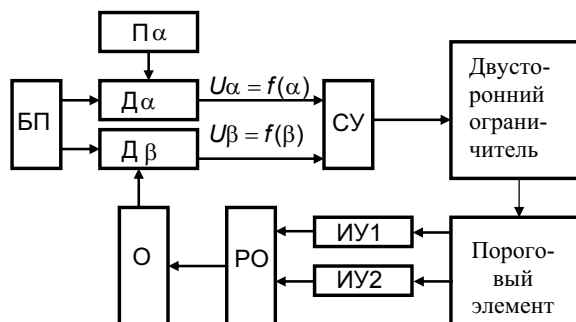


Рис. 3. Функциональная схема системы геометрической адаптации

Схема реализует релейный принцип управления. С функционального датчика пространственного положения $D\alpha$ снимается напряжение [2], зависящее от пространственного положения сварочной ванны. На схеме (рис. 3) величина напряжения $U\alpha$ представлена зависимостью $U\alpha=f(\alpha)$, отображающей требуемое значение угла наклона свароч-

ной головки. Фактическое значение угла наклона сварочной головки контролируется датчиком $D\beta$ в виде напряжения $U\beta$. Разница между этими напряжениями является величиной, задающей управляющее воздействие на объект. Рабочий орган представляет собой двигатель, с помощью которого изменяется угол наклона сварочной головки. Изменение угла наклона сварочной головки происходит в обоих направлениях. Реверсирование, в соответствии со схемой (рис. 3), осуществляется исполнительными устройствами ИУ1 и ИУ2.

4. Заключение

Представленный вариант системы геометрической адаптации, осуществляющий управление углом наклона сварочной головки в соответствии с требуемым законом на базе функционального датчика пространственного положения сварочной ванны, реализован в действующем макете специализированного робота и обеспечивает геометрическую адаптацию сварочной головки в соответствии с требуемым законом при любом диаметре трубы и скорости сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2167753 РФ. МПК⁷ G01C 9/12. Автомат для дуговой сварки неповоротных стыков трубопроводов / А.Ф. Князьков, С.А. Князьков, Д.В. Пилипенко. Бюл. № 15, опубл. 27.05.2001 г.
2. Пат. 2241207 РФ. МПК⁷ G01C 9/12. Функциональный датчик пространственного положения сварочной ванны / А.Ф. Князь-

ков, С.А. Князьков, С.В. Неклюдов, Ю.Н. Дементьев. Бюл. № 33 от 27.11.2004 г.

Поступила 10.03.2008 г.

УДК 621.313.333

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ МОСТОВОГО КРАНА НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЁМА

Ю.А. Орлов, Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов, Д.П. Столяров

Томский политехнический университет
E-mail: odivan@yandex.ru

На основе исследований с использованием математической модели механизма подъёма груза электрического крана, адекватность которой подтверждена экспериментами на натурном образце мостового крана, показана целесообразность мониторинга электрических параметров приводного двигателя для обеспечения функций защиты от опасных эксплуатационных воздействий. Рассмотрен косвенный метод измерения веса поднимаемого груза на основе мониторинга электрических параметров электропривода механизма подъёма, что обеспечивает живучесть системы защиты грузоподъемного крана и повышает безопасность эксплуатации.

По данным Ростехнадзора с 1998 г. наблюдается устойчивый рост травматизма и количества аварий на грузоподъемных кранах. Из информационного письма от 21.04.2003 г. головной организации по краностроению НТЦ «Строймашавтоматизация» следует, что около четверти аварий и несчастных случаев происходит по причинам, связанным с приборами и системами безопасности, поэтому вопросам их раз-

работки и применения придаётся большое значение. Особенно перспективным для совершенствования приборов и систем безопасности является расширение их функций с объединением в составе единой системы, на основе применения бортовых компьютерных средств, для управления, оперативного контроля и диагностирования с задачей автоматического обеспечения безопасности работы машин [1, 2].

В связи с этим, исследования влияния эксплуатационных воздействий на характеристики механизмов и металлоконструкции кранов мостового типа с целью выявления наиболее информативных параметров и разработки новых методов их измерения, обработки и анализа, направленные на создание комплексной системы управления и безопасности повышенной надёжности, является актуальной задачей [3, 4].

