

На правах рукописи

Шишков Александр Николаевич

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КРАНОВЫХ
МЕХАНИЗМОВ С ДРОССЕЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ
СКОРОСТИ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск
2007

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Южно-Уральский государственный университет.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Гафиятуллин Рафаиз Хазеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Воронин Сергей Григорьевич;
доктор технических наук,
профессор Сарваров Анвар Сабулханович.

Ведущая организация – Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), г. Новочеркасск.

Защита состоится 26 октября 2007 г., в 10⁰⁰ часов, в ауд. 1013 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «___» сентября 2007 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, диссертационный совет Д212.298.05, тел./факс 8 (351) 267-96-90, E-mail: shan1982@mail.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена широким внедрением асинхронных электроприводов, особенно для крановых механизмов, с включением в роторную цепь дросселя с регулятором или без него. Для таких приводов широко используется название дроссельный асинхронный электропривод.

В этом направлении работает ряд организаций: Горнозаводское объединение (г. Челябинск), Липецкий металлургический завод и другие. Горнозаводское объединение (ГЗО) за период с 1996 – 2006 г. установило по России и странам ближнего зарубежья более 5500 пусковых дросселей. В настоящее время ГЗО работает с 22 крановыми заводами по России и странам ближнего зарубежья: Кировский завод железнодорожных кранов, Нязепетровский завод башенных кранов, Харьковский завод ПТО, завод “НКМЗ” г. Краматорск, Павлодарский крановый завод, Ташкентский завод “Подъемник” и другие.

Интерес к этим решениям, несмотря на потери энергии скольжения, не снижается, так как получение низких посадочных скоростей при выборе слабины канатов, сверхнизких скоростей для точной остановки крановых механизмов с асинхронными электродвигателями остаётся актуальной задачей. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы могут быть применены не во всех случаях, так как этому препятствуют агрессивные условия окружающей среды, ограничение по температурным режимам, необходимость высокой квалификации обслуживающего персонала и высокой стоимостью преобразователей частоты.

Большой вклад в исследование дроссельного электропривода внесли специалисты Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), занимаясь теоретическим расчетом дросселей и разработкой регулируемых дроссельных электроприводов.

Несмотря на большой объем проведенных работ в области дроссельного электропривода, вопросы по выбору мощности двигателя как для дроссельного нерегулируемого электропривода, так и для дроссельного регулируемого электропривода, а также вопросы расширения диапазона регулирования скорости привода не освещены.

Целью работы является разработка методик выбора мощности электродвигателя и создание системы управления дроссельным электроприводом с улучшенными регулировочными характеристиками для крановых механизмов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

– анализ особенностей режимов работы и характеристик нерегулируемых и регулируемых дроссельных электроприводов крановых механизмов и разработка единой методики оценки нагрева электродвигателей;

– создание математической модели дроссельного электропривода с регулятором скорости, обеспечивающий расчет статических и динамических характеристик дроссельного электропривода с учетом потерь мощности в статорной и роторной цепях;

– разработка на базе созданной математической модели инженерной методики расчета допустимой мощности электродвигателя дроссельного асинхронного нерегулируемого электропривода;

– теоретические и экспериментальные исследования нагрева электродвигателя регулируемого дроссельного электропривода с целью разработки рекомендаций по расчету его допустимой мощности;

– разработка и экспериментальное исследование новых структур регуляторов скорости, повышающих диапазон регулирования скорости дроссельных асинхронных электроприводов;

– разработка и экспериментальные исследования системы автоматизации спуска грузов с учетом непостоянства коэффициента трения кранового механизма подъема.

Научное значение результатов работы

1. Впервые для дроссельного электропривода создана методика и математическая модель для расчета нагрева и выбора мощности исполнительного электродвигателя для регулируемых и нерегулируемых электроприводов, учитывающая изменения параметров дросселя в цепи ротора в процессе работы электропривода.

2. На основе теоретических и экспериментальных исследований температурных режимов работы исполнительного электродвигателя впервые определена область применения нерегулируемых и регулируемых дроссельных электроприводов.

3. Разработаны и экспериментально исследованы новые принципы построения тиристорных регуляторов, включаемых в цепь ротора двигателя, обеспечивающих расширение диапазона регулирования скорости дроссельного электропривода.

4. Разработан алгоритм и на его основе создана новая система автоматизации управления спусковыми режимами работы дроссельного электропривода крановых механизмов подъема.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Математическая модель и программа расчета электромеханических параметров и характеристик асинхронного электропривода с дросселем в роторной цепи.

2. Метод повышения допустимой мощности электродвигателя для регулируемого асинхронного электропривода с дросселем в роторной цепи.

3. Принципы построения регуляторов скорости, повышающих диапазон регулирования скорости дроссельного электропривода.

4. Алгоритм и структура системы автоматизации управления спуском грузов подъемных механизмов.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается сопоставлением расчетов, полученных с помощью математической модели и реальных испытаний электропривода.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– разработана программа проверочного расчета мощности исполнительного электродвигателя, а также проведены исследования статических и динамических

характеристик с учетом реальных параметров как нерегулируемых, так и регулируемых дроссельных электроприводов;

- разработана методика расчета допускаемой по условиям нагрева мощности электродвигателя регулируемых и нерегулируемых дроссельных электроприводов;

- предложена схема силовой части дроссельного электропривода на основе последовательно включенного активного сопротивления и дросселя в цепи ротора, обеспечивающая повышение допускаемой по условиям нагрева мощности электродвигателя;

- разработаны и внедрены схемы дроссельного электропривода с предложенными новыми тиристорными регуляторами в роторной цепи, обеспечивающие расширение диапазона регулирования (патент РФ №2300169);

- предложена и технически реализована на действующем объекте система автоматизации спусковых режимов работы кранового механизма подъема.

Личный вклад автора:

- создана математическая модель и программа расчета электромеханических параметров и характеристик дроссельного электропривода;

- разработана методика расчета допускаемой по условиям нагрева мощности электродвигателя регулируемых и нерегулируемых дроссельных электроприводов;

- разработан метод повышения допускаемой мощности по условиям нагрева электродвигателя для регулируемого дроссельного электропривода;

- разработаны принципы построения регуляторов скорости, повышающие диапазон регулирования скорости электропривода;

- разработан алгоритм и структура системы автоматизации управления спуском грузов подъемных механизмов.

