

На правах рукописи

**Однокопылов Иван Георгиевич**

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА  
КРАНА МОСТОВОГО ТИПА С ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И  
ЖИВУЧЕСТЬЮ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования  
Электротехнического института Томского политехнического университета.

Научный руководитель: – кандидат технических наук, доцент  
Дементьев Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор  
Бейнарович Владислав Александрович  
– кандидат технических наук, доцент  
Кладиев Сергей Николаевич

Ведущая организация: – ОАО «СКБ Сибэлектромотор» (г. Томск)

Защита диссертации состоится 26 декабря 2008 г. в 10.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при Томском политехническом университете в ауд. 217 8 учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «24» ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
совета, к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Мостовые краны производят большую часть подъемно-транспортных работ на различных предприятиях. Они выполняют не только обслуживающие функции, но и нередко включены непосредственно в технологический процесс. От их надежной и бесперебойной работы зависят производительность предприятия, его технико-экономические показатели, безопасность обслуживающего персонала.

Решение проблемы повышения надежности и безопасной эксплуатации мостовых кранов во многом определяются особенностями и качественными показателями электропривода (ЭП) механизма подъема, к которому предъявляют ряд жестких требований, важнейшими из которых являются: обеспечение высокой производительности, бесперебойности в работе, безопасности обслуживания, простота эксплуатации и ремонта, т.е. обеспечения «безопасности» и «живучести».

В настоящее время для подавляющего большинства грузоподъемных кранов мостового типа в качестве ЭП рациональным является использование асинхронного электропривода (АЭП), как наиболее простого, дешевого и надежного.

В связи с этим актуальным является разработка и исследование АЭП механизма подъема мостовых кранов с повышенной безопасностью и живучестью, как единой электромеханической системы в комплексе с современными системами безопасности на базе микроконтроллерного (МК) устройства, выполняющего не только функции защиты от опасных производственных воздействий и регистрации параметров крана, но и функции управления ЭП, диагностики состояния конструкций, ответственных узлов и агрегатов в процессе работы крана.

**Цель работы** состоит в исследовании асинхронного электропривода механизма подъема крана мостового типа и разработке практических рекомендаций по обеспечению его безопасности и живучести.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть основные особенности и тенденции развития кранового асинхронного электропривода;
- сделать анализ технических решений и способов обеспечения безопасности и живучести нерегулируемых и частотно-регулируемых АЭП механизма подъема крана;
- разработать математическую модель АЭП механизма подъема, как основного информативного технического устройства, характеризующего нагрузку на кран;
- выявить с помощью математической модели связь параметров асинхронного двигателя (АД) механизма подъема крана с массой поднимаемого груза;
- разработать микроконтроллерный ограничитель грузоподъемности (ОГ) на основе косвенных методов измерения массы груза;

- исследовать на математической модели аварийный режим типа «обрыв фазы» трехфазного АД частотно-регулируемого ЭП механизма подъема и разработать рекомендации по обеспечению живучести ЭП;

- разработать схему питания электромагнитного тормоза с форсировкой;

- провести экспериментальные исследования и оценить полученные результаты.

**Методы исследования.** В диссертационной работе применены: положения математической теории электрических машин, методы, используемые при описании динамических процессов электромеханического преобразования энергии, численные методы Эйлера и Рунге-Кутты 4-го порядка, спектральный метод анализа, математическое моделирование и программирование в среде Delphi и Matlab. Проверка теоретических исследований осуществлялась экспериментальными методами.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель для исследования в различных режимах работы АЭП механизма подъема крана мостового типа, отличающаяся тем, что в ней учитывается упругий характер механической части крана, влияние электромагнитного тормоза, насыщение АД, наличие преобразовательного устройства.

2. Выявлены и обоснованы информативные параметры АД, характеризующие массу груза на крюке механизма подъема крана для ограничения его грузоподъемности.

3. Представлен способ построения микроконтроллерного ОГ на основе косвенных методов измерения массы груза на крюке механизма подъема мостового крана.

4. Предложен способ управления по обеспечению живучести частотно-регулируемого АЭП механизма подъема крана мостового типа, обеспечивающий работу трехфазного АД в аварийном двухфазном режиме на основе алгоритма восстановления и схема его реализации.

**Практическая ценность работы:**

- разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать нерегулируемый и частотно-регулируемый АЭП механизма подъема крана мостового типа;

- разработаны технические решения по построению ОГ на основе косвенных методов измерения массы груза для оснащения мостовых и козловых кранов;

- предложены рекомендации по повышению живучести частотно-регулируемого кранового АЭП, обеспечивающие работу в аварийном двухфазном режиме трехфазного АД с МК управлением на основе алгоритма восстановления работоспособности.

**Реализация результатов работы.** На предприятии ООО «Тепромес» г. Томск внедрены «Программа расчета переходных процессов кранового асинхронного электропривода с ограничителем грузоподъемности», свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2007611078 и «Программа расчета переходных процессов асинхронного электропривода в неполнофазных и аварийных режимах работы», свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613578. На предприятии ОАО "Сибэлектромотор" г. Томск внедрены рекомендации по проектированию кранового асинхронного электропривода с электромагнитным тормозным устройством и «Программа расчета переходных процессов кранового асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством», свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612119.

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель АЭП механизма подъема крана мостового типа, позволяющая исследовать ЭП в различных режимах работы.
2. Обоснование информативных параметров АД, характеризующих массу груза на крюке механизма подъема крана мостового типа.
3. Способ построения микроконтроллерного ОГ на основе косвенных методов измерения массы груза на крюке механизма подъема мостового крана.
4. Способ обеспечения живучести в аварийном двухфазном режиме частотно-регулируемого АЭП механизма подъема крана мостового типа.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались на IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2003 г.; на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2004 г.; на IV международной научно-технической конференции «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения», г. Новочеркасск, 2004 г.; на XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2005 г.; на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2005 г.; на всероссийской конференции – конкурс инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению программы «Энергетика и энергосбережение», г. Томск, 2006 г.; на V международной (XVI Всероссийской) научной конференции по автоматизированному электроприводу, г. Санкт-Петербург, 2007 г.; на международной научн.-техн. конф. «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2007 г.

**Публикации.** Результаты выполненных исследований отражены в 26 научных работах, в том числе, 4 написанных лично автором и 22 работах, написанных в соавторстве, 18 статьях и тезисах докладов, 8 патентах на изобретения и полезные модели.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, выполнена на 143 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка, 5 таблиц, список использованной литературы из 135 наименований и 2 приложения на 6 страницах.

Автор выражает благодарность научному консультанту Баранову Павлу Рудольфовичу за неоценимую помощь при работе над диссертацией.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первой главе** рассмотрены основные особенности и тенденции развития кранового АЭП. Приведен обзор по отказам асинхронных двигателей и причинам их появления. Установлено, что по АЭП механизма подъема, как объекту потенциальной опасности, необходимо провести исследования по обеспечению его «безопасности» и «живучести». Приведены существующие, а также предложенные автором, способы повышения безопасности кранового АЭП путем ограничения грузоподъемности (рис. 1).

Установлено, что ограничение грузоподъемности электрических кранов косвенными методами ранее не применялось. Рассмотрены предпосылки и возможности построения ОГ на основе косвенных методов измерения массы груза.