По ГОСТ 27.002-89 важнейшими понятиями объектов потенциальной опасности являются «безопасность» и «живучесть». Безопасность и живучесть грузоподъемных кранов мостового типа определяются уровнем их оснащённости приборами и устройствами безопасности, важнейшими из которых являются ограничители грузоподъёмности [5].

Обзор методов ограничения грузоподъёмности кранов мостового типа, выполненных на основе асинхронного электропривода, представлен на рис. 1.

При рассмотрении особенностей ограничителей грузоподъёмности серии ПС-80, ОГМК «МОСТ-1», «ВОЛНА» ОГМК 1-1 и ОНК140 для электрических кранов отмечено, что наиболее слабым звеном являются датчики усилий, принцип действия которых основан на непосредственном измерении механических напряжений, возникающих от действия поднимаемого груза (прямые методы). Эта особенность определяет условия их работы – восприятие механических и атмосферных воздействий, что зачастую является причиной выхода их из строя. Оснащение таким ограничителем зачастую требует внесения изменений в металлоконструкцию крана, что повышает стоимость обслуживания крана в целом.

На рис. 2 представлены блок-схемы датчиков измерения усилий традиционного типа, широко применяемые в промышленности.

Потенциометрический датчик усилия рис. 2, а, прост по конструкции, но наличие механических узлов перемещения и низкая стойкость к агрессивным средам и климатическим воздействиям существенно сокращает ресурс его работы. Тензометрический датчик усилия рис. 2, б, получил наиболее широкое распространение для измерения статических и медленно протекающих измеряемых процессов, однако он так же подвержен климатическим воздействиям и подвергается ускоренному износу при динамических, ударных воздействиях.

Дифференциально-трансформаторный датчик усилия рис. 2, в, кроме повышенной сложности конструкции лишен перечисленных выше недостатков, однако все датчики усилия традиционного типа имеют 4–5 ступенчатую схему преобразования воспринимаемой физической величины – в напряжение выходного сигнала. Это в свою очередь предопределяет ограниченный ресурс и надёжность как механических, так и электронных блоков датчиков традиционного типа.

Основной причиной выхода из строя датчиков усилий является динамический характер воспринимаемых ими нагрузок возникающих при эксплуатации крана. Особенно велики амплитуды динамических усилий при установке датчика в канатную систему. Для повышения надёжности рекомендуется снижение допустимых значений деформаций тензорезисторов на порядок [6], что не всегда обеспечивается на практике.