Апробация работы. Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- ежегодных научно–практических конференциях Южно–Уральского государственного университета (г. Челябинск, ЮУрГУ, 2004 – 2007 гг.);

- Международной конференции «Перспективы рынка подъемных сооружений в контексте интеграционных процессов ЕЭП, ВТО и ЕС» (г. Одесса, Украина, 20–23 мая 2005 г.);

- Международной четырнадцатой научно–технической конференции «Электроприводы переменного тока» (г. Екатеринбург, УГТУ–УПИ, 2007);

- Международной одиннадцатой конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», МКЭЭЭ–2006 (ИСЕЕЕ–2006), (18–23 сентября 2006 г. Крым, г. Алушта).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ в периодических изданиях, в сборниках научных трудов и в сборниках тезисов докладов научно-технических конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 126 страниц, заключения, списка литературы из 155 на-

именований, одного приложения. Общий объем диссертации 140 страниц, включая 63 рисунка и 18 таблиц.

Автор выражает благодарность научным консультантам Борису Александру Михайловичу и Драчеву Геннадию Ивановичу за неоценимую помощь при работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрен дроссель как средство формирования пуско-тормозных режимов и как средство регулирования скорости. Был выполнен обзор методик выбора электродвигателя для электроприводов крановых механизмов. В результате было определено, что отсутствуют методики оценки энергетических показателей дроссельных электроприводов, необходимых при выборе электродвигателей для механизмов с повторно-кратковременным режимом работы. Применяемые методики выбора электродвигателей для указанных условий невозможно использовать для дроссельных электроприводов без дополнительных исследований.

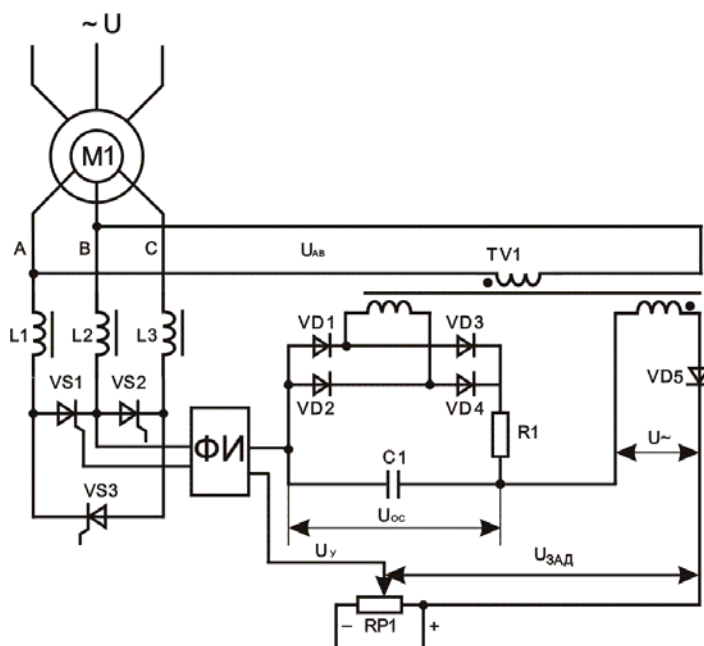


Рис. 1. Схема дроссельного регулируемого электропривода

Во второй главе рассчитываются характеристики асинхронного электропривода с дросселем $L1...L3$ и регулятором скорости в роторной цепи, схема которого приведена на рис.1 (на схеме показано управление тиристором VS1, управление остальными тиристорами аналогичное).

При расчетах были приняты следующие допущения:

- машина имеет гладкий воздушный зазор, все параметры ее линейны, а напряжения на выводах синусоидальны;
- каждый тиристор в фазах роторной

цепи заменен на резистор сопротивлением R_t . Это сопротивление, в зависимости от того, открыт тиристор или закрыт, принимает значение:

$r_t = 0,001 \text{ Ом}$ (тиристор открыт);

$r_t = 100 \text{ кОм}$ (тиристор закрыт).

Схема замещения с учетом допущений представлена на рис. 2.

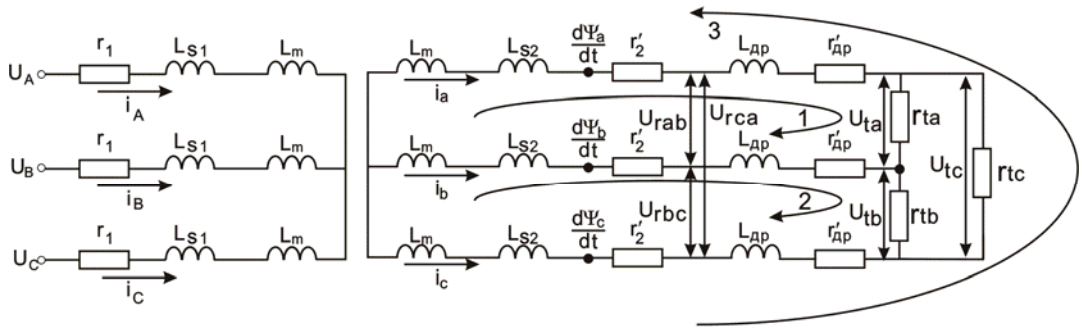


Рис. 2. Схема замещения с учетом допущений

Для схемы замещения записывается система уравнений для статора и ротора:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_A}{dt} = u_A - i_A \cdot r_1, \\ \frac{d\Psi_B}{dt} = u_B - i_B \cdot r_1, \\ \frac{d\Psi_C}{dt} = u_C - i_C \cdot r_1, \\ \frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} = i_a \cdot (r'_2 + r'_{dp}) + L_{dp} \cdot \frac{di_a}{dt} + i_{tb} \cdot r_{ta} - i_b \cdot (r'_2 + r'_{dp}) - L_{dp} \cdot \frac{di_b}{dt} - i_{tc} \cdot r_{ta}, \\ \frac{d\Psi_b}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} = i_b \cdot (r'_2 + r'_{dp}) + L_{dp} \cdot \frac{di_b}{dt} + i_{tb} \cdot r_{tb} - i_c \cdot (r'_2 + r'_{dp}) - L_{dp} \cdot \frac{di_c}{dt} - i_{ta} \cdot r_{ta}, \\ \frac{d\Psi_c}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} = i_c \cdot (r'_2 + r'_{dp}) + L_{dp} \cdot \frac{di_c}{dt} + i_{tc} \cdot r_{tc} - i_a \cdot (r'_2 + r'_{dp}) - L_{dp} \cdot \frac{di_a}{dt} - i_{tb} \cdot r_{tb}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где u_A, u_B, u_C – мгновенные значения напряжений трех фаз статора;

$\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$ – мгновенные значения потокосцеплений фаз статора и ротора соответственно;

$r_1 = r_A = r_B = r_C$ – активное сопротивление фазы обмотки статора;

$r_2 = r_a = r_b = r_c$ – активное сопротивление фазы обмотки ротора;

$r'_2 = r_2 \cdot k_e^2$ – приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора;

$r'_{dp} = r_{dp} \cdot k_e^2$ – приведенное активное сопротивление дросселя;

L_{dp} – приведенная индуктивность обмотки дросселя;

