

09.03  
Ф 702

На правах рукописи

Саб

**ФОМИН СТАНИСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**КРАНОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ТИРИСТОРНЫМ  
УПРАВЛЕНИЕМ НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С ФАЗНЫМ РОТОРОМ**

**Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
2005

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Волович Георгий Иосифович;  
доктор технических наук,  
профессор Сарваров Анвар Сабулханович.

Ведущая организация – ОАО Южуралэлектромонтаж, г. Челябинск.

Защита состоится 8 декабря 2005 г., в 10 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

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

Автореферат разослан “\_\_” ноября 2005 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В крановых механизмах преобладают электроприводы с двигателями с фазным ротором. Электропривод с индуктивным реостатом (дресселем) в роторной цепи получил широкое распространение в крановом электроприводе, по крайней мере, в странах СНГ. Достоинствами дрессельного привода являются простота, дешевизна, ремонтпригодность, эксплуатационная надежность за счет отсутствия пуско-регулирующей аппаратуры в цепи ротора и снижение динамических ударов в механической части привода. Дрессельный электропривод позволяет ограничивать ток при пуске двигателя и регулировать величину пускового момента за счет изменения числа витков дресселя.

Дрессели и методы их расчета разрабатываются разными учеными страны, включая работы предшественников в ЮУрГУ, МГМИ, теоретическим фундаментом таких расчетов являются работы ученых МЭИ во главе с А.В. Нетушилом. В работе предложена методика расчета полного сопротивления дресселя, которая базируется на работах этих ученых.

На кафедре электропривода ЮУрГУ предложен простой, но принципиально новый способ регулирования скорости асинхронного двигателя с фазным ротором (Патент РФ №2202850). Этот способ отличается тем, что для каждого тиристора в роторной цепи момент включения определяется независимо от остальных. При этом достигается малая величина пульсаций момента, так как они соответствуют трехкратной частоте пульсаций напряжений ротора. Работа электропривода осуществляется при малых моментах нагрузки в импульсном режиме, а при больших моментах в фазовом режиме.

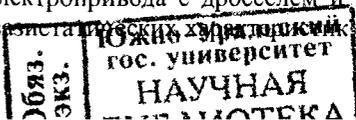
Такому приводу характерна высокая плавность регулирования (без ударов момента). По плавности регулирования электропривод сравним с приводом постоянного тока. Также достоинством электропривода является его простая и высокая эксплуатационная надежность.

Для того чтобы положительные качества предлагаемого способа регулирования раскрылись в полной мере, необходима соответствующая методика расчета статических характеристик этого электропривода. В работе предложена методика расчета статических режимов, приведены результаты испытаний электропривода в лабораторных условиях и в условиях производства.

**Целью работы** является разработка методики расчета характеристик электропривода с новым способом регулирования скорости, исследование статических режимов работы такого электропривода на лабораторном стенде и в условиях производства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование физических процессов, происходящих при протекании по обмотке дресселя переменного тока;
- создание методики расчета полного сопротивления дресселя;
- построение математической модели электропривода с дресселем и тиристорным регулятором скорости для расчета квантизации.



– разработка методики расчета статических характеристик электропривода с дросселем;

– экспериментальное исследование статических характеристик электропривода с дросселем и регулятором скорости на лабораторном стенде и в условиях производства;

– разработка алгоритма управления дроссельного электропривода с регулятором скорости с использованием программируемого контроллера.

**Научная новизна** заключается в следующем:

– создана математическая модель нового способа регулирования;

– разработана методика расчета квазистатических характеристик электропривода с дросселем и тиристорным регулятором скорости;

**На защиту выносятся следующие основные результаты:**

– инженерная методика расчета полного сопротивления дросселя;

– способ регулирования скорости двигателя с фазным ротором;

– методика расчета статических характеристик электропривода с дросселем и регулятором скорости;

– способ решения проблемы спуска с малой скоростью груза, развивающего малый статический момент.

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

**Практическая ценность работы.**

Электропривод с дросселем и регулятором скорости внедрен на многих предприятиях России и стран ближнего зарубежья.

Разработанная программа на основе математической модели является основой расчета характеристик электропривода, которые будут получены при работе электропривода на реальном объекте.

Предложено программное обеспечение для программируемого контроллера, реализующее алгоритм работы автоматизированного электропривода.

Созданный электропривод предназначен для установки на мостовых кранах всех механизмов и работы в тяжелых условиях цехов металлургических предприятий. Планируется массовый выпуск автоматизированных электроприводов на базе ООО «Горнозаводское объединение» (г. Челябинск).

**Личный вклад автора**

• Предложена математическая модель асинхронного электропривода с дросселем и тиристорным регулятором.

• Проведены экспериментальные исследования на лабораторном стенде и в условиях производства, сопоставлены расчетные и экспериментальные данные.

• Разработан алгоритм автоматизации дроссельного асинхронного регулируемого электропривода.

• Создано программное обеспечение для программируемого контроллера, реализующего спуск любого груза с заданной скоростью.

- Изготовлен автоматизированный электропривод на основе разработанных алгоритмов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на тринадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-05, организованной Уральским государственным техническим университетом г. Екатеринбург, а также на международной конференции «Перспективы рынка подъемных сооружений в контексте интеграционных процессов ЕЭП, ВТО и ЕС» г. Одесса.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 научных работ в периодических изданиях, в сборниках научных трудов и в сборниках тезисов докладов научно-технических конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка литературы из 137 наименований. Общий объем составляет 136 страниц. Работа включает в себя 58 рисунков и 16 таблиц.