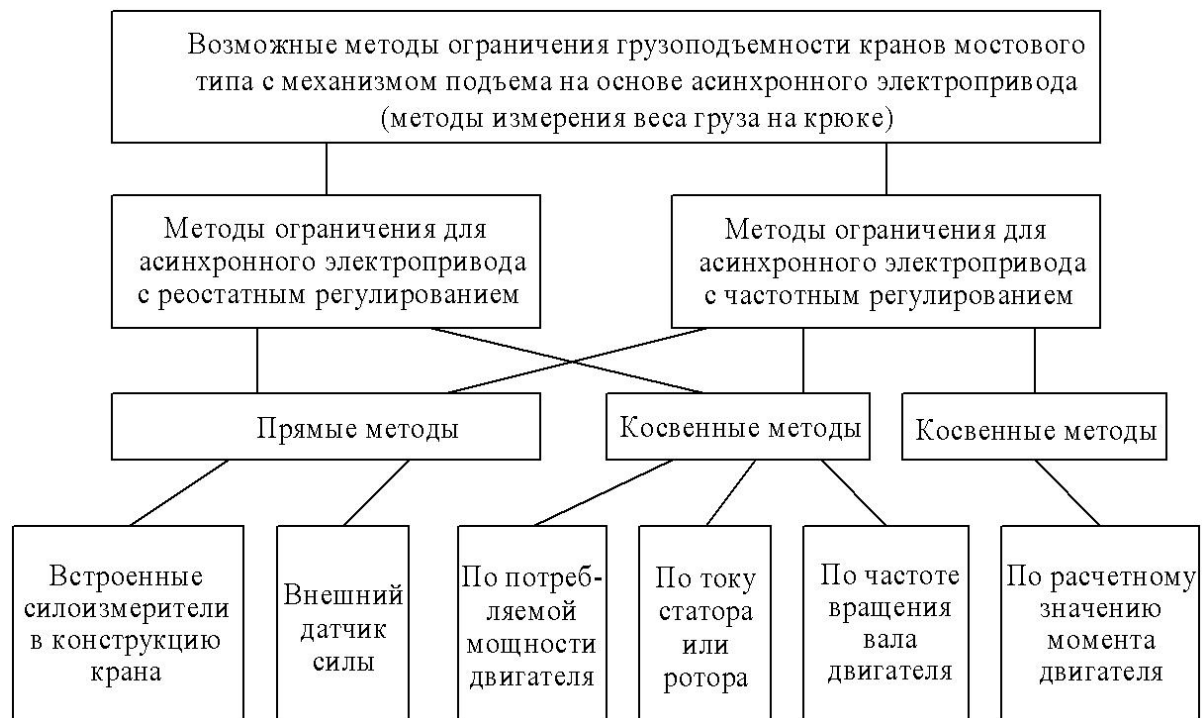


Рис. 1. Методы ограничения грузоподъёмности электрических кранов



Рис. 2. Датчики измерения усилия традиционного типа: а) потенциметрический; б) тензометрический; в) дифференциально-трансформаторный. Обозначения: G – вес груза; Δl – деформация; Δ – механическое перемещение; ΔR – изменение активного сопротивления; ΔU – изменение напряжения; ΔM – изменение взаимной индуктивности обмоток трансформатора; $U_{\text{вых}}$ – напряжение выходного сигнала датчика

Применение традиционного метода повышения надежности системы измерения величины нагрузки с использованием датчиков усилий за счет резервирования измерительных каналов экономически нецелесообразно, так как увеличение количества датчиков не ведет к существенному уменьшению вероятности отказов.

Живучесть информационной системы можно обеспечить путем применения нескольких простейших и не подверженных динамическим возмущающим воздействиям датчиков различных физических величин, характеризующих нагрузку.

На рис. 3 представлена блок-схема измерительной системы для определения веса груза на основе косвенного метода измерения электрических величин приводного двигателя механизма подъема.

Известно, что величина нагрузки на приводной двигатель влияет на частоту вращения n , активную мощность P , скольжение s , статический момент $M_{\text{ст}}$, токи ротора I_2 и статора I_1 . Указанные величины, зависящие от нагрузки, несут информацию о ее величине, и далее в статье называются информативными параметрами. В грузоподъемном кране нагрузка на приводной двигатель определяется массой поднимаемого груза, которая может быть определена по заранее снятым зависимостям и за-

помненным информативным параметрам двигателя от веса груза на крюке, что позволяет не применять датчики усилий традиционного типа.

В настоящее время для используемого в промышленности асинхронного электропривода перспективным направлением является разработка ограничителей грузоподъемности с использованием современных программируемых микроконтроллеров (МК) и косвенных методов измерения массы поднимаемого груза на основе информативных параметров асинхронного двигателя (АД) [7]. При этом в процессе мониторинга параметров приводного двигателя могут быть комплексно решены вопросы диагностики и защиты приводного двигателя, а также ограничения грузоподъемности, т. е. задачи обеспечения «безопасности» и «живучести» объекта потенциальной опасности – электрического крана.

Принцип измерения веса груза G , как силы, действующей на канатную систему от массы груза, состоит в определении его по заранее снятой зависимости одного или нескольких информативных параметров от веса поднимаемого груза $G \sim M_{\text{ст}} = f(i)$, где $f(i)$ – функциональная зависимость для i -го информативного параметра косвенного метода измерения, рис. 4.

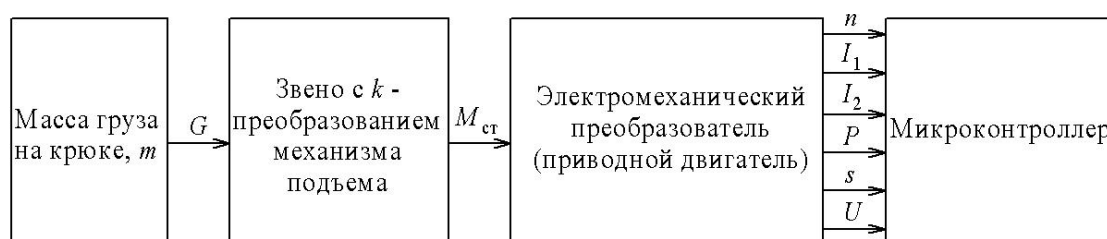


Рис. 3. Блок-схема измерительной системы на основе косвенного метода измерения веса груза