Решение системы дифференциальных уравнений осуществляется методом Рунге Кутты 4 порядка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_A = i_A \cdot L_1 + i_B \cdot M_{AB} + i_C \cdot M_{AC} + i_a \cdot M_{Aa} + i_b \cdot M_{Ab} + i_c \cdot M_{Ac}, \\ \Psi_B = i_A \cdot M_{BA} + i_B \cdot L_1 + i_C \cdot M_{BC} + i_a \cdot M_{Ba} + i_b \cdot M_{Bb} + i_c \cdot M_{Bc}, \\ \Psi_C = i_A \cdot M_{CA} + i_B \cdot M_{CB} + i_C \cdot L_1 + i_a \cdot M_{Ca} + i_b \cdot M_{Cb} + i_c \cdot M_{Cc}, \\ \Psi_a - \Psi_b = i_A \cdot (M_{aA} - M_{bA}) + i_B \cdot (M_{aB} - M_{bB}) + i_C \cdot (M_{aC} - M_{bC}) + \\ + i_a \cdot (L_2 - M_{ba}) + i_b \cdot (M_{ab} - L_2) + i_c \cdot (M_{ac} - M_{bc}), \\ \Psi_b - \Psi_c = i_A \cdot (M_{bA} - M_{cA}) + i_B \cdot (M_{bB} - M_{cB}) + i_C \cdot (M_{bC} - M_{cC}) + \\ + i_a \cdot (M_{ba} - M_{ca}) + i_b \cdot (L_2 - M_{cb}) + i_c \cdot (M_{bc} - L_2), \\ \Psi_c - \Psi_a = i_A \cdot (M_{cA} - M_{aA}) + i_B \cdot (M_{cB} - M_{aB}) + i_C \cdot (M_{cC} - M_{aC}) + \\ + i_a \cdot (M_{ca} - L_2) + i_b \cdot (M_{cb} - M_{ab}) + i_c \cdot (L_2 - M_{ac}). \end{array} \right. \quad (2)$$

Токи, протекающие через тиристор, находят по законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} i_{tra} = i_a + i_{trc}, \\ i_{trb} = i_b + i_{tra}, \\ i_{tra} \cdot r_{ta} + i_{trb} \cdot r_{tb} + i_{trc} \cdot r_{tc} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $M_{AB} = M_{AC} = M_{BA} = M_{BC} = M_{CA} = M_{CB} = M_1$ – взаимные индуктивности между любыми двумя обмотками статора;

$M_{ab} = M_{ac} = M_{ba} = M_{bc} = M_{ca} = M_{cb} = M_2$ – взаимные индуктивности между любыми двумя обмотками ротора;

$M_{Aa}, M_{Ab}, M_{Ac}, M_{Ba}, M_{Bb}, M_{Bc}, M_{Ca}, M_{Cb}, M_{Cc}$ – взаимные индуктивности между соответствующими фазами статора и ротора;

$M_{aA}, M_{aB}, M_{aC}, M_{bA}, M_{bB}, M_{bC}, M_{cA}, M_{cB}, M_{cC}$ – взаимные индуктивности между соответствующими фазами ротора и статора;

L_1, L_2 – индуктивности обмоток статора и ротора соответственно.

Для решения уравнений систем 2 и 3 используется метод Крамера. Определяются токи $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ и токи, протекающие через тиристоры $i_{tra}, i_{trb}, i_{trc}$.

Мгновенные значения напряжения на кольцах каждой фазы ротора:

$$\begin{cases} U_{rab} = \frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} - i_a \cdot r'_2 + i_b \cdot r'_2, \\ U_{rbc} = \frac{d\Psi_b}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} - i_b \cdot r'_2 + i_c \cdot r'_2, \\ U_{rca} = \frac{d\Psi_c}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} - i_c \cdot r'_2 + i_a \cdot r'_2. \end{cases} \quad (4)$$

Напряжения управления каждым тиристором:

$$\begin{cases} U_{ya} = \left(k_{pot} \cdot U_{OC} + \frac{U_{rab}}{k_{tr2}} - U_{3AD} \right), \\ U_{yb} = \left(k_{pot} \cdot U_{OC} + \frac{U_{rbc}}{k_{tr2}} - U_{3AD} \right), \\ U_{yc} = \left(k_{pot} \cdot U_{OC} + \frac{U_{rca}}{k_{tr2}} - U_{3AD} \right), \end{cases} \quad (5)$$

где k_{tr2} – коэффициент трансформации понижающего трансформатора TV1 цепи управления тиристорами (рис. 1);

k_{pot} – коэффициент потенциометра задания;

U_{OC} – напряжение обратной связи;

U_{3AD} – напряжение задания.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется по формуле

$$M = \frac{2 \cdot p \cdot ((\Psi_C - \Psi_B) \cdot i_A + (\Psi_A - \Psi_C) \cdot i_B + (\Psi_B - \Psi_C) \cdot i_C)}{3 \cdot \sqrt{3}} \quad (6)$$

Экспериментальные и рассчитанные по данной математической модели механические характеристики электропривода для двигателя МТФ 111-6 при различных напряжениях задания U_{3AD} представлены на рис. 3.

Погрешность расчетов составляет $\frac{M_2 - M_1}{M_H} \leq 10\%$. Разработанную математическую модель можно рекомендовать для расчетов дроссельного регулируемого асинхронного электропривода.

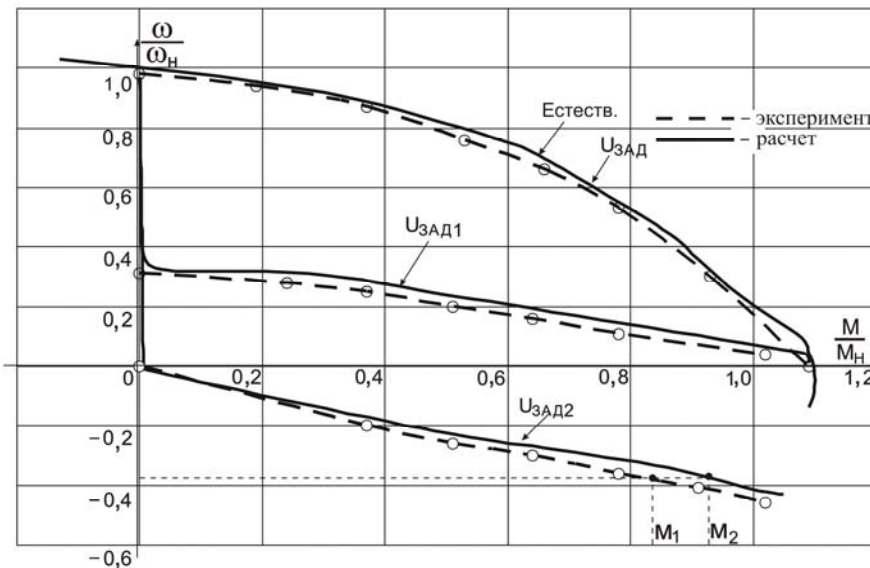


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные механические характеристики электропривода

Эту же модель можно использовать для нерегулируемых дроссельных электроприводов, если тиристоры исключить и соединить в звезду концы обмоток дросселя.