Рис. 1. Способы ограничения грузоподъемности АЭП механизма подъема мостового крана

Обзор литературы показал, что практически отсутствуют разработки по обеспечению живучести АЭП мостовых кранов при отказах его элементов.

Приведены существующие способы, а также предложенный автором способ обеспечения живучести АЭП при неисправности типа «обрыв фазы» или отказе силового ключа инвертора (рис. 2), обоснована возможность работы ЭП в аварийном двухфазном режиме.

Приведены тенденции развития электромагнитных тормозных устройств

кранового АЭП по обеспечению его безопасной работы. Рассмотрены существующие схемные решения электромагнитных тормозных устройств и их недостатки.

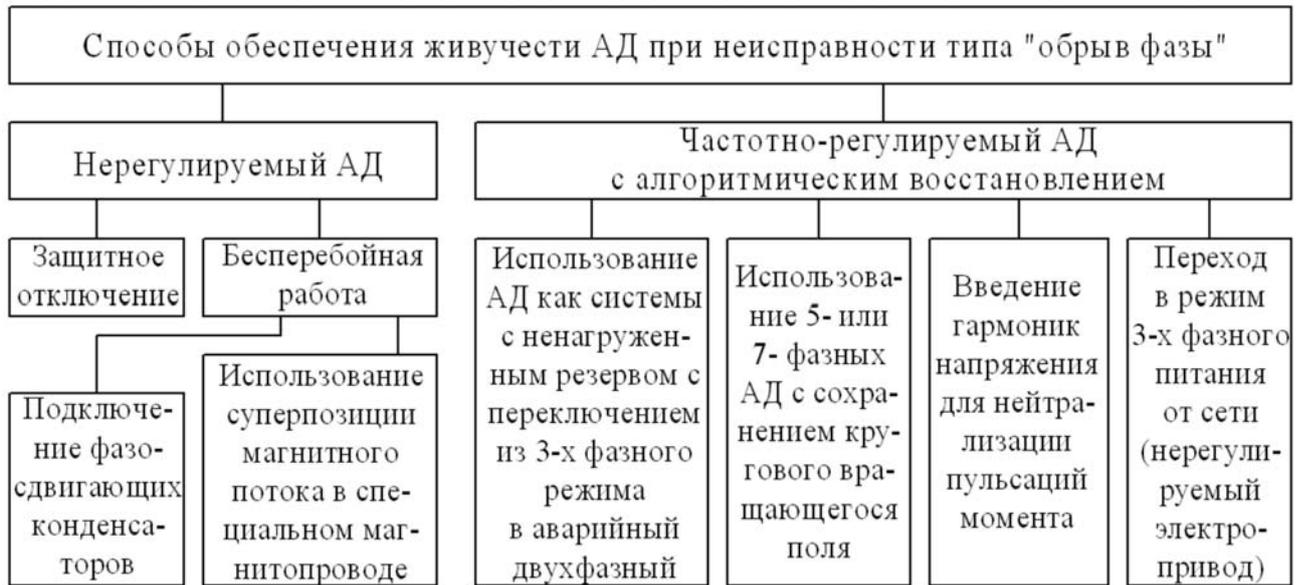


Рис. 2. Способы обеспечения живучести АЭП механизма подъема мостового крана

**Во второй главе** приведено математическое описание АЭП механизма подъема мостового крана, как единой электромеханической системы и разработана математическая модель.

При составлении математической модели были приняты следующие допущения: потери в стали пренебрежимо малы; фазные обмотки симметричны и сдвинуты на угол  $2/3\pi$  рад; воздушный зазор равномерен; ротор симметричен; питающая сеть – бесконечно большой мощности. Реальная распределенная обмотка заменяется сосредоточенной, а намагничивающая сила ее равна намагничивающей силе реальной обмотки.

Математическое описание АД произведено в трехфазной неподвижной системе координат  $\alpha, \beta, \gamma$ . Система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы в статоре и роторе АД:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A = R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}; \\ U_B = R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}; \\ U_C = R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}; \end{array} \right. (1) \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 = R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + (\Psi_b - \Psi_c) \cdot p_n \cdot \omega / \sqrt{3}; \\ 0 = R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + (\Psi_c - \Psi_a) \cdot p_n \cdot \omega / \sqrt{3}; \\ 0 = R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + (\Psi_a - \Psi_b) \cdot p_n \cdot \omega / \sqrt{3}, \end{array} \right. (2)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  – мгновенные значения фазных напряжений статора;  $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$  – мгновенные значения токов фаз статора и ротора соответственно;  $R_s, R_r$  – активные сопротивления статора и ротора;  $p_n$  – число пар полюсов АД;  $\omega$  – частота вращения вала двигателя;  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  – мгновенные значения потокосцеплений фаз статора и ротора.

Потокосцепления для всех фаз:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_A = L_{SA}i_A - \frac{1}{2}L_m i_B - \frac{1}{2}L_m i_C + L_m i_a - \frac{1}{2}L_m i_b - \frac{1}{2}L_m i_c; \\ \Psi_B = -\frac{1}{2}L_m i_A + L_{SB}i_B - \frac{1}{2}L_m i_C - \frac{1}{2}L_m i_a + L_m i_b - \frac{1}{2}L_m i_c; \\ \Psi_C = -\frac{1}{2}L_m i_A - \frac{1}{2}L_m i_B + L_{SC}i_C - \frac{1}{2}L_m i_a - \frac{1}{2}L_m i_b + L_m i_c; \\ \Psi_a = L_m i_A - \frac{1}{2}L_m i_B - \frac{1}{2}L_m i_C + L_{RA}i_a - \frac{1}{2}L_m i_b - \frac{1}{2}L_m i_c; \\ \Psi_b = -\frac{1}{2}L_m i_A + L_m i_b - \frac{1}{2}L_m i_C - \frac{1}{2}L_m i_a + L_{RB}i_b - \frac{1}{2}L_m i_c; \\ \Psi_c = -\frac{1}{2}L_m i_A - \frac{1}{2}L_m i_B + L_m i_c - \frac{1}{2}L_m i_a - \frac{1}{2}L_m i_b + L_{RC}i_c. \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $L_m$  – максимальная приведенная взаимная индуктивность между фазами статора и ротора;  $L_{SA}, L_{SB}, L_{SC}, L_{RA}, L_{RB}, L_{RC}$  – индуктивности фаз статора и ротора соответственно.

Результирующее выражение для электромагнитного момента в трехфазной системе координат:

$$M = p_n \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)]. \quad (4)$$

Системы дифференциальных уравнений (1)-(2) для расчёта численными методами представлены в виде уравнения с матричными переменными:

$$[L_1] \cdot \frac{d[i]}{dt} = [U] - \left( [R] + [L_2] \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \right) \cdot [i]; \quad (5)$$

где  $[i]$  – матрица неизвестных (токи статора и ротора);  $[U]$  – матрица напряжений;  $[R]$  – матрица сопротивлений;  $[L_1], [L_2]$  – матрицы индуктивностей.