Автор выражает огромную благодарность научному консультанту Борису Александру Михайловичу 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 физические основы работы дросселя. Дроссель представляет собой катушку, намотанную на сердечник из магнитного материала – ферромагнетика. У такого сердечника магнитная проницаемость значительно больше единицы и сильно зависит от магнитного поля и температуры. Ферромагнетик разделен на малые области – домены, внутри которых оно спонтанно намагничено. При наложении внешнего магнитного поля границы между доменами смещаются и увеличиваются те домены, магнитный момент которых направлен вдоль поля. Ферромагнетик намагничивается и достигает магнитного насыщения, когда все домены направлены вдоль поля.

Если по катушке пропустить переменный ток (рис. 1), то этот ток создаст переменный магнитный поток. Большая часть этого потока  $\Phi_0$  замыкается по ферромагнитному сердечнику, вследствие его высокой магнитной проницаемости. Небольшая часть замыкается по воздуху, охватывая витки катушки, образует поток рассеяния  $\Phi_s$ . Поток рассеяния замыкается в среде, магнитная проницаемость, которой не зависит от напряженности магнитного поля, поэтому его величина линейно связана с величиной тока в катушке.

Основной поток замыкается в ферромагнетике, магнитная проницаемость которого обладает нелинейной зависимостью от напряженности поля. Переменный магнитный поток создает в массе сердечника ЭДС индукции, под действием которой возникают вихревые токи. Вихревые токи создают свой магнитный поток, стремящийся ослабить основной магнитный поток. Наиболее сильно это ослабление выражено в центре сечения сердечника, так как центр охвачен наибольшим

числом контуров вихревых токов. Вихревые токи создают потери. Мощность этих потерь во второй степени зависят от частоты, амплитуды магнитной индукции и толщины магнитопровода.

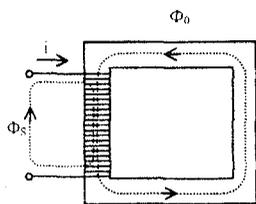


Рис. 1. Катушка с ферромагнитным сердечником

Кроме потерь на вихревые токи в катушке с ферромагнитным сердечником имеют место потери на перемагничивание или гистерезис. При низких частотах в магнитопроводе преобладают потери на гистерезис, а при высоких – потери на вихревые токи.

Наличие потерь приводит к возникновению активной составляющей тока, протекающего по катушке. Сопротивление катушки носит комплексный характер и зависит от частоты и величины тока, протекающего по ней, а также от материала магнитопровода.

Для расчета комплексного сопротивления катушки была создана методика, использующая конструктивные особенности дросселей.

Конструкция дросселя для двигателей мощностью до 30 кВт показана на рис. 2а. Дроссель состоит из трех стальных труб 2, покрытых изоляционным материалом. На каждую трубу намотана обмотка 4 из медного изолированного провода. Каждая обмотка имеет отпайки 5 для точной настройки. Швеллеры 1 и 3 служат для замыкания пути магнитного потока, создаваемого при работе дросселя, а также для фиксации сердечников друг относительно друга.

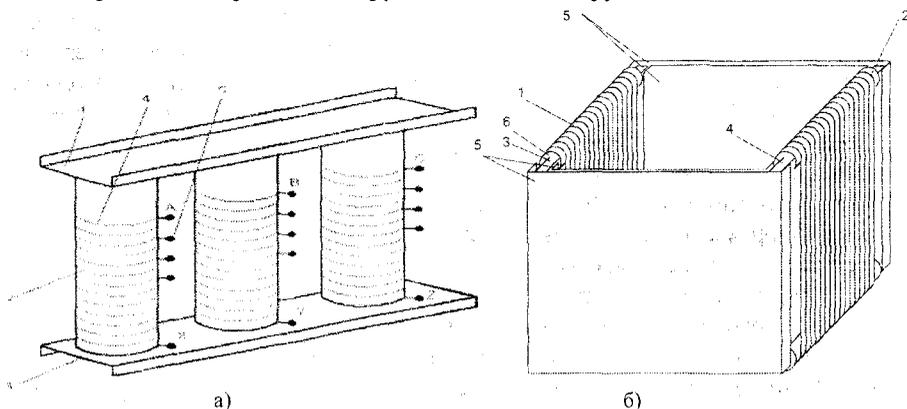


Рис. 2. Конструкции дросселей: а) для двигателя мощностью до 30 кВт; б) для двигателя мощностью свыше 30 кВт

Конструкция дросселя для двигателей мощностью свыше 30 кВт представляет собой однофазные модули, включаемые в каждую фазу ротора (рис. 2б). Обмотка модуля состоит из двух последовательно соединенных катушек 1 и 2 с витками из медной шины. Вертикальные стойки 3 и 4 магнитопровода дросселя вы-

полнены из стальных листов. Вертикальные стойки сверху и снизу соединяются стальными листовыми пластинами 5. Обмотки удалены от верхних стоек и располагаются в ручьях изоляторов 6 из фторопласта.