В третьей главе предлагается методика оценки нагрева электродвигателя нерегулируемого дроссельного электропривода, работающего без четкого циклического режима работы.

Идея заключается в

следующем:

а) выбирается усредненный режим работы:

- количество циклов за час обычно находится в интервале от 6 до 60, принимается равным 30;

- продолжительность цикла принимается 120 с;

- учитывая, что основной продолжительностью работы является режим ПВ = 40 %, то время работы в цикле принимается равным 48 с;

- принимается число включений равным 9. Время одного включения

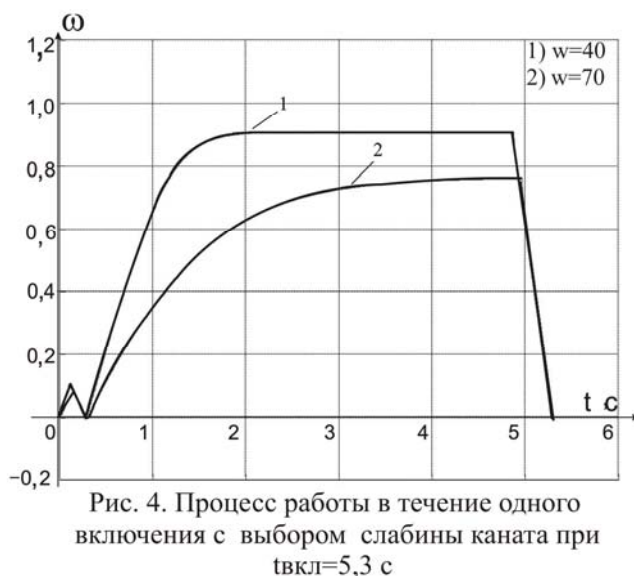


Рис. 4. Процесс работы в течение одного включения с выбором слабины каната при $t_{вкл}=5,3$ с

5,3 с (рис. 4).

На первом участке происходит выбор слабины канатов (в толчковом режиме). Далее идет разгон двигателя до установившейся скорости, работа в установившемся режиме и торможение противовключением. На все указанные операции уходит 5,3 с. Двигатель при этом работает с номинальной нагрузкой;

б) для принятого усредненного варианта одного включения (пуск, работа на установившейся скорости и торможение), рассчитываются потери энергии в статоре, роторе и суммарные для конкретного рассматриваемого двигателя за одно включение;

в) по каталожным данным рассматриваемого электродвигателя рассчитываются допускаемые потери $P_{\text{доп}}$ в двигателе при его непрерывной работе с номинальной нагрузкой при ПВ = 40 %;

г) рассчитывается число включений в час, при котором потери энергии в двигателе будут равны потерям допускаемым;

д) так как число включений известно, то определяется время пауз между включениями и определяется полученная допустимая продолжительность включения ПВ % с учетом изменения условий охлаждения двигателя при пуске/торможении и паузах, и эквивалентный по нагреву ток при полученном ПВ.

е) если рассчитанное ПВ отличается от ПВ=40%, то снижается в расчете значение статического момента таким образом, чтобы значения расчетного ПВ получить равным 40 %. Далее по формуле (7) определяется, на сколько уменьшается допустимая мощность на валу:

$$\Delta_{\text{др}} = \frac{|P_{\text{H40}} - P_{\text{ВР}}|}{P_{\text{H40}}} = \frac{|\omega_{\text{H40}} \cdot M_{\text{H40}} - \omega_{\text{ВР}} \cdot M_{\text{ВР}}|}{\omega_{\text{H40}} \cdot M_{\text{H40}}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{ВР}}$ – расчетное значение мощности при уменьшении статического момента;

з) при принятом усредненном режиме двигатель может не пройти по нагреву и при реостатном управлении (при пуске в несколько ступеней). Поэтому сравнение снижение допустимой мощности нужно проводить не с каталожной мощностью при ПВ = 40%, а с допустимой мощностью при реостатном управлении. Для этого расчеты по пунктам г), д) и е) проводятся при управлении реостатом.

ж) рассчитываем допустимую мощность при дроссельном управлении для данного двигателя по формуле:

$$P_{\text{допдв}} = P_{\text{H40}} \cdot (1 - \Delta_{\text{др}} - \Delta_{\text{р}}). \quad (8)$$

Предлагаемая методика проверки допустимой из условий нагрева мощности электродвигателя демонстрируется на примере двигателя 4MT200LA6. Было получено, что при одних и тех же условиях работы допустимая мощность электродвигателя при использовании активных сопротивлений при выбранном цикле снижается на 15 %, а при использовании дросселя на 40 %. Т.е. допустимая мощность двигателя при включении дросселя снижается по сравнению с реостатным управлением снижается на 25 %. Этот результат следует учитывать при использо-

вании дросселя в существующих электроприводах и при предварительном выборе электродвигателя для конкретного механизма.

Включение дросселя связано с уменьшением $\cos\varphi$ и поэтому снижение допустимой мощности неизбежно. В данном случае возможны два варианта использования данного дроссельного электродвигателя.

Первый вариант – взять электродвигатель большей мощности, имея в виду, что снижение допустимой мощности при дроссельном управлении составляет порядка 25%. Разумеется, что он должен быть снова проверен на нагрев. При этом сохраняется производительность механизма.

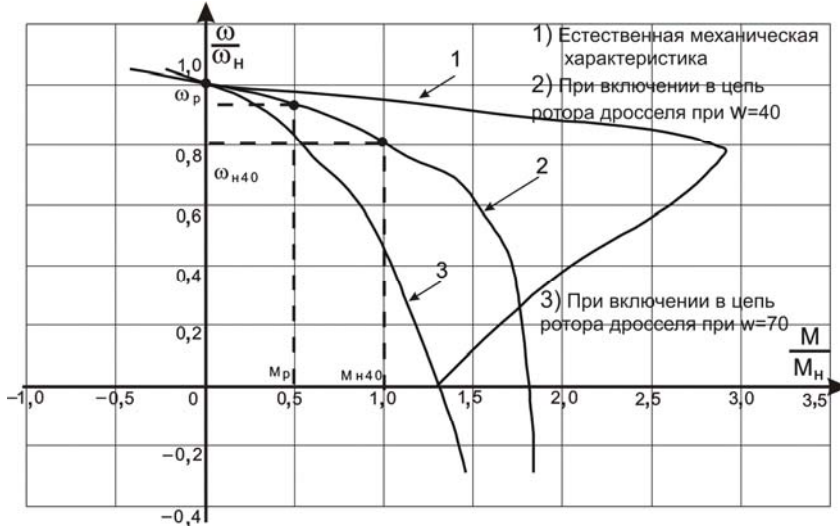


Рис. 5. Механические характеристики электропривода

Второй вариант – увеличение числа витков дросселя. При изменении числа витков, которое обычно используется при наладке привода, происходит изменение пускового момента (рис. 5), изменение установившейся скорости перемещаемого груза, но уменьшаются токи двигателя, а, следовательно, и его нагрев. При $w = 70$ витков дросселя было установлено, что рассматриваемый в примере двигатель не перегревается при принятом усредненном режиме работы. Но следует учесть, что при этом происходит снижение пусковых моментов (рис. 5), увеличивается время пуска и торможения, снижение установившейся скорости и в итоге снижение производительности крана.