Влияние электромагнитного тормоза на работу электропривода учтено введением в уравнение движения АЭП тормозного момента  $M_T$ . Работа электромагнитного тормоза описывается выражениями (6)-(8):

$$U_A = i_{\Delta} R_{\Delta} + L_{\Delta} \frac{di_{\Delta}}{dt}; \quad (6) \quad Q_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\Delta} \cdot i_{\Delta}}{\delta}; \quad (7)$$

$$M_T = 1_{Q_T} \cdot \text{sign}(\omega) \cdot (Q_{ПР} - Q_T) \cdot k_{ТР} \cdot R_{ср} \cdot z_k; \quad (8)$$

где  $R_{\Delta}, L_{\Delta}$  – активное сопротивление и индуктивность электромагнита соответственно;  $i_{\Delta}$  – ток электромагнита;  $\delta$  – величина воздушного зазора;  $Q_T$  – тяговое усилие электромагнита;  $Q_{ПР}$  – противодействующее усилие возвратных пружин;  $k_{ТР}$  – коэффициент трения фрикционных накладок;  $R_{ср}$  – средний радиус поверхности трения накладок;  $z_k$  – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности механического тормоза.

Когда тяговое усилие  $Q_T$  станет равным противодействующему усилию  $Q_{ПР}$ , тормозной момент  $M_T$  не будет препятствовать вращению вала АД:

$$\begin{aligned} 1_{Q_T} &= 1 \text{ при } Q_T < Q_{\text{ПР}}; \\ 1_{Q_T} &= 0 \text{ при } Q_T \geq Q_{\text{ПР}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Функция  $\text{sign}(\omega)$  учитывает реактивный характер тормозного момента  $M_T$ :

$$\begin{aligned} \text{sign}(\omega) &= 1 \text{ при } \omega \geq 0; \\ \text{sign}(\omega) &= -1 \text{ при } \omega < 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Математическое описание механической части ЭП представлено двухмассовой расчетной схемой, которая при подъеме груза представлена на рис. 3, где:  $m_1$  – сумма массы

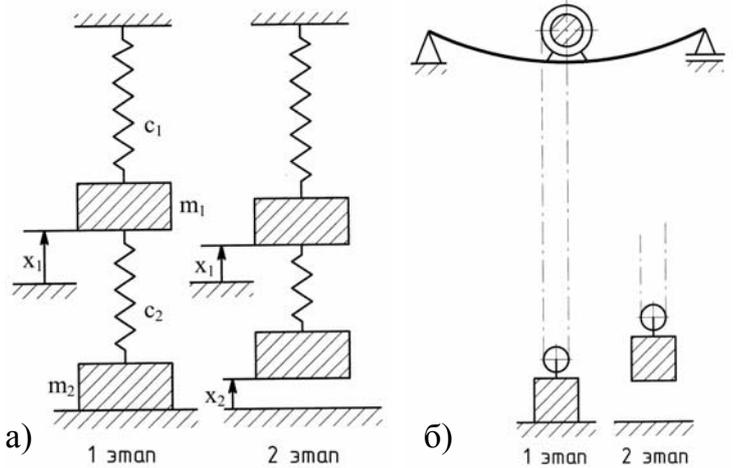


Рис. 3. а) расчетная модель мостового крана, б) кинематическая схема мостового крана.

кранового моста и массы тележки;  $m_2$  – сумма массы груза и массы крюковой подвески;  $c_1$  – жесткость металлоконструкции крана;  $c_2$  – жесткость подъемного каната;  $v$  – линейная скорость наматывания каната на барабан;  $l$  – длина каната намотанного на барабан  $l = v \cdot t$ ;  $x_1$  – координата движения массы металлоконструкции;  $x_2$  – координата движения груза.

Уравнения движения механической части при подъеме груза записываются для двух этапов. На первом этапе происходит натяжение каната, прогиб моста крана, а груз остается в покое:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + (c_1 + c_2)x_1 = -c_2 vt. \quad (11)$$

Второй этап начинается в момент времени, когда усилие в канате  $F_2$  становится равным  $m_2 g$ , т.е.  $F_2 = m_2 g$  и тогда уравнения для второго этапа:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + (c_1 + c_2)x_1 - c_2 x_2 = -c_2 vt, \quad m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} - c_2 x_1 + c_2 x_2 = c_2 vt - m_2 g. \quad (12)$$

По этим уравнениям можно рассчитать усилия, действующие в механизмах крана:  $F_1 = -c_1 \cdot x_1$  – усилие, действующие на фундамент,  $F_2 = c_2 \cdot (vt + x_1 - x_2)$  – усилие, создающее крутящий момент на валу АД:

$$M_F = \frac{F_2 \cdot D_{\delta}}{2 \cdot \alpha \cdot \eta_{\text{пол}} \cdot u_M \cdot \eta_M}; \quad (13)$$

где  $D_{\delta}$  – диаметр грузового барабана;  $\alpha$  – кратность полиспаста;  $\eta_{\text{пол}}$  – КПД полиспаста;  $u_M$  – передаточное число механизма;  $\eta_M$  – КПД механизма.

С учетом вышеприведенных выражений (4), (8) и (13) уравнение движение ЭП механизма подъема крана имеет вид:

$$M - M_F - M_T = \frac{J_{\Sigma}}{p_n} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (14)$$

В динамических режимах на АД существенное влияние оказывает насыщение потоков рассеяния. Индуктивность рассеяния с учетом насыщения предлагается рассчитывать в функции тока статора  $I_1$ :

$$L_{S\sigma H} = L_{S\sigma} - \Delta L_{H \max} \cdot \left[ \frac{\sqrt[3]{I_n} \cdot (\sqrt[3]{I_1} - 1)}{\sqrt[3]{I_1} \cdot (\sqrt[3]{I_n} - 1)} \right] \cdot \frac{L_{S\sigma}}{(L_{S\sigma} + L_{R\sigma})}; \quad (15)$$

где  $L_{S\sigma}$ ,  $L_{R\sigma}$  – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора без учета насыщения;  $I_n$  – пусковой ток статора;  $\Delta L_{H \max}$  – разница между максимально насыщенной и ненасыщенной индуктивностью короткого замыкания.

Активное сопротивление обмотки ротора с учетом вытеснения тока:

$$R_{r\xi} = k_{rs} \cdot R_r; \quad (16)$$

где  $k_{rs}$  – коэффициент увеличения сопротивления ротора, рассчитывается в функции скольжения  $s$ :

$$k_{rs} = 0,2 + (R_{2n}/R_r - 0,2) \cdot \sqrt{abs(s)}. \quad (17)$$

где  $R_{rn}$  – пусковое сопротивление обмотки ротора. При  $k_{rs} < 1$  принимается  $k_{rs} = 1$ .

На основе приведенного выше математического описания устройств АЭП механизма подъема крана была создана компьютерная программа в среде Delphi для проведения исследований различных режимов работы.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы по обеспечению живучести частотно-регулируемого АЭП механизма подъема мостового крана в аварийной ситуации типа «обрыв фазы». Разработан способ восстановления работоспособности трехфазного АД в аварийном двухфазном режиме, в котором обеспечивается равенство амплитудных значений тока в двух оставшихся в работе фазах и угол сдвига фаз равным  $\pi/3$ .

Функциональная схема частотно-регулируемого ЭП с обеспечением живучести в аварийном двухфазном режиме приведена на рис. 4.