Выражение для определения полного сопротивления дросселей (рис. 2) с заданными геометрическими размерами будет иметь вид:

$$Z_{др} = \frac{3,62 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot w^2 \cdot D}{l \cdot \sqrt{f \cdot (a + \frac{b \cdot I_2 \cdot w}{l})}} \cdot e^{i3\pi\tau} \quad (1)$$

Здесь  $l$  – длина трубы;  $D$  – диаметр трубы внешний;  $I_2$  – ток, протекающий по обмотке;  $f$  – частота тока;  $w$  – число витков дросселя;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, характеризующие материал магнитопровода.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы и обоснованность применения выражения (1).

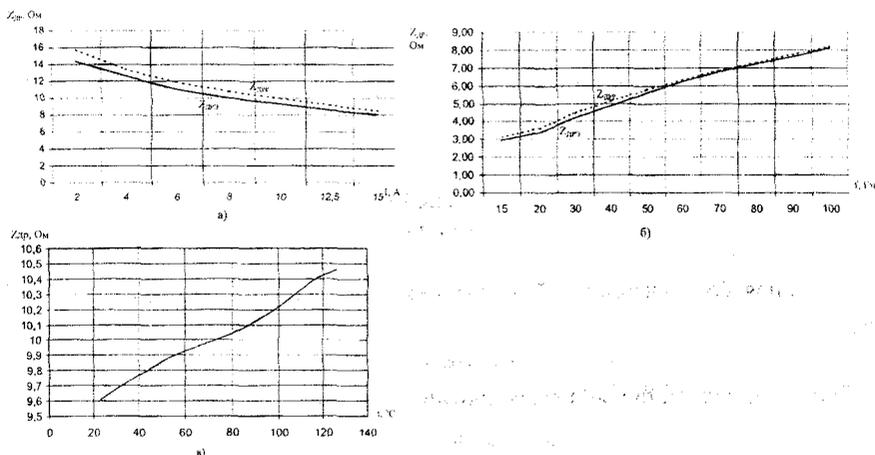


Рис. 3. Расчетные  $Z_{дрр}$  и экспериментальные  $Z_{дрэ}$  зависимости сопротивления дросселя от тока дросселя (а) и от частоты (б); зависимость сопротивления дросселя от температуры (в)

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало, что погрешность расчета составляет не более 10%. Анализ характеристик (рис. 3) позволяет сделать следующие выводы: с увеличением тока, протекающего через дроссель, полное сопротивление дросселя уменьшается; полное сопротивление с ростом частоты увеличивается; при изменении температуры дросселя происходит рост его сопротивления. Выражение (1) не учитывает влияние температуры магнитопровода на сопротивление дросселя. Этот недостаток можно устранить введением средних коэффициентов  $a$  и  $b$  для холодного и нагретого магнитопровода.

Известно, что при пуске электродвигателя и выходе его на рабочую скорость происходит изменение частоты и величины тока ротора. Дроссель, установленный в роторной цепи электродвигателя, будет изменять свое сопротивление согласно изменению тока ротора. С увеличением скорости электродвигателя при его пуске уменьшается ток ротора и его частота, стремясь к нулевым значениям при синхронной скорости. Характеристики а) и б) рис. 3 в обратной зависимости друг от друга. Поэтому при пуске электродвигателя с дросселем в роторной цепи возникает эффект поддержания пускового момента и ограничения пускового тока.

Во второй главе исследуются статические характеристики асинхронного электропривода с дросселем в роторной цепи. Наиболее точно процессы, происходящие в трехфазной асинхронной машине, отражает Т-образная схема замещения. Схема замещения с учетом дросселя показана на рис. 4. Изменение индуктивного сопротивления контура намагничивания учитывается введением универсальной кривой намагничивания для двигателей краново-металлургической серии.

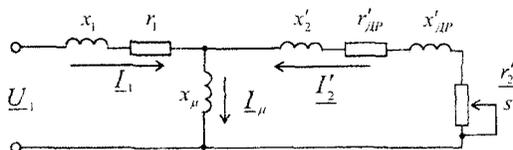


Рис. 4. Схема замещения дроссельного электропривода

Активная составляющая сопротивления дросселя  $r_{дp}$  определяется по формуле

$$r_{дp} = Z_{дp} \cdot \cos \varphi_{дp}. \quad (2)$$

Индуктивная составляющая сопротивления  $x_{дp}$  определяется по формуле

$$x_{дp} = Z_{дp} \cdot \sin \varphi_{дp}. \quad (3)$$

Полное сопротивление дросселя рассчитывается по формуле (1).

Расчет приводится в следующей последовательности.

1. Определяется частота тока ротора

$$f_2 = f_1 \cdot s, \quad (4)$$

где  $f_1$  - частота тока статора.

2. По формулам (1), (2), (3) рассчитываются  $Z_{дp}$ ,  $r_{дp}$ ,  $x_{дp}$  соответственно. При этом ток ротора в начальный момент времени берется равным нулю, а в дальнейшем подставляется значение, полученное в приведенных ниже пунктах расчета.

3. Полное приведенное сопротивление роторной цепи

$$Z_p = \sqrt{\left( \frac{r'_2}{s} + \frac{(r_{1д} + r_{дp}) \cdot k_c^2}{s} \right)^2 + (x_{дp} \cdot k_c^2 + x'_2)^2}. \quad (5)$$

Здесь  $r_{1d}$  – активное сопротивление обмотки дросселя.