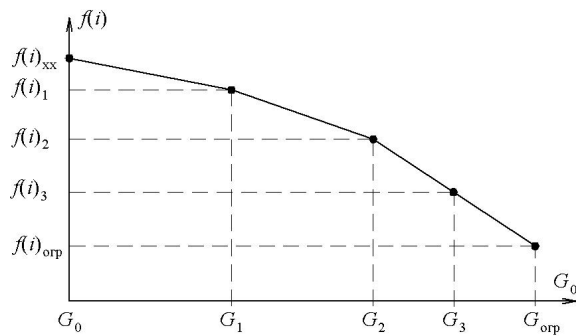


Рис. 4. Градуировочная характеристика $f(i)=F(G)$ в виде кусочно-линейной аппроксимированной функции

Процесс кратковременного ввода информативных параметров в память МК назовем процессом «Обучение» МК ограничителя грузоподъемности и этот процесс доступен только в режиме санкционированного доступа в память МК. И соответственно длительный рабочий процесс функционирования МК по использованию введенных информативных параметров назовем процессом «измерение» МК веса груза на крюке.

Рассмотрим «Обучение» МК ограничителя грузоподъемности. Для измерения величины поднимаемого груза G по одному из информативных параметров необходимо:

1. Снять градуировочную характеристику принятого информативного параметра i от веса груза G на крюке для конкретного механизма подъема и представить ее в виде кусочно-линейной аппроксимированной функции, рис. 4.
2. Ввести полученную градуировочную характеристику в память МК, осуществляющего преобразование воспринимаемого информативного параметра i в величину G , выход которого связан с устройством индикации.

В процессе «Измерение» МК веса груза на крюке осуществляется преобразование воспринимаемого информативного параметра $f(i)$ в величину G по градуировочной характеристике запомненной в памяти МК в процессе «Обучение», процесс «Измерение» также отображается в устройстве индикации.

Таким образом, измерение поднимаемого груза G осуществляется по анализу $f(i)$ информативного параметра АД, а ограничение грузоподъемности — путем отключения приводного двигателя механизма подъема (через исполнительное реле на выходе МК) при $G_{огр} = (1,15...1,25) \cdot G_{max}$, где G_{max} — максимальная грузоподъемность крана. Принятие решения по ограничению может быть произведено при превышении предельного значения одного или нескольких параметров в зависимости от принятого алгоритма работы МК.

Если $f(i)$ находится в пределах: $f(i)_{xx} \leq f(i) \leq f(i)_{огр}$, то соответственно: $G_0 \leq G \leq G_{огр}$ (индекс «0» соответствует $G=0$). При измерении информативного параметра $f(i)$ его значение попадает на один из рабочих участков линейных зависимостей со своим коэффициентом наклона:

$$\begin{cases} f(i)_{xx} \geq f(i)_j \geq f(i)_1, G_j = G_0 + (G_1 - G_0) \frac{f(i)_{xx} - f(i)_j}{f(i)_{xx} - f(i)_1}; \\ f(i)_1 > f(i)_j \geq f(i)_2, G_j = G_1 + (G_2 - G_1) \frac{f(i)_1 - f(i)_j}{f(i)_1 - f(i)_2}; \\ f(i)_2 > f(i)_j, G_j = G_2 + (G_3 - G_2) \frac{f(i)_2 - f(i)_j}{f(i)_2 - f(i)_3}. \end{cases}$$

По данным выражениям однозначно может быть рассчитан вес поднимаемого груза $G_j=f(i)_j$ при условии $U_\phi=\text{const}=220$ В; $f_c=\text{const}=50$ Гц).

Реальная питающая сеть может иметь отклонения, как по напряжению, так и по частоте: $U_\phi=220$ В $\pm 10\%$; $f_c=50$ Гц $\pm 1\%$ [8], что неизбежно приведет к ошибке определения $G \sim M_{ст}=f(i)$, т. к. известно, что $M_{ст} \sim U_\phi^2 / f_c$, тогда:

$$M_{ст}=\max \text{ при } U_\phi=220 \text{ В}+10\%; f_c=50 \text{ Гц}-1\%.$$

$$M_{ст}=\min \text{ при } U_\phi=220 \text{ В}-15\%; f_c=50 \text{ Гц}+1\%.$$

Максимальная ошибка в определении $G=f(i)$ может достигнуть 50 %. Для учета и компенсации этой ошибки представим функцию $G=f(i)$ в виде:

$$G=f(i) \cdot ku \cdot kf,$$

где ku — коэффициент, учитывающий изменение напряжения питающей сети U_ϕ ; kf — коэффициент, учитывающий изменение частоты питающей сети f_c .