В конкретном случае проектировщик принимает решение по использованию того или иного варианта.

В четвёртой главе для оценки энергетических возможностей дроссельного регулируемого электропривода был проведен эксперимент, при котором сопоставили нагрев обмоток электродвигателя при использовании дроссельного и реостатного регулируемого асинхронного электропривода. Эксперимент показал, что нагрев двигателя при дроссельном регулировании значительно выше, чем при реостатном, особенно при работе в режиме спуска груза в крановых механизмах подъема.

Как и в предыдущем разделе, проводилось сопоставление потерь в электродвигателе при разных способах регулирования, но при одинаковых заданных режимах работы. Расчеты проводились для электродвигателя 4MT200LA6 по разработанной модели дроссельного электропривода.

Для реостатного регулирования скорости были проведены следующие расчеты:– расчет потерь энергии в статоре, роторе и суммарные за 1 с в установившемся режиме при введении в цепь ротора различных значений добавочных сопротивлений, но при сохранении момента нагрузки, равного номинальному.

Характеристики потерь представлены на рис. 6 а.

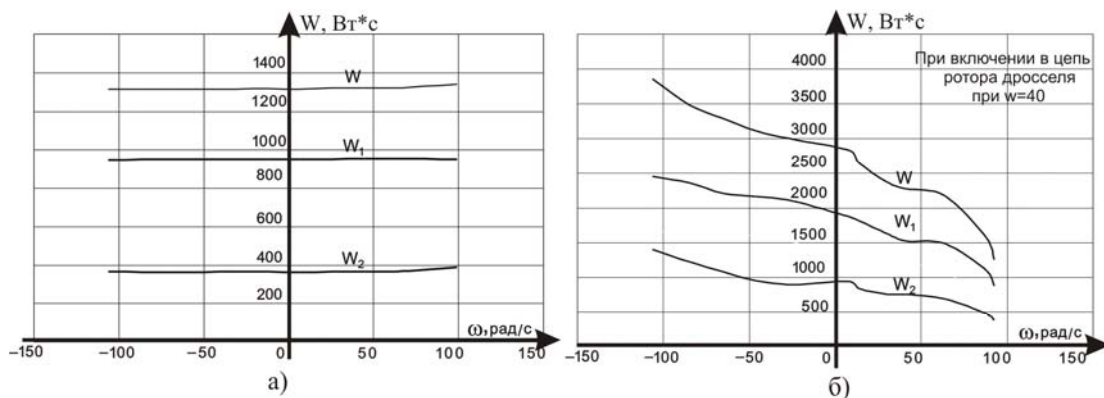


Рис. 6. Изменение потерь энергии в электродвигателе при включении в цепь ротора сопротивления (а) и дросселя (б)

Для дроссельного регулирования были проведены аналогичные расчеты при включении дросселя с числом витков $w = 40$. При указанном числе витков рассчитывались потери за 1 с при разных напряжениях задания $U_{\text{ЗАД}}$ в установившемся режиме работы с неизменной нагрузкой равной номинальному моменту двигателя. Каждому $U_{\text{ЗАД}}$ соответствовала своя установившаяся скорость (рис. 6 б).

Сопоставление характеристик рис. 6 а с характеристиками рис. 6 б показывает:

- потери при дроссельном регулировании скорости существенно больше, чем при реостатном регулировании при одинаковых режимах работы. При дросселе с числом витков 40 в режиме торможения противовключением при $\omega = -106$ рад/с мощность потерь составила $W = 3857$ Вт*с, что в 2,9 раза больше, чем при реостатном регулировании;

- при дроссельном регулировании потери в двигателе существенно увеличиваются при неизменном статическом моменте при снижении скорости. При дросселе с числом витков $w = 40$ изменение скорости от $\omega = 93$ рад/с двигательного режима до скорости $\omega = -106$ рад/с приводит к увеличению потерь в двигателе в 3 раза. Это объясняется увеличением индуктивной составляющей тока ротора, вызванного увеличением частоты тока ротора электродвигателя, при снижении скорости и при переходе в режим торможения противовключением.

Анализ показывает, что для сохранения допускаемой мощности механизма и длительной работы двигателя на пониженной скорости мощность установленного электродвигателя следует увеличить в 2–3 раза. Поэтому может идти речь о применении регулируемого дроссельного электропривода только для установок, которые требуют кратковременного существенного снижения скорости, а основная работа осуществляется на максимальных скоростях.

Для снижения потерь в электродвигателе необходимо уменьшать ток электродвигателя и в частности его индуктивной составляющей по возможности при допустимом снижении момента. Возможны два варианта достижения поставленной задачи:

- увеличение числа витков обмотки дросселя, включенного в цепь ротора;

– включение последовательно с обмоткой дросселя активных сопротивлений.

Влияние изменения числа витков дросселя на механические характеристики электропривода при дросселе с $w = 40$ и с $w = 70$ витков представлено на рис. 7.