4. Полное сопротивление контура намагничивания при текущем значении тока намагничивания ( $I_{\mu}$ ) равно индуктивному сопротивлению  $x_{\mu}$ .

5. Полное сопротивление параллельно соединенных цепей контура намагничивания и ротора

$$Z_{\text{ПАР}} = \frac{Z_p \cdot Z_{\mu}}{Z_p + Z_{\mu}} \quad (6)$$

6. Полное сопротивление цепей статора

$$Z_c = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} \quad (7)$$

7. Полное суммарное сопротивление двигателя как сумма комплексных значений

$$Z_{\text{СУМ}} = Z_c + Z_{\text{ПАР}} \quad (8)$$

8. Определение тока статора

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{\text{СУМ}}} \quad (9)$$

9. Приведенная ЭДС ротора

$$E = I_1 \cdot Z_{\text{ПАР}} \quad (10)$$

10. Ток намагничивания

$$I_{\mu} = \frac{E}{Z_{\mu}} \quad (11)$$

Сравнивая значение рассчитанного тока намагничивания и тока, соответствующего приведенной ЭДС на кривой намагничивания, определяем погрешность расчета. Если  $|I_{\mu} - I_{\mu}| > 0.001$ , то заданная погрешность расчета не выполняется и необходимо вернуться к п.4 при  $I_{\mu} = I_{\mu}$ . Таким образом, определяется точка кривой намагничивания, в которой работает электродвигатель при заданном скольжении.

11. Ток ротора

$$I'_2 = \frac{E}{Z_p} \quad (12)$$

12. Далее сравниваются ток ротора с током, для которого в п.2 рассчитаны параметры дросселя

$$|I'_2 \cdot k_e - I| < 0,001 \quad (13)$$

13. Если соотношение (13) не выполняется, возвращаются к пункту п.2 и вновь рассчитывают параметры дросселя при  $I = I'_2 \cdot k_e$ . Цикл повторяется до тех пор, пока соотношение (13) не будет выполнено.

14. Момент двигателя

$$M = \frac{3 \cdot (I'_2)^2 \cdot (r'_2 + (r_{1d} + r_{ДР}) \cdot k_e^2)}{s \cdot \omega_0} \quad (14)$$

15. Задается новое значение скольжения и расчет повторяется с п.1.

Приведенная методика реализована в программе для персонального компьютера. Эта программа написана на языке визуального программирования Borland C++ Builder.

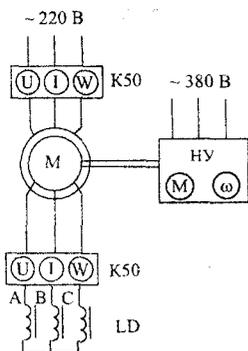


Рис. 5. Схема лабораторного стенда

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде (рис. 5). Лабораторный стенд состоял из дросселя LD, исследуемого асинхронного двигателя М, нагрузочного устройства НУ, представляющего собой двигатель постоянного тока с тиристорным преобразователем, измерительных комплектов K50. На лабораторном стенде имелась возможность индикации момента, создаваемого нагрузочной машиной и скорости электропривода.

На рис. 6 приведены экспериментальные и расчетные механические (рис. 6а) и электромеханические (рис. 6б) характеристики электропривода при различных числах витков дросселя.

Исследования показали, что предложенная методика расчета сопротивления дросселя при заданных его конструктивных

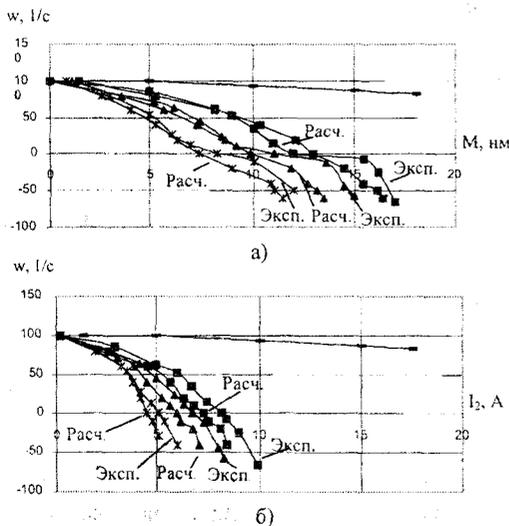
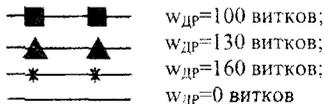


Рис. 6. Механические (а) и электромеханические (б) характеристики электропривода



размерах и числе витков, учитывающая изменение частоты и тока роторной цепи, вполне удовлетворительно определяет процессы в дросселе. Она может быть рекомендована для расчета параметров дросселя и расчета механических и электромеханических характеристик асинхронных электроприводов с включением дросселя в роторную цепь.

Сопrotивление дросселя, вводимое в роторную цепь двигателя, имеет комплексный характер. Его значение зависит от тока ротора и от частоты вращения ротора.

Рассматриваемый дроссель может быть рекомендован для ограничения пусковых токов и плавного пуска асинхронных электроприводов механизмов перемещения мостов и тележек кранов, а также механизмов подъема.