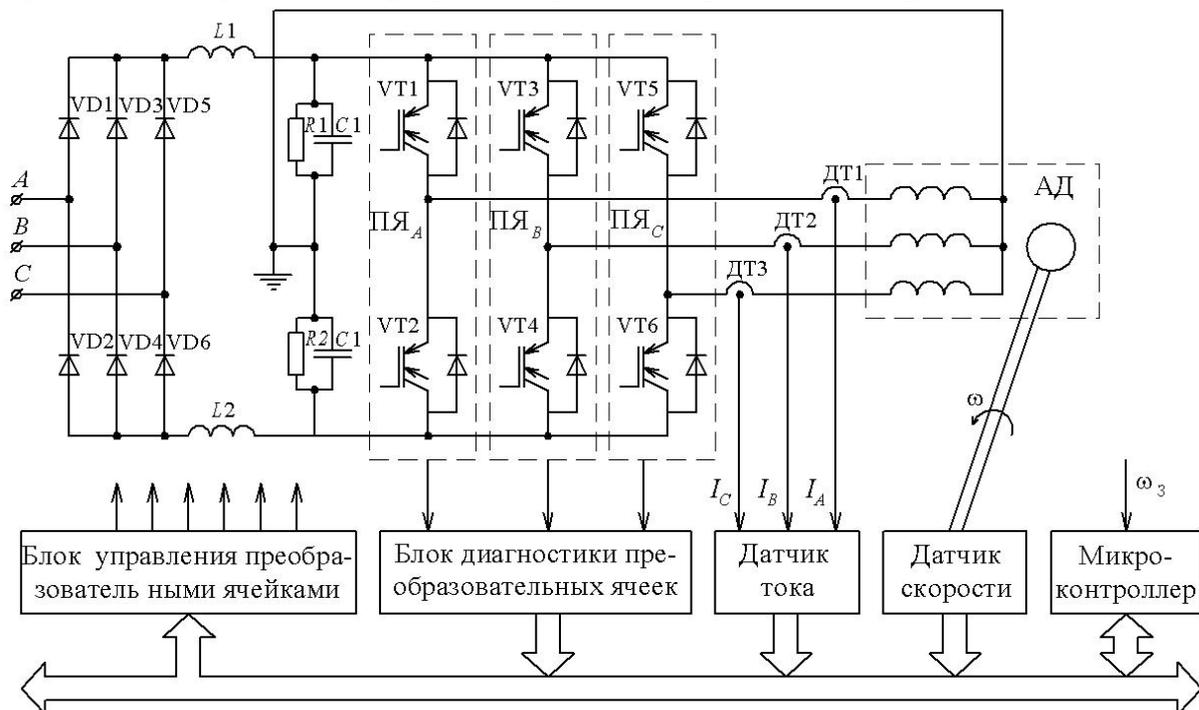


Рис. 4. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода с обеспечением живучести

Преобразователь частоты со звеном постоянного тока выполнен в виде отдельных полумостовых ячеек ПЯ<sub>А</sub>, ПЯ<sub>В</sub>, ПЯ<sub>С</sub>. Контроль в фазах АД обеспечивается датчиками токов ДТ1, ДТ2, ДТ3. Для выявления отказавшей фазы в схеме предусмотрен блок диагностики полумостовых ячеек, состоящий из датчиков состояния, которые вырабатывают три бита отказа  $a, b, c$ , поступающие в систему управления для отключения отказавшей фазы и реализации алгоритма восстановления, который предусмотрен в управляющем МК. МК формирует задания на фазные токи  $I_A, I_B, I_C$ :

$$\begin{cases} I_A = I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot k \cdot t \cdot p_n \cdot \bar{d} \pm \pi \cdot b); \\ I_B = I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot k \cdot t \cdot p_n \cdot \bar{d} \pm \pi \cdot c + 2\pi/3); \\ I_C = I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot k \cdot t \cdot p_n \cdot \bar{d} \pm \pi \cdot a + 4\pi/3), \end{cases} \quad (18)$$

где  $I_\omega$  – значение амплитуды формируемых фазных токов;  $\omega$  – текущая частота вращения вала двигателя;  $t$  – текущее время;  $f_1$  – частота тока статора;  $a, b, c$  – значение битов слова состояния ЭП по отказам (вырабатываются датчиками состояния ПЯ);  $d$  – значение бита, вычисляемого по логическому выражению  $d = a \cup b \cup c$  ( $\cup$  – логическая операция ИЛИ), если  $d = 1$  – есть отказ в одной из фаз;  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$  – инверсные значения  $a, b, c, d$ ;  $k$  – коэффициент увеличения частоты питающей сети, зависящий от заданной частоты вращения  $\omega_3$ .

На рис. 5. приведена функциональная схема системы управления частотно-регулируемого АЭП с обеспечением живучести. Задания на токи в фазах АД формируются функциональным преобразователем (ФП), а заданная частота вращения вала двигателя контролируется регулятором скорости (РС) и датчиком скорости (ДС).

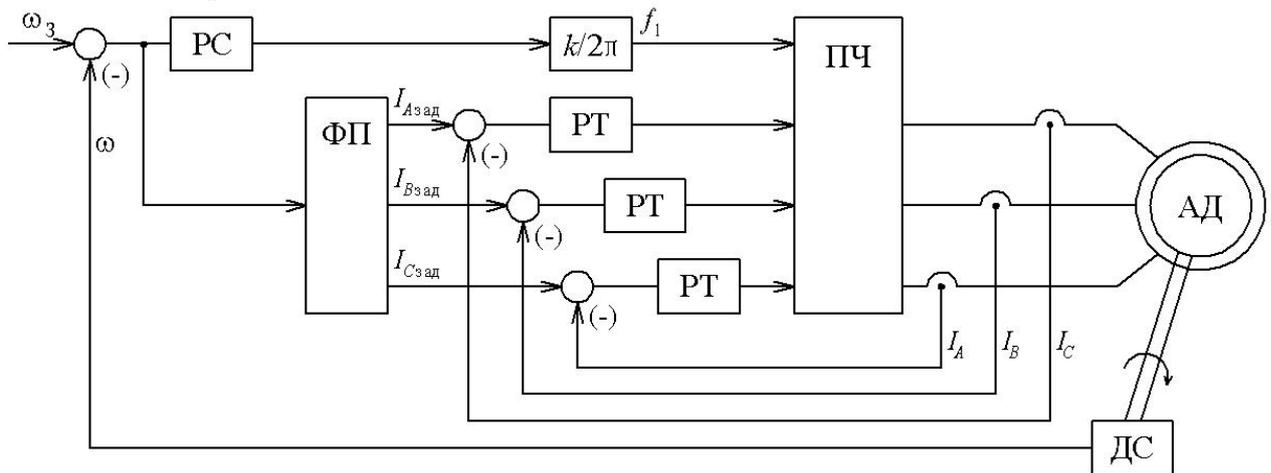


Рис. 5. Функциональная схема системы управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода с обеспечением живучести

На рис. 6 и 7 приведены временные диаграммы электромеханических переходных процессов ( $n, I_A, I_B, I_C, P$ ) рабочего трехфазного режима АД с переключением в аварийный двухфазный режим без алгоритма восстановления (рис. 6) и с алгоритмом восстановления (рис. 7), полученных на математической модели. Время диагностики аварийной ситуации  $T_d = 100$  мкс.

