

На правах рукописи



ГУБЕНКОВ АЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПУСКОВОЙ АППАРАТУРЫ В СИСТЕМЕ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово - 2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет»

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор Ешин Евгений Константинович

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор Разгильдеев Г.И.,
кандидат технических наук, доцент Янцен В.И.

Ведущая организация: ОАО «НИИ взрывозащищенных электрических машин»

Защита состоится 10 марта 2005 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет».

Автореферат разослан 7 февраля 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Каширских В.Г.

Актуальность работы.

Структура системы электроснабжения с электродвигательной нагрузкой, например, очистного участка угольной шахты, включает в себя три основных компонента: питающий трансформатор, коммутационную аппаратуру и кабельные линии. Коммутационная аппаратура (КА) это компонент, который позволяет формировать структуру сети, производить включение или отключение нагрузки, управляя при этом ее состоянием.

Исключая аварийные ситуации в системе электроснабжения (СЭС) можно отметить, что стабильность электроснабжения приемников электрической энергии (асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором) прямо зависит от надёжности коммутационной аппаратуры, которая определяется *режимами* работы этой аппаратуры в системе электроснабжения с электродвигательной нагрузкой.

Известно, что режимы работы и характеристики асинхронного электродвигателя (АД), получающего питание через протяженную кабельную сеть, существенно отличаются от режимов работы и характеристик АД без кабеля.

Наличие кабельной сети в наибольшей степени влияет на состоянии АД в режимах, сопровождающихся значительными величинами токов электродвигателей. Примером такого режима работы может послужить пуск АД. Значительные величины пусковых токов обеспечивают рост падения напряжения на участке кабельной сети от силового трансформатора до электродвигателя и изменение уровней напряжения, как на статоре АД, так и на компонентах СЭС со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Процессы, происходящие при этом в электротехнических комплексах, состоящих из трансформатора, кабельной сети и электродвигателей, подробно рассмотрены в существующей технической литературе.

Вместе с тем следует отметить, что в этих работах не учитывалось возможное реальное влияние изменений *режимов работы* коммутационной аппаратуры (пускателей) на режимы работы АД несмотря на то, что при изменении уровня напряжений на компонентах СЭС, из-за наличия протяженной кабельной сети, в определенных режимах работы АД изменяется состояние электромагнитных систем и электродвигателя и пускателя.

При питании АД через протяженную кабельную сеть пускатель и АД становятся взаимозависимыми элементами электротехнического комплекса: **АД - кабель - пускатель - кабель (АДКПК).**

В качестве примера можно привести пуск АД через протяжённую кабельную сеть. Пусковые токи АД вызывают падение напряжения на участках кабеля, при этом происходит снижение статорного напряжения на АД и снижение напряжения на втягивающей обмотке электромагнита пускателя. Если напряжение на обмотке электромагнита пускателя станет менее $0,8U_{\text{н}}$, то электромагнитная сила притяжения уменьшится и может стать ниже значения статической противодействующей силы возвратного механизма. В этом случае произойдёт размыкание магнитной системы и отключение нагрузки, что в свою очередь может повлечь распад всего технологического процесса.

В существующей технической литературе математические описания АД и КА изложены обособленно друг от друга. Соответственно, расчёт КА и расчёт систем электроприводов горно-транспортных машин производится раздельно. До настоящего времени ни в зарубежной, ни в отечественной литературе нет единого математического описания электротехнического комплекса, состоящего из электродвигателя - кабеля - пускателя - кабеля, в котором производится учёт режимов работы пускателя (коммутационной аппаратуры).

В большинстве случаев в известных моделях пускатель рассматривается как логический элемент (включено/отключено) с внутренним сопротивлением, ограничивающим статорные токи АД. При этом влияние изменения напряжения в сети на сам пускатель не учитывают. В этой связи возникает необходимость выполнения работ по дальнейшему совершенствованию существующих моделей электротехнических комплексов в части введения в их структуру соответствующих математических моделей коммутационной аппаратуры.

Таким образом, можно считать, что процессы в электротехническом комплексе АДКПК недостаточно изучены и в этой связи необходимо:

- разработать математическую модель комплекса АДКПК, учитывающую изменяющиеся режимы работы коммутационной аппаратуры в СЭС с электродвигательной нагрузкой;

учитывая потенциальную сложность математической модели комплекса АДКПК - разработать компьютерную модель комплекса и использовать ее для разработки программного инструментария, позволяющего в инженерной практике выполнять расчеты динамических режимов работы СЭС;

выполнить анализ режимов работы пусковой аппаратуры и установить зависимости, определяющие области устойчивой работы СЭС.

Цель работы

Разработка методов и средств исследования режимов работы пусковой аппаратуры и учета их влияния на состояние систем электроснабжения с электродвигательной нагрузкой, направленных на повышение уровня эксплуатации СЭС и для использования их в проектной практике.

Идея работы

Состоит в создании и применении универсальных имитационных средств моделирования для исследования условий работы пусковой аппаратуры в СЭС с электродвигательной нагрузкой, основанных на полном взаимосвязанном математическом описании каждого из компонентов сети.

Основные научные положения

1. Моделирование системы передачи и электромеханического преобразования энергии компонентами СЭС "АД - кабель - пускатель - кабель" в виде системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений переменной структуры, в которой учтены условия работы пусковой аппаратуры, является основой для изучения процессов формирования динамической нагруженности¹ компонентов СЭС.