**В третьей главе** предложена новая схема тиристорного регулятора, предназначенная для регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором. Технологические режимы многих производственных механизмов на разных этапах работы требуют движения исполнительного органа с различной скоростью, что обеспечивается путем регулирования скорости электропривода. Электропривод с регулятором скорости позволяет простым способом получить низкие посадочные скорости спуска грузов, низкие скорости при выборе слабину канатов, а также низкие скорости для точной остановки крановых механизмов.

Схема, поясняющая принцип действия тиристорного регулятора скорости, показана на рис. 7а.

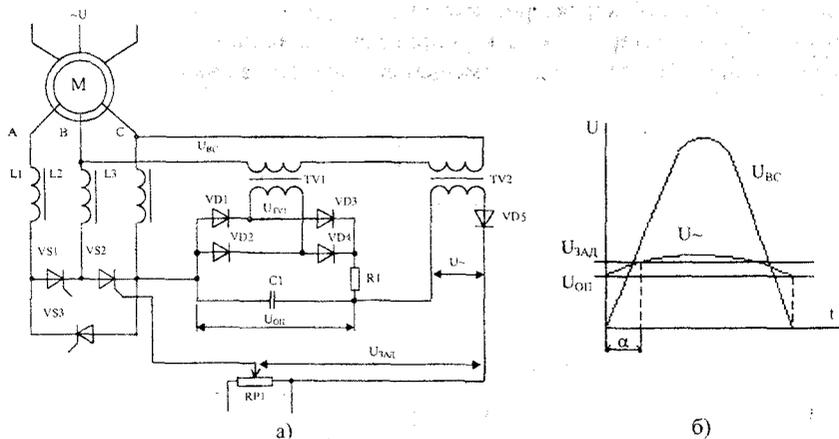


Рис. 7. Схема тиристорного регулятора скорости (а) и диаграммы управляющих напряжений (б)

Электропривод включает в себя: двигатель М, дроссель L1, L2, L3, между выходными зажимами дросселя включаются тиристоры VS1, VS2, VS3 по схеме треугольника и система импульсно-фазового управления тиристорами. СИФУ каждого тиристора выполнена аналогично, поэтому на рис. 7 показана только система управления тиристора VS2.

Принцип действия регулятора скорости заключается в следующем. С колец ротора снимается напряжение  $U_{BC}$ . Это напряжение с помощью трансформатора TV1, диодного моста VD1–VD4 и фильтра R1C1 преобразуется в выпрямленное

напряжение  $U_{оп}$ . Из этого же напряжения  $U_{вс}$  трансформатором TV2 и диодом VD5 создается напряжение синусоидальной формы  $U_{\sim}$ . Сумма  $U_{оп}$  и  $U_{\sim}$  создает напряжение обратной связи  $U_{ос}$ . Задающее напряжение  $U_{зад}$  снимается с потенциометра RP1, включенного на отдельный источник питания. При работе двигателя на пониженной скорости тиристор VS2 включается при угле регулирования  $\alpha$ , когда  $U_{ос} > U_{зад}$  (рис. 76) и отключается при отрицательном напряжении на тиристоре и снижении тока через тиристор до нуля. Изменяя напряжение  $U_{зад}$  можно изменять частоту вращения электродвигателя.

При увеличении нагрузки снижение скорости ротора сопровождается ростом  $U_{вс}$ , а, следовательно, и ростом  $U_{ос}$ . Это приводит к уменьшению угла  $\alpha$  и, как следствие, к росту тока и электромагнитного момента, препятствующего снижению скорости. Таким образом, в этой схеме управления тиристорами происходит поддержание скорости вращения электродвигателя при изменении момента, приложенного к валу, за счет изменения угла открытия тириستоров. Благодаря форме кривой напряжения обратной связи  $U_{ос}$  достигается высокий коэффициент усиления обратной связи. С ростом нагрузки при незначительном превышении напряжения  $U_{ос}$  значения  $U_{зад}$  резко изменяется угол регулирования  $\alpha$ , повышая жесткость механической характеристике электропривода.

Для расчета характеристик электропривода с дросселем и регулятором в роторной цепи использовалась схема замещения, приведенная на рис. 8.

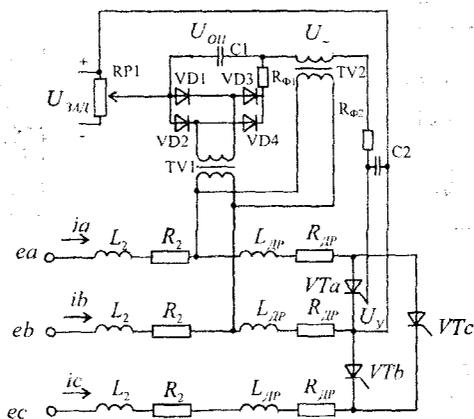


Рис. 8. Схема замещения с дросселем и регулятором скорости

При этом были приняты следующие допущения:

- к входам обмоток фаз ротора приложена ЭДС ротора синусоидальной формы;

• каждый тиристор в фазах роторной цепи заменен на резистор сопротивлением  $Rt$ . Это сопротивление, в зависимости от того, открыт тиристор или закрыт, принимает значение:

$Rt=0,001$  Ом (тиристор открыт);

$Rt=100$  кОм (тиристор закрыт).

Схема замещения с учетом допущений представлена на рис. 9.