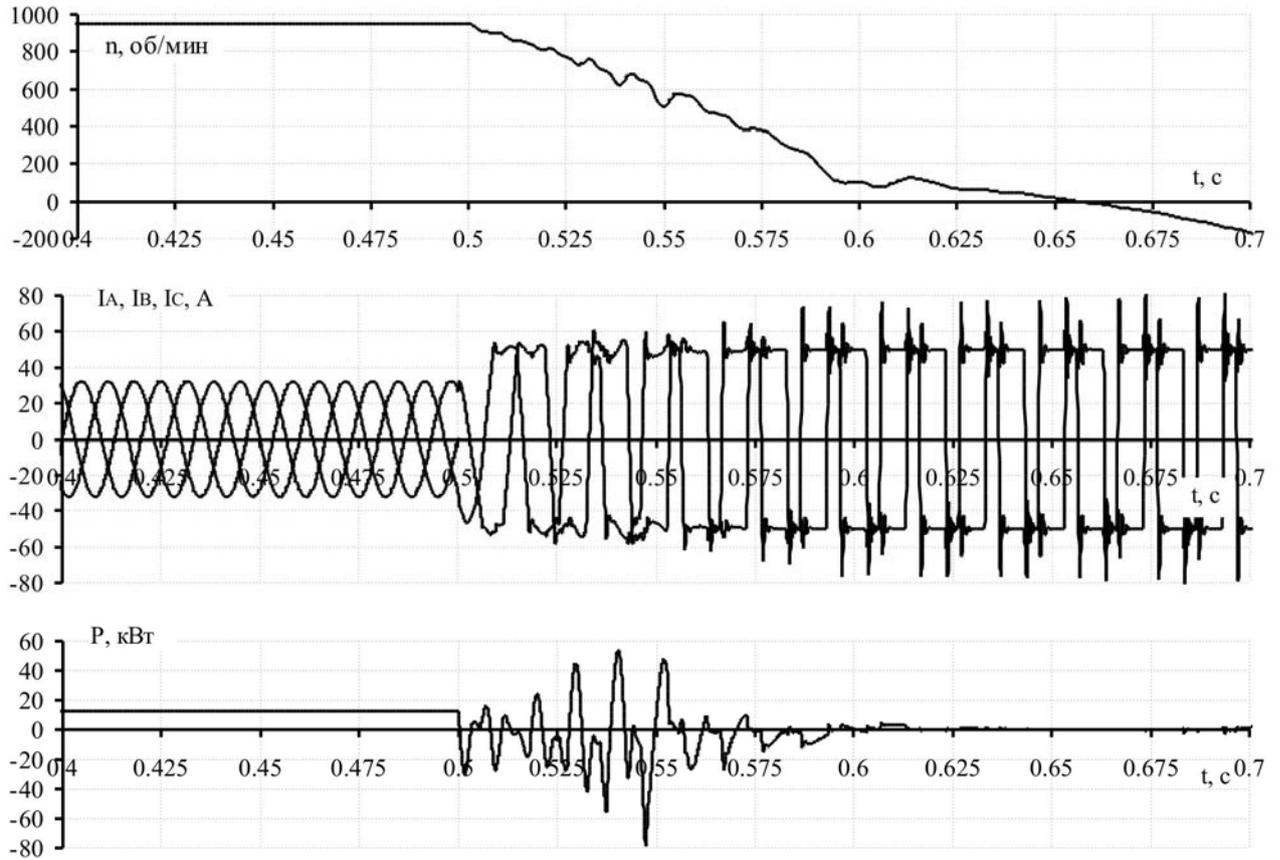


Рис. 6. Временные диаграммы переходного процесса аварийного режима АД

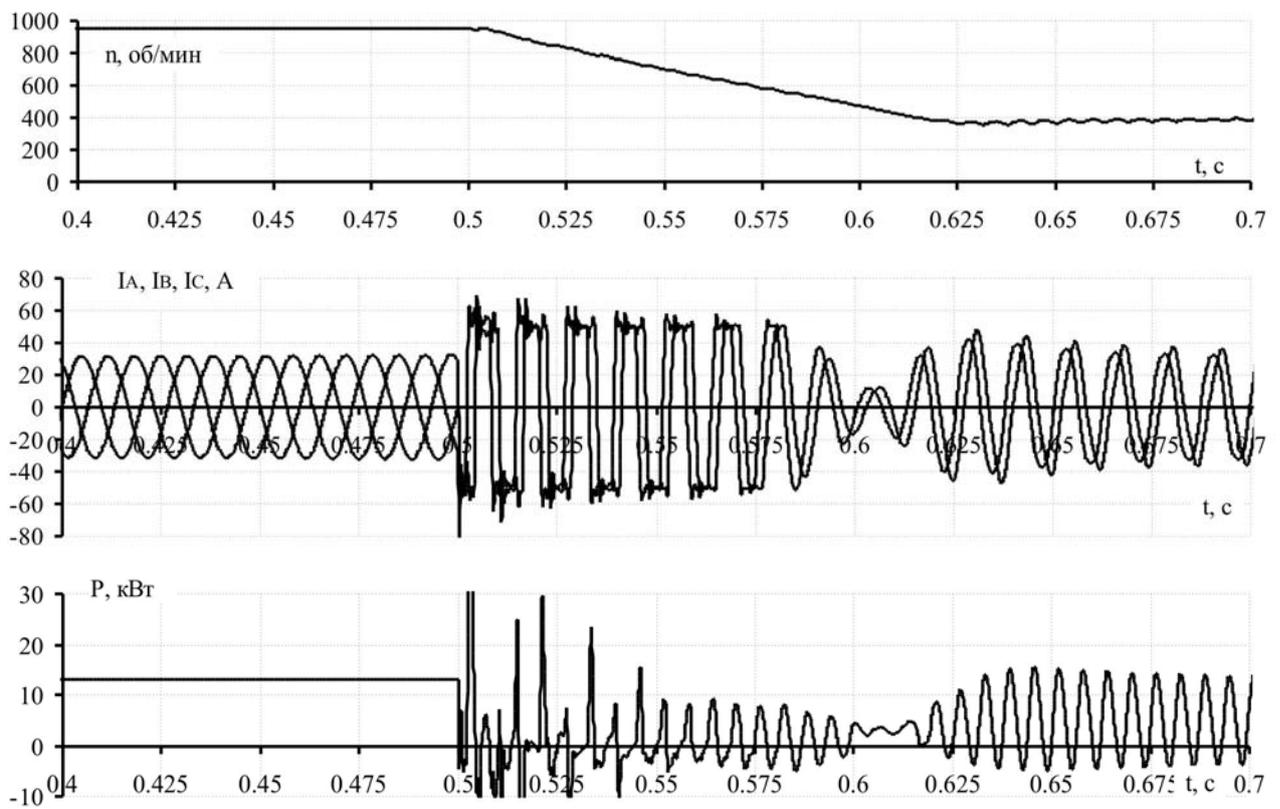


Рис. 7. Временные диаграммы переходного процесса аварийного режима АД с активизацией алгоритма восстановления

Как видно из диаграмм рис. 6 при обрыве фазы в АД происходит резкое увеличение фазных токов до уровня  $I_{\text{огр}}=2 \cdot I_{\text{н}}$ . При этом двигатель не держит номинальную нагрузку, и частота вращения падает до нуля.

Применение алгоритма восстановления (рис. 7) позволяет продолжить работу двигателя в аварийном режиме работы: ток статора остается на номинальном уровне, частота вращения и значение активной мощности падают в 3 раза.