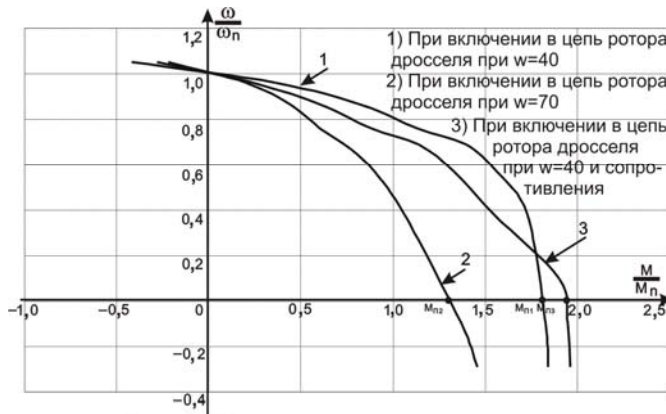


Рис. 7. Механические характеристики

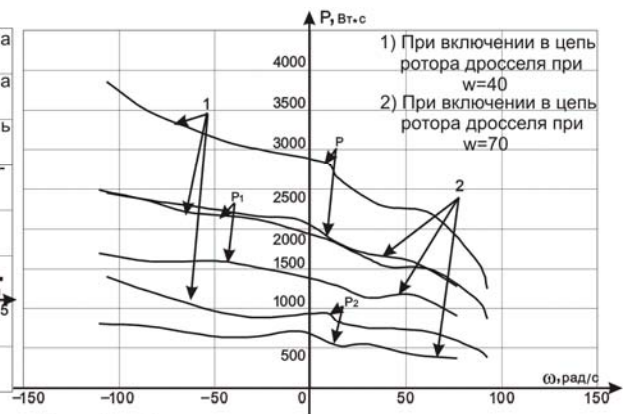


Рис. 8. Изменение потерь в электродвигателе при дроссельном регулировании

Увеличение числа витков обмотки дросселя с 40 до 70 витков приводит к уменьшению потерь в двигателе при $\omega = -106$ рад/с в 1,5 раза (рис. 8). Следует помнить, что увеличение числа витков дросселя приводит к уменьшению пускового момента электродвигателя (рис. 7), к снижению динамических свойств электропривода, и к уменьшению скорости электропривода на естественной дроссельной характеристике и к снижению производительности механизма с таким электроприводом.

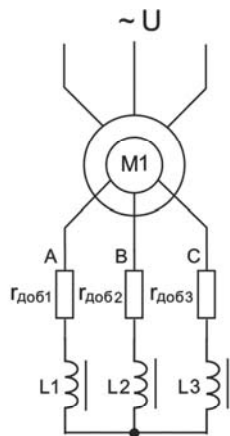


Рис. 9. Схема включения дросселя и добавочного сопротивления

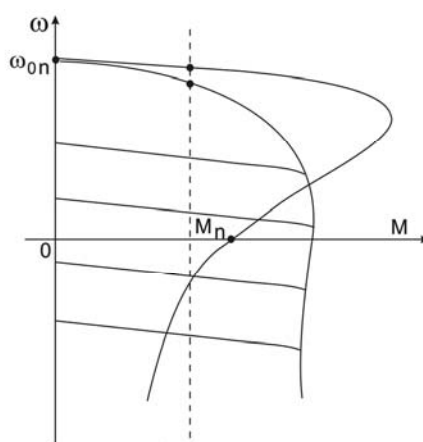


Рис. 10. Механические характеристики электропривода

Второй вариант снижения потерь в электродвигателе предпочтительнее. При увеличении числа витков дросселя происходит включение комплексного сопротивления в роторную цепь, большую долю в котором составляет индуктивное сопротивление. При включении активных сопротивлений $r_{доб}$ последовательно с каждой обмоткой дросселя не только уменьшается ток роторной цепи, но и повышается его активная составляющая, т.е. увеличивается $\cos\phi$ роторной цепи.

Включение последовательно в цепь ротора дросселя и сопротивления показано на рис. 9.

При включении последовательно с дросселем активного сопротивления можно подобрать его значение таким, чтобы при пуске был максимальный момент (рис.10). Для его расчета необходимо найти сопротивление $r_{доб}$, при котором механическая характеристика имеет экстремум при $\omega = 0$.

Была получена формула расчета значения $r_{\text{доп}}$, при котором будет максимальный пусковой момент:

$$r_{\text{доп}} = r_2 + z_{\text{др}} \cdot \cos \varphi_{\text{др}} - x_2 - z_{\text{др}} \cdot \sin \varphi_{\text{др}}. \quad (9)$$

Для рассматриваемого двигателя 4MT200LA6 расчетное значение добавочного сопротивления для дросселя с $w = 40$ витков составляет $r_{\text{доп}} = 0,1$ Ом. Механическая характеристика при включении в цепь ротора дросселя и добавочного сопротивления $r_{\text{доп}} = 0,1$ Ом представлена на рис. 7, (характеристика 3).

На рис. 11 а представлены расчетные значения потерь энергии при включении в цепь ротора дросселя при числе витков $w = 40$ и добавочного сопротивления.

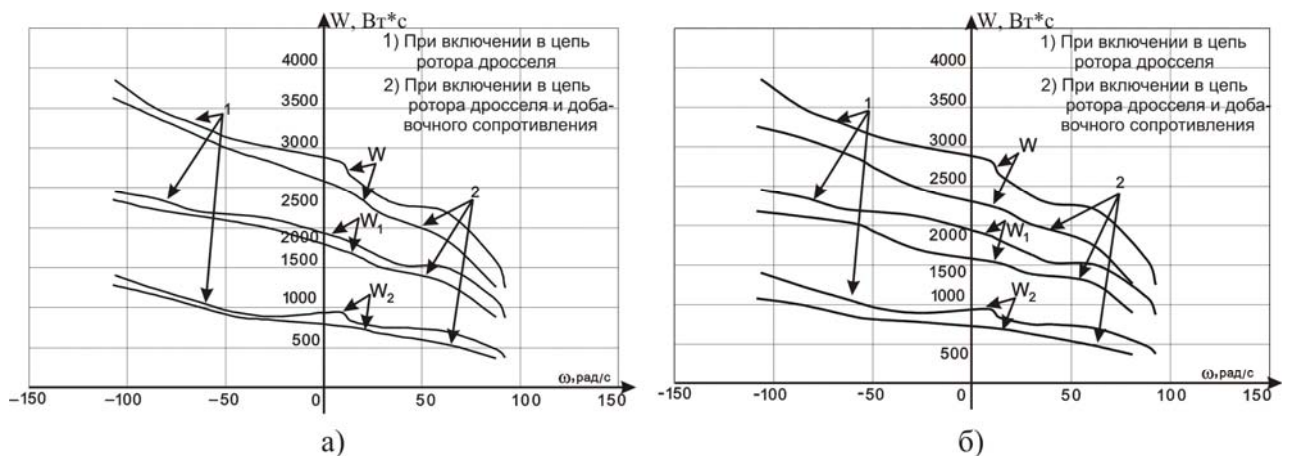


Рис. 11. Расчетные значения потерь энергии при включении в цепь ротора дросселя и добавочного сопротивления $r_{\text{доп}}=0,1$ Ом (а) и $r_{\text{доп}}=0,2$ Ом (б)

Анализ характеристик рис. 11 а показал, что суммарные потери уменьшились примерно на 7... 10 %. Пусковой момент при этом не только не уменьшится, а увеличился на 5 %.

Анализ показал, что экстремум функции $M(r_{\text{доп}})$ не имеет ярко выраженного пика, а изменяется плавно и дальнейшее увеличение сопротивления в роторной цепи приводит к меньшему пусковому моменту, но при этом будут существенно уменьшаться токи, а следовательно, и нагрев электродвигателя. Увеличение сопротивления $r_{\text{доп}}$ таким образом, чтобы пусковой момент был равным пусковому моменту на естественной дроссельной характеристике при количестве витков $w = 40$, (такое равенство имеет место при $r_{\text{доп}} = 0,2$ Ом).