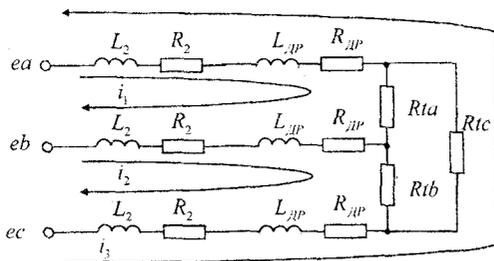


Рис. 9. Схема замещения с учетом допущений

Из схемы замещения получаем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} ea - eb = i_1(2R_2 + 2R_{дп} + R_{ta}) - i_2(R_2 + R_{дп}) - \\ - i_3(R_2 + R_{дп}) + 2(L_2 + L_{дп}) \frac{di_1}{dt} - (L_2 + L_{дп}) \frac{di_2}{dt} - (L_2 + L_{дп}) \frac{di_3}{dt}; \\ eb - ec = i_2(2R_2 + 2R_{дп} + R_{tb}) - i_1(R_2 + R_{дп}) - \\ - i_3(R_2 + R_{дп}) - (L_2 + L_{дп}) \frac{di_1}{dt} + 2(L_2 + L_{дп}) \frac{di_2}{dt} - (L_2 + L_{дп}) \frac{di_3}{dt}; \\ ec - ea = i_3(2R_2 + 2R_{дп} + R_{tc}) - i_1(R_2 + R_{дп}) - \\ - i_2(R_2 + R_{дп}) - (L_2 + L_{дп}) \frac{di_1}{dt} - (L_2 + L_{дп}) \frac{di_2}{dt} + 2(L_2 + L_{дп}) \frac{di_3}{dt}. \end{array} \right. \quad (15)$$

Мгновенное значение тока, протекающего по цепи содержащей вентили и активно – индуктивную нагрузку, определяется как ток при переходном процессе в этой цепи. Расчет каждого контурного тока, производится как расчет переходного процесса в контуре под действием приложенной ЭДС ротора без учёта действия других контурных токов.

$$\begin{cases} i_1 = \frac{ea - eb}{Rta + 2 \cdot (R_2 + R_{дп})} + \left( i_{1n} - \frac{ea - eb}{Rta + 2 \cdot (R_2 + R_{дп})} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}; \\ i_2 = \frac{eb - ec}{Rtb + 2 \cdot (R_2 + R_{дп})} + \left( i_{2n} - \frac{eb - ec}{Rtb + 2 \cdot (R_2 + R_{дп})} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}; \\ i_3 = \frac{ec - ea}{Rtc + 2 \cdot (R_2 + R_{дп})} + \left( i_{3n} - \frac{ec - ea}{Rtc + 2 \cdot (R_2 + R_{дп})} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}, \end{cases} \quad (16)$$

где  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – постоянные времени соответствующих контуров.

Для решения дифференциальных уравнений системы 15 используем метод Эйлера. Производные по времени аппроксимируются разностными уравнениями

$$\begin{aligned} di_1/dt &= (i_{1k} - i_{1n})/h; \\ di_2/dt &= (i_{2k} - i_{2n})/h; \\ di_3/dt &= (i_{3k} - i_{3n})/h; \end{aligned} \quad (17)$$

где  $i_{1k}$  – текущее значение тока;  $i_{1n}$  – предыдущее значение тока;  $h$  – шаг.

Мгновенные значения напряжения на кольцах каждой фазы ротора

$$\begin{cases} U_{rab} = ea - eb - 2 \cdot i_{1k} \cdot R_2 + i_{2k} \cdot R_2 + i_{3k} \cdot R_2 - 2 \cdot L_2 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt} \\ U_{rbc} = eb - ec - 2 \cdot i_{2k} \cdot R_2 + i_{1k} \cdot R_2 + i_{3k} \cdot R_2 + L_2 \frac{di_1}{dt} - 2 \cdot L_2 \frac{di_2}{dt} + L_2 \frac{di_3}{dt} \\ U_{rca} = ec - ea - 2 \cdot i_{3k} \cdot R_2 + i_{1k} \cdot R_2 + i_{2k} \cdot R_2 + L_2 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} - 2 \cdot L_2 \frac{di_3}{dt} \end{cases} \quad (18)$$

Напряжение управления каждого из тиристоров будет:

$$\begin{cases} U_{yA} = (U_{oc} + \frac{U_{rab}}{ktr2} - U_{3эл} \cdot kpot) - (U_{oc} + \frac{U_{rab}}{ktr2} - U_{3эл} \cdot kpot) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{12}}}; \\ U_{yB} = (U_{oc} + \frac{U_{rbc}}{ktr2} - U_{3эл} \cdot kpot) - (U_{oc} + \frac{U_{rbc}}{ktr2} - U_{3эл} \cdot kpot) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{12}}}; \\ U_{yC} = (U_{oc} + \frac{U_{rca}}{ktr2} - U_{3эл} \cdot kpot) - (U_{oc} + \frac{U_{rca}}{ktr2} - U_{3эл} \cdot kpot) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{12}}}, \end{cases} \quad (19)$$

где  $ktr2$  – коэффициент трансформации понижающего трансформатора TV2 цепи управления тиристорами,

$kpot$  – коэффициент потенциометра задания.