Таким образом, использование алгоритма восстановления работоспособности обеспечивает живучесть АД в аварийном двухфазном режиме, а также управление двигателем, например при пуске. Исследования влияния времени диагностики  $T_{\text{д}}$  на характер переходного процесса при переключении из трехфазного режима работы в аварийный двухфазный показали, что при  $T_{\text{д}} > 10$  мс двигатель опрокидывается с потерей возможности вновь войти в рабочий режим.

**В четвертой главе** обоснована возможность построения ОГ на основе косвенных методов измерения массы поднимаемого груза для оснащения нерегулируемого АЭП механизма подъема. С помощью математической модели определены информативные параметры АД, характеризующие массу поднимаемого груза: частота вращения  $n$ , ток статора  $I_1$ , ток ротора  $I_2$  и активная мощность  $P$ . Разработан микроконтроллерный ОГ, позволяющий без датчика усилия определять массу груза за счет введенной в МК характеристики информативного параметра от массы груза.

На математической модели была исследована работоспособность ОГ при подъеме груза массой 15 т в режиме пуска АЭП. Работа ОГ на основе косвенного метода измерения массы груза на крюке исследована на математической модели. На рис. 8 представлены переходные характеристики для этого случая.

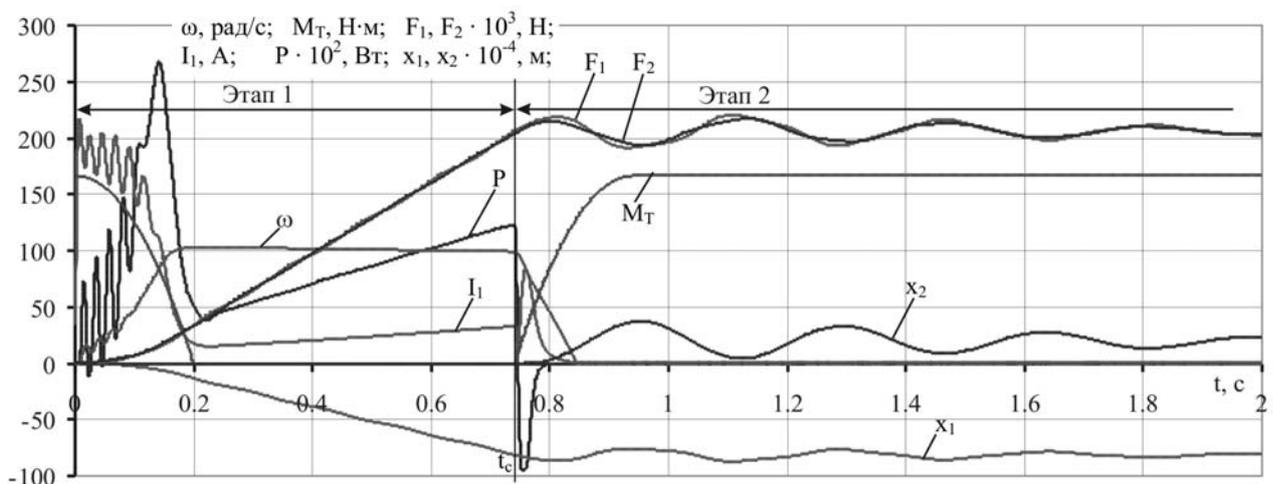


Рис. 8. Переходные характеристики при пуске крана и срабатывании ограничителя грузоподъемности (подъем груза массой 15 т)

Анализ результатов моделирования показывает, что вращающиеся массы, находящиеся в движении, при срабатывании ОГ могут привести к отрыву груза

с завышенной массой, поэтому скорость подъема груза при приближении нагрузки к номинальной должна быть ограничена.

Было исследовано влияние отклонений параметров питающей сети от номинальных значений на точность определения массы поднимаемого груза косвенными методами. Установлено, что максимальная ошибка при самых неблагоприятных параметрах сети (отклонения по частоте и амплитуде) может достигать 25 %. Учитывать отклонения параметров питающей сети предложено с помощью выражения:

$$m=f(i) \cdot k_u \cdot k_f; \quad (19)$$

где  $m=f(i)$  – характеристика информативного параметра, занесенная в память МК;  $k_u$  – коэффициент, учитывающий изменение напряжения питающей сети;  $k_f$  – коэффициент, учитывающий изменение частоты питающей сети; коэффициенты  $k_u$  и  $k_f$  определяются выражениями:

$$k_u = 220^2 / U_T^2; \quad k_f = f_T / 50; \quad (20)$$

где  $U_T$  и  $f_T$  – текущие значения напряжения и частоты питающей сети.

Проведено исследование работы электромагнитного тормоза форсировкой пусковыми токами АД, а также предложено новое техническое решение, которое позволяет осуществлять управление и форсировку срабатывания однообмоточного электромагнита от преобразователя частоты.

**В пятой главе** были проведены экспериментальные исследования с целью проверки адекватности математической модели и подтверждения возможности определения массы поднимаемого груза по частоте вращения вала АД и по току статора. Экспериментальные исследования проводились на натурном образце мостового крана МК-10. В качестве исполнительного двигателя механизма подъема крана использовался АД МТФ 311-6. На рис. 9 представлены экспериментальные зависимости частоты вращения вала двигателя  $n$  и тока статора  $I_1$  от массы поднимаемого груза  $m_2$ .

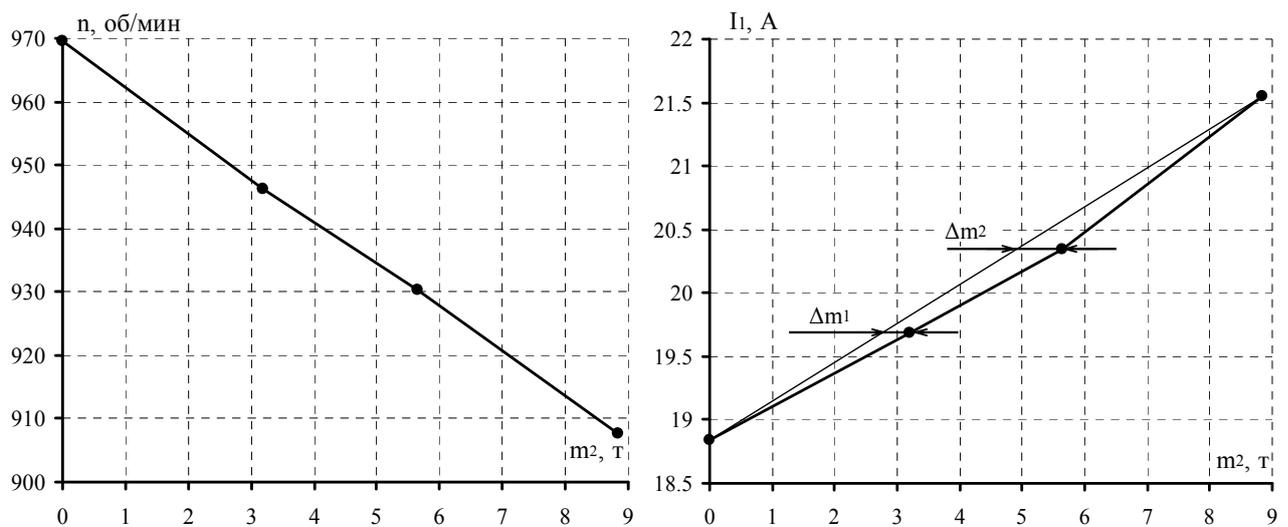


Рис. 9. Экспериментальные зависимости  $n=f(m_2)$  и  $I_1=f(m_2)$

Выявлено, что ошибка определения массы груза  $\Delta m$  по характеристике  $n=f(m_2)$  составляет не более 4 %, а по характеристике  $I_1=f(m_2)$  не более 15 %.