Приводит к уменьшению суммарных потерь примерно на 20... 25 % при сохранении динамических свойств таких же, как при дросселе с $w = 40$ без дополнительных сопротивлений (рис. 11 б).

В пятой главе были разработаны и испытаны тиристорные регуляторы скорости на другой элементной базе и с другими принципами формирования напряжения, позволяющие изменять углы регулирования тиристорных в пределах от 0 до 180°. Там же представлена автоматизация спуска подъемных операций.

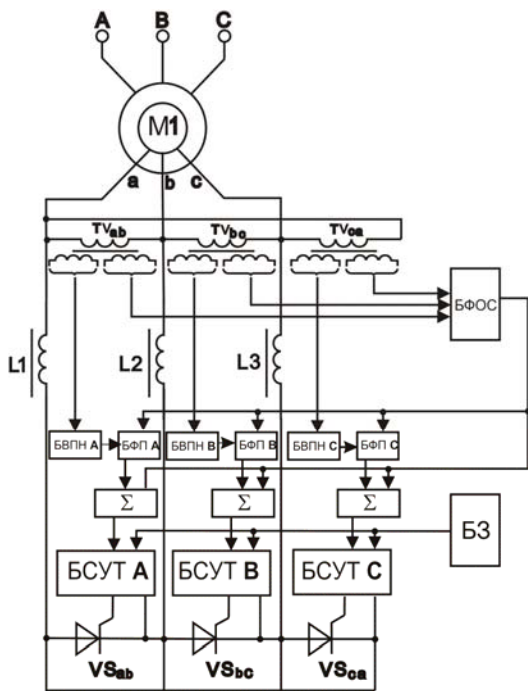


Рис. 12. Функциональная схема роторных цепей дроссельного электропривода с регулятором скорости

На рис. 12 представлена функциональная схема предлагаемого электропривода регулятора скорости с пилообразным напряжением СИФУ.

Электропривод с таким регулятором состоит из асинхронного двигателя M1 с фазным ротором, обмоток дросселя L1...L3 и тиристоров VS_{ab}, VS_{bc}, VS_{ca}.

Схема управления тиристорами состоит из трех трансформаторов TV_{ab}, TV_{bc}, TV_{ca}, блока формирования обратной связи (БФОС), трех блоков (пофазно) выделения положительной полуволны напряжения (БВПН) между соответствующими кольцами ротора, трех блоков формирования пилообразного напряжения (БФП), трех сумматоров Σ, трех блоков сравнения напряжения опорного с напряжением

задания и управления тиристорами (БСУТ) и блока задания скорости электродвигателя (БЗ).

Схема рис. 12 успешно испытана в лаборатории на электродвигателе 3.5

кВт и на кранах промышленных предприятий.

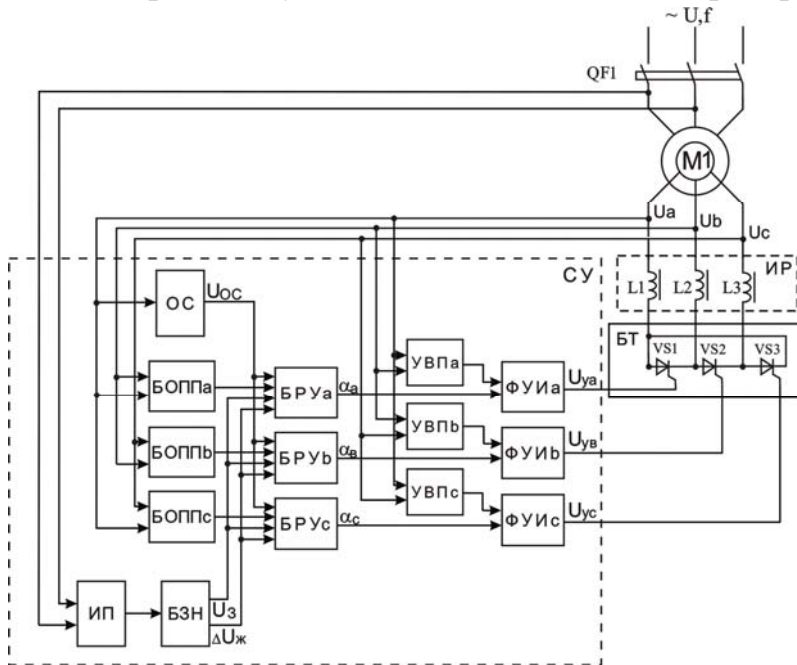


Рис. 13. Функциональная схема дроссельного электропривода с изменяемой жесткостью механической характеристики

Благодаря большей жесткости механических характеристик диапазон регулирования скорости такого электропривода увеличивается до 15:1.

На рис. 13 представлена функциональная схема регулятора скорости с изменяемой жесткостью механической характеристики дроссельного электропривода.

Электропривод состоит из асинхронного двигателя с фазным ротором M1, дросселя L1 ... L3 (блок

ИР), тиристоров в роторной цепи VS1, VS2 и VS3 (блок БТ), соединенных в треугольник, и системы управления тиристорами СУ. В свою очередь, система управ-

ления состоит (пофазно) из блока обратной связи (ОС), по напряжению на роторе, блока определения продолжительности полуволны напряжения на кольцах ротора (БОПП), блока расчета угла управления α тиристорами (БРУ), узла выделения положительной полуволны (УВП), формирователя управляющих импульсов (ФУИ), источника питания (ИП) и блока задания напряжения (БЗН).

Особенностью рассматриваемого регулятора является введение дополнительного напряжения $\Delta U_{ж}$, задающего жесткость механической характеристики.

Данный способ управления включает в себя определение продолжительности полупериода напряжения на кольцах ротора $t_{ПВ}$ и расчет угла управления α и момента включения $t_{ВКЛ}$ каждого тиристора. Расчет этих параметров производится по формулам:

$$\alpha = 180 \cdot \frac{U_3 + \Delta U_{ж} - U_{ОС}}{\Delta U_{ж}}, \quad (10)$$

$$t_{ВКЛ} = \frac{\alpha}{180} \cdot t_{ПВ}. \quad (11)$$

Данный принцип управления обеспечивает линейное регулирование угла управления тиристора в диапазоне от 0° до 180° при изменении нагрузки на валу электродвигателя, существенно повышая жесткость механической характеристики.