В момент измерения параметров: $f(i)_{xx}, f(i)_1, f(i)_2, f(i)_3, G_1, G_2, G_3$ в общем случае: $U_\phi \neq 220$ В, $f_c \neq 50$ Гц; следовательно при работе программы необходимо пересчитать измеренные значения $G_1=f(i)_1$; $G_2=f(i)_2$; $G_3=f(i)_3$; для случая: $U_\phi=220$ В, $f_c=50$ Гц.

Представим $G=f(i)$ при работе программы «обучение» в виде:

$$G_{06}=f(i) \cdot ku_{06} \cdot kf_{06}; ku_{06}=\frac{220^2}{U_m^2}; kf_{06}=\frac{f_m}{50};$$

где U_m — текущее значение U_ϕ , В; f_m — текущее значение f_c , Гц.

При измерении текущего веса на крюке при работе в режиме «Измерение» также необходимо провести корректировку значений $f(i)$ на напряжения и частоту сети при: $U_\phi=220$ В, $f_c=50$ Гц:

$$G_{изм}=f(i) \cdot ku_{изм} \cdot kf_{изм}; ku_{изм}=\frac{U_m^2}{220^2}; kf_{изм}=\frac{50}{f_m}.$$

На основе экспериментальных и теоретических исследований на математической модели [7] были выявлены информативные параметры АД для измерения веса груза на крюке крана: n — частота вращения вала АД, об/с; I_1 — ток статора, А; I_2 — ток ротора, А; P — потребляемая мощность, Вт.

Использование частоты вращения вала АД в качестве информативного параметра [9] усложняется установкой датчика частоты вращения на вал двигателя, что часто затруднительно и экономически не целесообразно. Поэтому предложен способ определения частоты вращения вала двигателя по спектральному анализу (преобразование Фурье)

вибраций станины двигателя (данное решение может дополнять установленный датчик частоты вращения). В ограничителе грузоподъемности частота вращения вала кранового двигателя определяется, используя акселерометр, который крепится или на станине асинхронного двигателя или на опорной плите. Сигнал с выхода акселерометра подвергается спектральному анализу, из которого выделяется пиковое значение амплитуды сигнала, соответствующее частоте вращения вала двигателя.

Установка акселерометра на опорную плиту, или на станину двигателя позволяет определить частоту вращения вала кранового двигателя, что облегчает монтаж и повышает надежность ограничителя грузоподъемности в целом [9].

Кроме того, использование данного метода позволяет вести и диагностику механических узлов кранового электропривода, редуктора, тормозного устройства, двигателя, и т. д. При расширении диапазона спектра виброграммы до десятков кГц можно выявить дефекты подшипникового узла кранового двигателя, а в области низких частот виброграммы (ед. Гц) можно выявить дефекты, связанные с началом разрушения металлоконструкции электрического крана. Таким образом, непрерывная вибродиагностика выявления различных дефектов в основных узлах электрического крана позволяет существенно повысить его безопасность.

Измерение веса груза по частоте вращения вала двигателя имеет недостаток, связанный с тем, что при регулировании частоты вращения приводного двигателя путем введения сопротивления в цепь ротора его механические характеристики меняются. В этом случае в память МК в режиме «Обучение» необходимо ввести все характеристики $n=f(G)$, соответствующие каждому режиму работы приводного двигателя при различных добавочных сопротивлениях ротора.

Такого недостатка лишены методы косвенного измерения массы груза по токам статора и ротора АД и потребляемой мощности двигателя. Ток статора нелинейно зависит от веса груза. Поэтому при построении рабочей характеристики необходимо измерить ее по нескольким точкам, а для этого необходимо поднимать несколько грузов известных масс, что повышает трудоемкость работ.

Наиболее предпочтительным информативным параметром АД является потребляемая мощность двигателя P . Зависимость потребляемой мощности от массы поднимаемого груза $P=f(G)$ представлена на рис. 5.