Тиристоры открываются, если управляющее напряжение больше нуля:

Если  $U_{yA} > 0$ , то  $Rta = 0,001$ ;

если  $U_{yB} > 0$ , то  $Rtb = 0,001$ ;

если  $U_{yC} > 0$ , то  $Rtc = 0,001$ .

(20)

Закрываются тиристоры, когда ток через них становится отрицательным или равным нулю

Если  $i_1 \leq 0$ , то  $Rta = 10000$ ;

если  $i_2 \leq 0$ , то  $Rtb = 10000$ ;

если  $i_3 \leq 0$ , то  $Rtc = 10000$ .

(21)

Действующее значение тока ротора вычисляется как среднеквадратичное значение.

Момент рассчитывается по формуле

$$M = \frac{3 \cdot (I_r')^2 \cdot (r_2' + r_{ld} + r_k)}{s \cdot \omega_0} \quad (22)$$

Экспериментальные механические характеристики электропривода при различных напряжениях задания представлены на рис. 10.

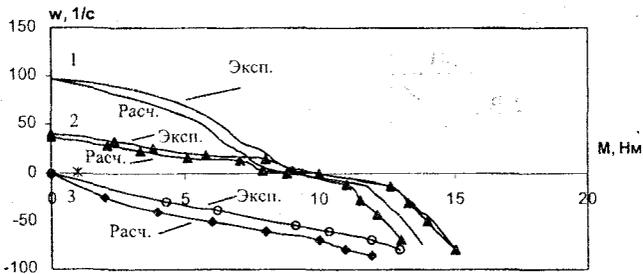


Рис. 10. Расчетные и экспериментальные механические характеристики электропривода: 1 – дроссельная характеристика; 2 – при  $U_{зад} = 1 \text{ В}$ ; 3 – при  $U_{зад} = -8 \text{ В}$

Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристик показало, что приведенная выше методика расчета характеристик электропривода дает удовлетворительные результаты.

Работа такого электропривода в крановых механизмах осуществляется в различных режимах. Подъем груза на пониженной скорости осуществляется в двигательном режиме, а спуск грузов на пониженной скорости в режиме торможения противовключением (тормозной спуск).

Электропривод с дросселем и регулятором скорости был успешно внедрен на различных промышленных предприятиях России (Челябинский трубопрокатный завод, Нижнетагильский металлургический комбинат, Нижнесергинский метизно-металлургический завод) и стран ближнего зарубежья (Харьковский завод ПТО).

**В четвертой главе** изложена проблема спуска легких грузов и методика её решения с помощью автоматизированного электропривода.

Так как спуск грузов на малой скорости осуществляется в режиме торможения противовключением, то порожний крюк, развивающий активный статический момент, зачастую не в состоянии преодолеть момент трения  $M_{тр}$ , развиваемый механизмом подъема, и спуск крюка с низкой посадочной скоростью проблематичен. Спуск порожнего крюка или с малым грузом приходится осуществ-

лять в режиме силового спуска при работе электродвигателя в двигательном режиме в направлении спуска.

Однако, как показала практика при работе с крановыми механизмами подъема, стоит только начать движение вниз порожнего крюка, как резко уменьшается момент трения  $M_{тр}$  и становится возможным переход на тормозной спуск. Для этого машинист крана должен включить командоаппарат в положение силового спуска, а затем уже при движении на спуск переключить командоаппарат в положение тормозного спуска. Возникает задача автоматизации спуска грузов.

На рис. 11 представлена функциональная схема автоматизированного дроссельного электропривода.

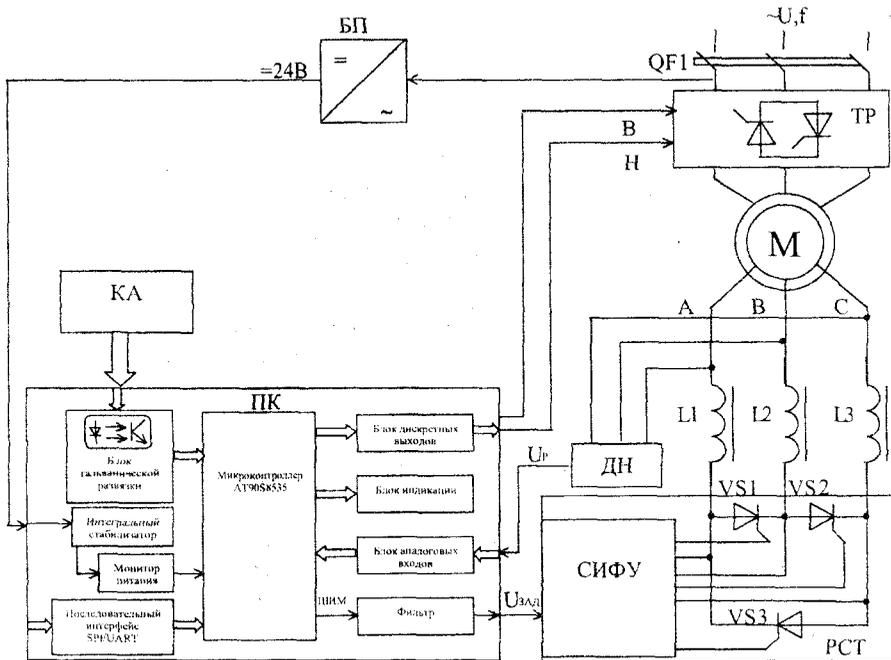


Рис. 11. Функциональная схема автоматизированного электропривода

В его состав входят: электродвигатель М; дроссель  $L1 - L3$ ; вводной автомат QF1; тиристорный регулятор скорости РСТ; тиристорный реверсор ТР; датчик напряжения ротора ДН; блок питания БП; командоаппарат КА; программируемый контроллер ПК. Основой программируемого контроллера ПК является микроконтроллер AT90S8535. В состав ПК входят также дополнительные блоки, реализованные на современной элементной базе.