При $U_{ОС} < U_3$ угол управления α устанавливается равным 180° , чему соответствует полностью закрытое состояние тиристорov. При $U_{ОС} > (U_3 + \Delta U_{ж})$ угол управления α устанавливается равным 0° , при этом тиристоры полностью открыты. В остальных случаях угол α рассчитывается по формуле (10). Благодаря линейной зависимости угла управления α от изменения $U_{ОС}$ механические характеристики имеют линейный характер. Диапазон регулирования скорости до 15:1.

Регулятор скорости был успешно реализован на трех (для каждой фазы отдельно) микроконтроллерах ATmega8535 фирмы ATMEL. Регулятор скорости ориентирован исключительно на реализацию на программируемых устройствах.

Дроссельный асинхронный электропривод, реализующий регулирование скорости и **автоматизацию спуско-подъемных режимов работы дроссельного электропривода крановых механизмов** (рис. 14), включает в себя реверсор РТ, переключающий статорные цепи электродвигателя М1, дроссели (индуктивные реостаты) L1...L3, регулятор скорости РСТ, датчик обратной связи по напряжению на кольцах ротора ДОС, программируемый контроллер (микроконтроллер) ПК, командoаппарат КА и блок питания БП.

Обеспечение пуско-тормозных режимов осуществляется дросселем, создание пониженных скоростей – РСТ, реверс двигателя – реверсором тиристорным РТ, а управление реверсором и регулятором скорости осуществляется программируемым контроллером ПК.

Принцип автоматизации состоит в следующем. Независимо от массы груза электродвигатель включается на силовой спуск, и если груз преодолевает момент трения, то система автоматизации осуществляет переключение электродвигателя в режим тормозного спуска.

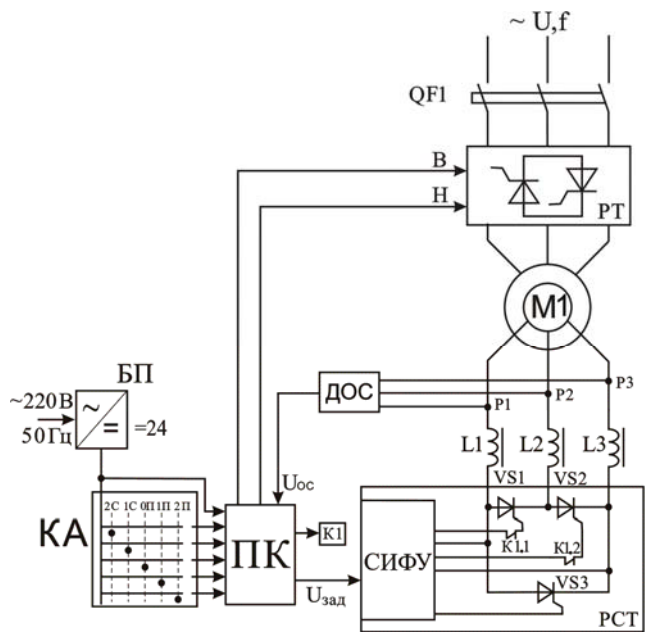


Рис. 14. Функциональная схема электропривода

В силовом спуске опускание груза происходит под действием двух моментов: момента, создаваемого двигателем и момента, развиваемого грузом. Под действием этих моментов значительно увеличивается частота вращения двигателя в направлении спуска, система автоматизации контролирует эту ситуацию и, если груз преодолевает момент трения, производит переключение реверсора статорной цепи со спуска на подъем и работа двигателя осуществляется в режиме торможения противовключением. В режиме торможения возможно уменьшение скорости спуска груза и стремление к остановке электродвигателя. Для исключения остановки электродвигателя система переключит двигатель с режима противовключения вновь на силовой спуск. Поэтому груз с небольшой массой будет опускаться попеременно то в силовом, то в тормозном режимах.

Способ автоматизации успешно испытан в лаборатории. В качестве ПК использовался программируемый микроконтроллер ATmega8535.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных теоретических и практических исследований решена актуальная задача разработки методик выбора мощности электродвигателя и создания системы управления дроссельным электроприводом с улучшенными регулировочными характеристиками для крановых механизмов.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель асинхронного электропривода с дросселем, тиристорами и системой управления в роторной цепи для плавного регулирования частоты вращения электродвигателя. Особенностью модели является учет изменений параметров дросселя при изменении скорости электродвигателя и процессов включения тиристорov при новом способе регулирования скорости.

2. Разработано программное обеспечение для расчета электромеханических процессов дроссельного асинхронного электропривода в статических и динамических режимах, а также допустимой мощности конкретного электродвигателя как для регулируемых, так и нерегулируемых приводов.

3. Предложен способ повышения допустимой мощности дроссельных регулируемых электроприводов, основанный на включении последовательно с обмотками дросселя активных сопротивлений.

4. Предложены новый способ и устройство регулирования скорости дроссельного асинхронного электропривода, обеспечивающие повышение жесткости механических характеристик и расширение диапазона регулирования скорости (новизна решения защищена патентом РФ №2300169).

5. Предложен принцип автоматизации спусковых операций подъемных механизмов, учитывающий изменение момента трения в механизме при трогании с места и при изменении скорости спуска.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Борисов, А.М. Пусковое устройство асинхронного электродвигателя / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А. С. Нестеров, А.Н. Шишков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2005. - Вып. 6. – № 9(49). – С. 79-83.

Другие научные публикации по теме диссертации

2. Борисов, А.М. Дроссельный асинхронный регулируемый электропривод / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А. С. Нестеров, А.Н. Шишков и др. // Подъемные сооружения. Специальная техника, 2005. – №10. – С. 14 – 17.

3. Борисов, А.М. Тиристорный регулятор скорости дроссельного асинхронного электропривода / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А. С. Нестеров, А.Н. Шишков // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – Вып. 12. – С. 218–222.

4. Шишков, А.Н. Автоматизация спуско-подъемных режимов дроссельного асинхронного регулируемого электропривода / А.Н. Шишков // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: сб. науч. тр. XI международной конференции. – Крым, Алушта 2006. Ч. 2. – С. 41–42.

5. Борисов, А.М, Математическая модель асинхронного электропривода с нелинейным сопротивлением в цепи ротора / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А. С. Нестеров, А.Н. Шишков // Электроприводы переменного тока: Труды XIV международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. – С. 189–192.

6. Борисов, А.М. Автоматизация режимов работы механизмов подъема кранов с асинхронными электроприводами / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А. С. Нестеров, А.Н. Шишков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 7. – № 12(84). – С. 41–44.

Патенты

7. Пат. № 2300169 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 Р 25/26. Способ и устройство управления асинхронным двигателем с фазным ротором / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков – №2006100438; заявл. 10.01.2006; опубл. 27.05.2007, бюл. –№ 15. – 8 с.

Шишков Александр Николаевич

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ
С ДРОССЕЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

Подписано в печать 13.09.2007. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л.0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 329/358.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск,
пр. им. Ленина, 76.