Это обстоятельство позволяет легко осуществить ввод данных зависимостей в память микроконтроллерного ОГ непосредственно на кране путем поочередного поднятия пустой крюковой подвески ( $m_2=0$ ) и всего одного груза известной массы для характеристики  $n=f(m_2)$  и 3-5 грузов для характеристики  $I_1=f(m_2)$  для получения погрешности менее 5 %.

Таким образом, в память ограничителя грузоподъемности вводится линеаризованная или состоящая из отрезков линейных функций зависимость информативного параметра от  $m_2$ . Следует заметить, что ввод характеристики непосредственно на кране позволяет учитывать его индивидуальные особенности (передаточное число механизма, кратность полиспаста, КПД механизма), а также технологический разброс параметров двигателей.

Расхождение измерения массы груза по частоте вращения и ограничителя грузоподъемности «Волна» ОГМК 1-1 не превысило 3%.

При использовании в ОГ характеристики  $n=f(m_2)$  предложен способ определения частоты вращения вала по спектральному анализу (преобразования Фурье) сигнала вибраций станины двигателя. Экспериментально проверка данного способа проведена на двигателе со встроенным тахогенератором с помощью акселерометра (интегральный датчик ускорения ADXL202). Виброграммы сигналов акселерометра  $A_1$  и  $A_2$  приведены на рис. 10. На рис. 11 представлены сигналы тахогенератора  $n_1$  и  $n_2$ . Анализ сигналов виброграмм и тахогенератора показывает, что пику амплитуды колебаний двигателя  $A_1$  частотой 17 Гц соответствует частота вращения вала 17 об/с, а пику амплитуды колебаний  $A_2$  частотой 9 Гц соответствует частота вращения вала 9 об/с. Таким образом, предложенный способ позволяет определить частоту вращения без датчика скорости, что значительно упрощает построение ОГ.

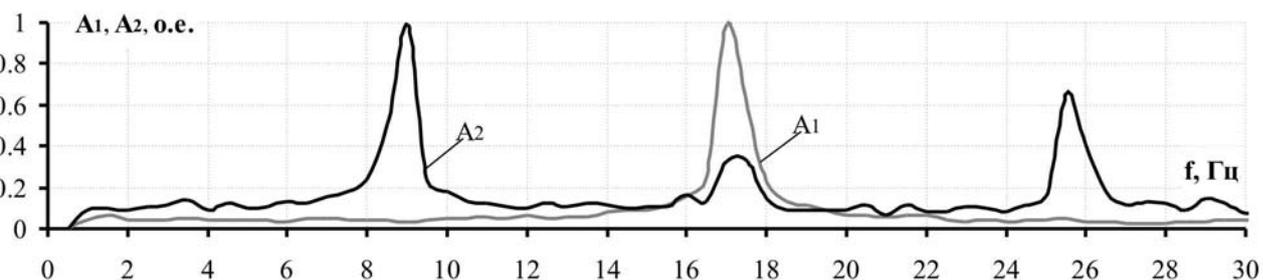


Рис. 10. Виброграмма сигнала акселерометра  $A_1$  при частоте вращения вала двигателя 17 об/с и  $A_2$  при 9 об/с

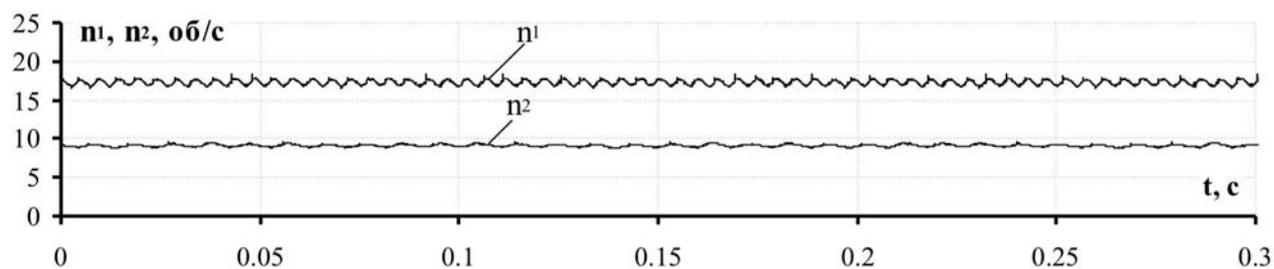


Рис. 11. Временная диаграмма сигнала тахогенератора  $n_1$  при частоте вращения вала двигателя 17 об/с и  $n_2$  при 9 об/с

**В заключении** сформулированы основные научные результаты работы, рекомендации по их применению.

**В приложении** приведены сведения о внедрении результатов работы и разработанном программном продукте.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обеспечение безопасности и живучести АЭП механизма подъема мостового крана можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель АЭП механизма подъема крана мостового типа, учитывающая упругий характер механической части крана, влияние электромагнитного тормоза, насыщение АД, наличие преобразовательного устройства и позволяющая исследовать ЭП, как в нормальных, так и в аварийных режимах работы.

2. Выявлены и обоснованы информативные параметры АД (частота вращения  $n$ , ток статора  $I_1$ , ток ротора  $I_2$ , потребляемая мощность  $P$ ), характеризующие массу поднимаемого груза на крюке, которые могут быть применены при разработке микроконтроллерного ОГ мостового крана.

3. Разработан способ построения микроконтроллерного ОГ на основе косвенных методов измерения массы груза по частоте вращения  $n$ , току статора  $I_1$  и активной мощности  $P$ . Предложенное техническое решение в виду избыточности и независимости каналов измерения информативных параметров повышает достоверность информации и обеспечивает живучесть прибора безопасности как системы, а также позволяет обеспечить безопасность монтажа и технического обслуживания ОГ, так как датчики измеряемых величин устанавливаются в легко доступных местах конструкции мостового крана.

4. Экспериментально доказана возможность использования косвенных методов определения массы груза для построения ОГ кранов мостового типа. Погрешность измерения массы поднимаемого груза по частоте вращения вала приводного двигателя не превышает 4 % при поднятии одного груза известной массы, близкой к номинальной, а по току статора не более 3-5% при подъеме 3-5 грузов при массе груза находящейся в интервале 0,3...1,0 номинальной грузоподъемности.

5. Для устранения ошибки, вносимой отклонениями параметров питающей сети от номинальных, при определении массы поднимаемого груза, рекомендовано введение поправочных коэффициентов по напряжению  $k_u$  и по частоте  $k_f$  питающей сети.

6. Предложен способ определения частоты вращения по виброграммам станины асинхронного двигателя без датчика скорости, позволяющий определять с помощью акселерометра частоту вращения вала АД и вычислять массу поднимаемого груза, а также непрерывно вести диагностику подшипникового узла приводного двигателя и выявить начало разрушения металлоконструкции крана.