Данная зависимость является линейной, что позволяет вводить ее в память МК по двум точкам. Особенностью данного метода является возможность использовать счетчик электрической энергии в качестве датчика потребляемой активной мощности двигателем.

На рис. 6 представлены электромагнитные переходные процессы при пуске кранового электропривода для двигателя МТФ 311-6 на подъем груза весом $G=40$ т, где ω — частота вращения вала двигателя, I —

ток статора, P — потребляемая мощность двигателя. При этом двигатель разгоняется до скорости холостого хода, и величина установившейся мощности составляет $P=P_{\text{хх}}$. Представленный на рис. 6 переходный процесс затухает за время около $t_{\text{пн}}=0,2$ с и отражает электромагнитные переходные процессы АД.

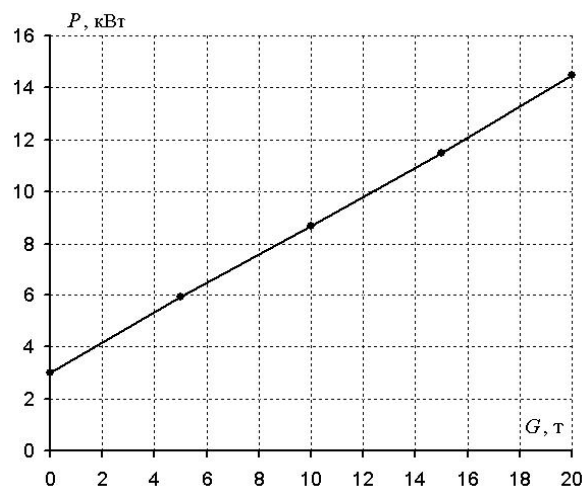


Рис. 5. Зависимость $P=f(G)$ кранового электропривода

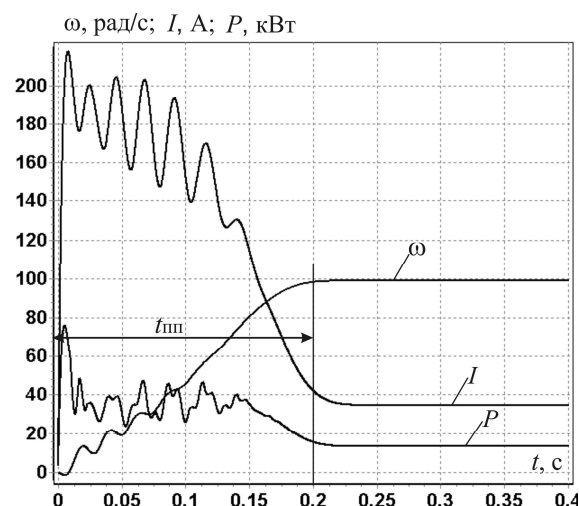


Рис. 6. Электромагнитные переходные процессы при пуске кранового электропривода

На рис. 7 представлены переходные процессы установления механизма подъема при пуске кранового электропривода, где x_1 — координата передвигания моста крана, x_2 — координата передвигания груза. На развернутой временной диаграмме переходных процессов первую часть времени составляет время выборки канатов — $t_{\text{вк}}$, при этом двигатель работает на холостом ходу. Вторую часть составляет время натяжения канатов — $t_{\text{нк}}$, при этом возрастают потребляемая активная мощность P и ток двигателя I , падает частота вращения вала двигателя ω и прогибается мост крана x_1 . Груз при натяжении канатов остается в покое: $x_2=0$. Переходный процесс затухает за время около $t_{\text{нк}}=2$ с и отражает переходные процессы установления механизма подъема крана. Далее за время $t_{\text{пн}}$ происходит подъем