Сама идея автоматизации спуска на малой скорости состоит в следующем. Какой бы не был груз, машинист ставит КА в положение спуска с пониженной скоростью. ПК включает реверсор для вращения М на подъем, устанавливает на-

пряжение задания, соответствующие этой скорости. Если груз преодолевает момент трения, то он будет раскручивать двигатель в направлении спуска,  $U_p$  станет больше  $U_{p0}$  (напряжение на неподвижном роторе). Двигатель будет работать в режиме торможения противовключением.

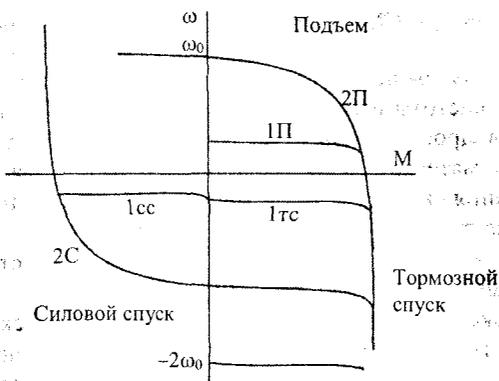


Рис. 12. Механические характеристики автоматизированного электропривода

Если же груз не преодолевает момента трения, то двигатель стоит,  $U_p = U_{p0}$  (признак неподвижного двигателя). Если двигатель неподвижен, ПК переключает реверсор для движения двигателя на спуск по характеристике  $1_{сc}$  (рис. 12). Происходит опускание груза. Если в результате уменьшения тормозного момента статический момент становится активным, груз сам начинает разгонять механизм, пытаясь вывести двигатель в режим рекуперативного торможения. Но на характеристике  $1_{сc}$  режим рекуперативного торможения может быть только при скоростях близких к  $-2\omega_0$  (рис. 12). Скорость груза увеличивается,  $U_p$  уменьшается. ПК контролирует эту ситуацию и переключает реверсор для включения двигателя на подъем и устанавливает напряжение задания, соответствующее тормозному спуску.

На основе выше описанных алгоритмов была создана программа для программируемого микроконтроллера. Разработанный автоматизированный электропривод был создан в виде шкафа управления и прошел успешные испытания на производственной базе ООО «Горнозаводской объединение».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Предложена инженерная методика определения полного сопротивления дросселя на основе теоретических исследований физических свойств, которая учитывает габаритные размеры, частоту и величину тока, протекающего по обмотке.

2. Установлено путем исследования электрических характеристик дросселя, что при изменении частоты и величины тока в роторной цепи во время пуско-тормозных режимов, дроссель позволяет ограничивать пусковой ток двигателя.

3. Разработана математическая модель электропривода на основе нового способа регулирования скорости асинхронного двигателя, которая учитывает особенности включения тиристоров в роторной цепи.

4. Предложена методика расчета статических характеристик электропривода, на основе разработанной математической модели.

5. Проведены экспериментальные исследования статических режимов работы электропривода на лабораторном стенде, показавшие высокую плавность регулирования скорости и широкий диапазон регулирования. Обоснована применимость разработанной методики расчета статических характеристик. Исследования электропривода в условиях производства подтвердили результаты, полученные на лабораторной установке.

6. Разработан алгоритм управлением дроссельным электроприводом с регулятором скорости, позволяющий учесть изменение момента трения в механизме.

7. Изготовлен автоматизированный дроссельный регулируемый электропривод с использованием программируемого контроллера. Экспериментальные исследования подтвердили обоснованность разработанного алгоритма.

### По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. Регулирование скорости дроссельного асинхронного электропривода / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, С.А. Фомин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – №7. – С. 63 – 66.

2. Регулятор скорости дроссельного асинхронного электропривода / А.М. Борисов Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, С.А. Фомин // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2004. – Вып. 8 – С. 21 – 27.

3. Фомин С.А. Автоматизация дроссельного асинхронного электропривода кранового механизма подъема // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2004. – Вып. 8 – С. 138 – 144.

4. Автоматизированный регулируемый асинхронный электропривод с индуктивным реостатом / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, С.А. Фомин, и др. //

Труды XIII научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2005. – С. 117 – 120.

5. Сравнительный анализ вариантов включения дросселей в асинхронных электроприводах / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, С.А. Фомин// Наука и технологии. Избранные труды Российской школы «К 70-летию Г.П. Вяткина». – М.: РАН, 2005, – С. 420 – 423.

Фомин Станислав Александрович

**КРАНОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ТИРИСТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ  
НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С ФАЗНЫМ РОТОРОМ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного  
университета

---

Подписано в печать 20.10.2005. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93. Уч-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 349/374.

---

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.