7. Предложен способ управления и обеспечения живучести трехфазного частотно-регулируемого АЭП в аварийном двухфазном режиме за счет активизации алгоритма восстановления, позволяющий также обеспечить пуск АД в заданном направлении. Броски тока в обеих фазах в момент переключения структуры ЭП существенно зависят от времени диагностики аварийной ситуации, которое должно не более 10 мс.

8. Разработана схема электромагнитного тормоза форсированного пуска для АЭП механизма подъема крана мостового типа с улучшенными массогабаритными показателями, повышенной надежностью и технологичностью производства.

### **Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Повышение живучести частотно-регулируемого асинхронного электропривода // Известия ТПУ, №7, 2005 – Томск: Изд-во ТПУ, 2005, С. 143-148.

2. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Живучесть частотно-регулируемого асинхронного электропривода // Изв. Вузов. Электромеханика, №3, 2006, С. 41-45.

3. Дементьев Ю.Н., Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Асинхронный электропривод кранового механизма с микроконтроллерным ограничителем грузоподъемности // Изв. Вузов. Электромеханика, №3, 2006, С.: 49-53.

4. Баранов П.Р., Дементьев Ю.Н., Однокопылов И.Г. Математическая модель асинхронного двигателя со встроенным электромагнитным тормозным устройством // Известия ТПУ, №1, 2006–Томск: Изд-во ТПУ, 2006, С.: 159-163.

5. Ю.А. Орлов, Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов, Д.П. Столяров. Система защиты мостового крана на основе мониторинга параметров электропривода механизма подъема // Известия ТПУ, № 4, 2008 – Томск: Изд-во ТПУ, 2008, С. 119-124.

### **Другие научные публикации по теме диссертации**

6. Орлов Д.Ю., Однокопылов И.Г. Ограничитель грузоподъемности крана мостового типа по статическому моменту АД механизма подъема // IX Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 7-11 апреля 2003 г. Труды. В 2-х т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003.– Т. 1.– С. 282-284.

7. Орлов Д.Ю., Орлов Ю.А., Однокопылов И.Г., Дементьев Ю.Н. Способ определения статического момента асинхронного двигателя для ограничения грузоподъемности мостового крана // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XI Бенардосовские чтения) – Иваново: 2003. – С. 96.

8. Орлов Д.Ю., Однокопылов И.Г. Микроконтроллерный датчик статического момента асинхронного двигателя механизма подъема для ограничителя грузоподъемности крана мостового типа // Микропроцессорные,

аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 27 фев. 2004 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004.– С. 24-27.

9. Баклин В.С., Гимпельс А.С., Однокопылов И.Г. Учет насыщения и вытеснения тока в расчетах пусковых характеристик асинхронного двигателя // XI Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», 29 марта - 2 апреля 2005 г. Труды. В 2-х т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005.– Т. 1.– С. 347-349.

10. Однокопылов И.Г. Математическая модель асинхронного двигателя со встроенным электромагнитным приводом тормозного устройства // Научно-техническое творчество студентов вузов: Матер. Всерос. смотр-конкурса науч.-техн. творчества студ. вузов «Эврика-2005» / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. Гос. Техн. Ун-т (НПИ).–Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005.–Ч.1.–418 с.

11. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.

12. Однокопылов И.Г. Математическая модель асинхронного двигателя со встроенным электромагнитным приводом тормозного устройства // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ти частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Часть 7. – 228 с.

13. Однокопылов И.Г. Крановый асинхронный электропривод с микроконтроллерным ограничителем грузоподъемности // Всероссийская конференция – конкурс инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению программы «Энергетика и энергосбережение», 26-29 сентября 2006г. Труды конференции.–Томск: Изд-во ТПУ, 2006.–С.23-28.

14. Odnokopylov I.G. Survivability of variable-frequency asynchronous drive // The twelfth International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies» (MTT'2006), march 27-31, 2006, Tomsk, Tomsk Polytechnic University, P. 74-77.

15. Дементьев Ю.Н., Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Ограничитель грузоподъемности электрических кранов на основе косвенных методов измерения массы груза // Сборник трудов V международной (XVI Всероссийской) научной конференции: 18-21 сентября 2007 г. – Санкт Петербург, 2007, С. 519-522.

16. Dementev Yu.N., Odnokopylov G.I, Odnokopylov I.G Carrying capacity limiter of the electric crane// European journal of natural history, № 1, 2008. – P. 99.

17. Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов. Программа расчета переходных процессов кранового асинхронного электропривода с ограничителем грузоподъемности // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 20076106163.

18. Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов. Программа расчета переходных процессов асинхронного электропривода в неполнофазных

и аварийных режимах работы // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611993.

### Патенты

19. Пат. № 61700 на ПМ RU, МПК В66С 23/90. Ограничитель грузоподъемности электрического крана / Г.И. Однокопылов, Ю.Н.Дементьев, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов, – Оpubл. 10.03.2007 в Бюл. № 7.

20. Пат. № 67354 на ПМ RU, МПК H02P 5/408. Асинхронный электропривод со свойством живучести/ Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов. -№ 2007114355; Заявл. 16.04.2007; Оpubл.10.10.2007 Бюл. № 28.

21. Пат. № 2326480 на изобретение RU, МПК H02H 7/09, H02H 7/12, Способ управления и обеспечения живучести трёхфазного асинхронного двигателя / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, – № 2007112527; заявл. 04.04.2007 г.; опубл. 10.06.2008; Бюл. №16.

22. Пат. № 73322 на ПМ RU, МПК В66С23/90. Устройство защиты крана от перегрузки / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, Д.П. Столяров. – № 2008100800; Заявл. 09.01.2008; Оpubл. 20.05.2008; Бюл. № 14.

23. Пат. № 74378 на ПМ RU, МПК В66С23/90. Устройство защиты и ограничения грузоподъемности электрического крана / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, Д.П. Столяров. – № 2008101187; Заявл. 09.01.2008; Оpubл. 27.06.2008; Бюл. № 18.

24. Пат. № 69347 на ПМ RU, МПК H02K 7/102. Электромагнитный привод тормоза форсированного пуска для электродвигателя / П.Р. Баранов, И.Г. Однокопылов. – № 2007118998; заявл. 21.05.2007; Оpubл. 10.12.2007 Бюл. № 34.

25. Пат. № 2331572 на изобретение RU, МПК В66С23/90, В66С23/88 . Способ ограничения грузоподъемности электрического крана / Г.И. Однокопылов, Д.Ю. Дементьев, Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов.– № 2006147162; Заявл. 28.12.2006; Оpubл. 20.08.2008; Бюл.№ 23.

26. Решение о выдаче патента на изобретение от 29.09.2008, МПК В66С23/90, В66С13/16. Способ ограничения грузоподъемности крана мостового типа / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, Д.П. Столяров. – №2007141135; Заявл. 06.11.2007.

### Личный вклад автора

Автором единолично написано четыре работы [10, 12-14]. В работах, написанных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: математическое моделирование кранового электропривода [4, 6-9, 22-24] (70 %), разработки компьютерной программы на основе математической модели [17, 18] (90 %), выявление информативных параметров кранового АЭП, характеризующих массу груза [3, 5, 15, 16, 19, 25, 26 ] (40 %), разработка методики обеспечения живучести кранового АЭП [1, 2, 11, 20, 21] (60 %).