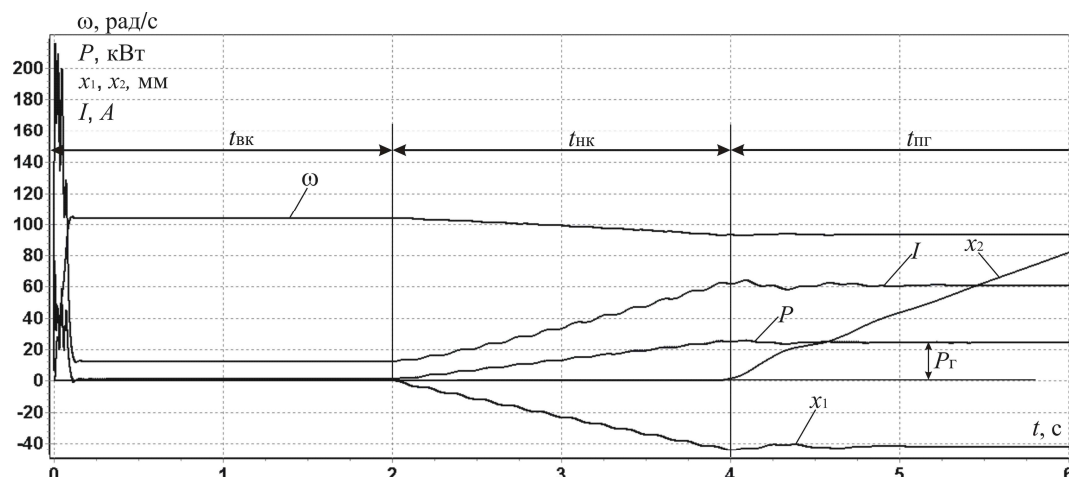


Рис. 7. Переходные процессы установления механизма подъема при пуске кранового электропривода

груза (x_2 возрастает) и результирующая потребляемая мощность устанавливается на уровне P_r – мощности затрачиваемая на подъем груза.

При построении ограничителя грузоподъемности необходимо учесть время переходного процесса $t_{пп}$ при пуске АД, т. к. на данном участке времени информативные параметры не обеспечивают достоверности измерения веса груза. Электромагнитные переходные процессы, во время которых невозможно измерение веса поднимаемого груза косвенными методами, протекают, как правило, на порядок быстрее (0,1...0,3 с) чем происходит нарастание нагрузки (2...3 с) в канатах [7]. Это обстоятельство подтверждает возможность и целесообразность использования косвенных методов для определения веса поднимаемого груза и применение предложенного способа в ограничителях грузоподъемности.

Выводы

1. Теоретически и экспериментально доказана возможность использования косвенных методов определения массы поднимаемого груза на

основе мониторинга частоты вращения, токов статора, фазного напряжения и потребляемой мощности приводного двигателя механизма подъема электрического крана.

2. Предложено введение поправочных коэффициентов по напряжению и по частоте питающей сети для устранения ошибки, вносимой отклонениями параметров питающей сети от номинальных, при определении веса поднимаемого груза.
3. Обоснована целесообразность мониторинга электрических параметров приводного двигателя для обеспечения функций защиты от опасных производственных воздействий.
4. Мониторинг электрических параметров механизма подъема обеспечивает живучесть системы защиты грузоподъемного крана и повышает безопасность эксплуатации.
5. Разработанные косвенные методы определения веса поднимаемого груза могут найти применение в системах управления с частотно-регулируемым крановым электроприводом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сушинский В.А. Семинары по проблемам обеспечения безопасности при эксплуатации грузоподъемных машин // Подъемно-транспортное дело. – 2007. – № 2. – С. 27–28.
2. Информация о семинаре «Обеспечение безопасности при эксплуатации грузоподъемных машин», организованного и проведенного Управлением по техническому и экологическому надзору Ростехнадзора по Томской области, Томским государственным архитектурно-строительным университетом (ТГАСУ) и НТЦ «Строймашавтоматизация» 21–25 ноября 2005 г. в городе Томске [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.ntcsma.ru/arhiv.html>. – 05.12.05.
3. Усанов В.Н. Новые системы безопасности // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2002. – № 12. – С. 30.
4. Сушинский В.А. Тенденции развития, проблемы разработки и применения технических средств и систем автоматизации грузоподъемных машин // Труды международной научно-технической конференции «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2001», г. Санкт-Петербург, 27–29 июня 2001. – С. 63–64.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов (ПБ 10-382-00). – М.: ПИО ОБТ, 2000. – 268 с.
6. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.: ил.
7. Орлов Д.Ю. Повышение безопасности эксплуатации кранов мостового типа на основе ограничителя грузоподъемности с расширенными функциональными возможностями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2004. – 23 с.
8. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горбев, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. к.т.н. В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.: ил.
9. Пат. на ПМ 61700 РФ. МПК⁸ B66C 23/90. Ограничитель грузоподъемности электрического крана / Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов. – Опубл. 10.03.2007, Бюл. № 7.

Поступила 23.04.2008 г.