Нагруженность - состояние объекта, обусловленное внешними воздействиями и условиями функционирования (ГОСТ 27609-88)

2. Оценка состояния компонентов СЭС с электродвигательной нагрузкой в динамических режимах может производиться на основе разработанной математической модели, которая комплексно учитывает явления, связанные с влиянием пусковой аппаратуры на состояние компонентов СЭС и базируется на специально разработанных методах учета этих явлений.

3. Выявленные зависимости для оценки режимов работы системы: времени срабатывания приводного электромагнита, встроенного в контактор пускателя; времени восстановления напряжения на комплексе после запуска АД; времени возврата якоря; времени замыкания главных контактов пускателя; времени срабатывания нулевой защиты для различных длин кабельного участка и режимов пуска АД, - позволяют: установить предел длины кабельной линии, при которой неуправляемый запуск АД при помощи пускателя возможен; установить время срабатывания нулевой защиты в пускателе при любых режимах работы комплекса; оценить состояние контактора пускателя и АД и стабильность их работы в предельных режимах эксплуатации.

Методы исследований

При выполнении работы использовались математические и экспериментальные методы исследований. Вопросы моделирования динамических систем высокого порядка решались на основе численных методов решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, численных методов решения линейных и нелинейных алгебраических уравнений. При разработке математической модели пускателя использовались численные методы расчёта: магнитных цепей; динамических характеристик электрической дуги; динамических характеристик электромагнита пускателя. Математическое описание компонентов системы основывается на теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии.

Научная новизна

1. Разработана комплексная математическая модель, описывающая компоненты СЭС, состоящей из **электродвигателя - кабеля - пускателя - кабеля** с учётом режимов работы пусковой аппаратуры.

2. Получены зависимости: времени срабатывания приводного электромагнита встроенного в контактор пускателя; времени восстановления напряжения на комплексе после запуска АД; времени возврата якоря в исходное положение; времени замыкания главных контактов пускателя; времени срабатывания нулевой защиты для различных длин кабельного участка и режимов пуска АД.

3. Произведена оценка влияния: уровня питающего напряжения; времени включения и отключения форсировочного реле; начального и конечного нажатия на главные контакты; величины добавочного сопротивления, включаемого в цепь питания обмоток электромагнита пусковой аппаратуры на режимы пуска и отключения АД.

Практическая ценность заключается:

1. В разработке математических моделей и методов исследований, позволяющих выполнить на этапе проектирования оценку режимов работы пусковой аппаратуры в шахтной СЭС;

2. В разработке средств эффективного определения изменений параметров состояния комплекса при различных длинах кабельного участка, что обеспечивает уточнение характера нагруженности компонентов СЭС;

3. В разработке программного средства для исследования режимов работы пусковой аппаратуры в СЭС горных машин;

4. В установлении зависимостей работы комплекса АДКПК во время переходных процессов.

Достоверность научных положений и выводов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов, полученных на основе вычислительных экспериментов с использованием современных математических методов, ЭВМ и средств моделирования с экспериментальными результатами.

Реализация результатов

На основе предложенной в диссертационной работе математической модели системы АДКПК, в НИИ Взрывозащищенных Электрических Машин (г. Кемерово) внедрено программное средство, позволяющее моделировать условия работы пусковой аппаратуры в системах электроснабжения с электродвигательной нагрузкой.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на: IV Всероссийской научно-практической конференции «AS' 2003 Системы Автоматизации в образовании, науке и производстве» (г. Новокузнецк, 2003 г.), IX Международной открытой научной конференции. «Современные проблемы информатизации в технике и технологиях» (г. Воронеж, 2004 г.), 49-й научно-практической конференции (ГУ КузГТУ г. Кемерово, 19-24 апреля 2004 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика и энергосберегающие технологии» (г. Липецк, 29-30 апреля 2004г.).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 9 печатных работ, в том числе получено Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ (РОСПАТЕНТ) и Свидетельство об отраслевой регистрации разработки (Отраслевой фонд алгоритмов и программ Государственного координационного центра информационных технологий Минобразования России).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения, изложенных на 134 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка, 2 таблицы, список литературы, включающий 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулирована цель работы и приведена характеристика структуры диссертации.

В первой главе рассматривается проблема, существующие методы и программные средства анализа режимов работы пусковой аппаратуры в шахтных СЭС с электродвигательной нагрузкой.

Анализ технической литературы по проблеме исследования режимов работы пусковой аппаратуры в СЭС горных машин показывает, что шахтные

СЭС, в сравнении с общепромышленными, имеют отличительные особенности эксплуатации, обусловленные: преобладанием мощных электродвигателей, имеющих широкий спектр нагрузок; высокими коммутационными перенапряжениями; ограниченностью мощности источника питания; разветвленностью топологических схем СЭС. Динамические процессы, происходящие в мощных АД, негативно влияют на условия работы КА в составе СЭС.

Существующие методики расчёта и оценки режимов работы КА в СЭС с электродвигательной нагрузкой базируются на данных расчётов статических режимов работы комплекса электродвигатель-кабель-пускатель-кабель с учётом максимальных пусковых токов АД, что приводит к значительным погрешностям в оценке режимов работы КА.

Из существующих методик анализа динамических процессов в СЭС с электродвигательной нагрузкой наиболее точные результаты могут быть получены на основе использования математических моделей, базирующихся на теории обобщенного электромеханического преобразования энергии.

Анализ средств автоматизации расчетов режимов работы КА показал,

что в настоящее время отсутствуют специализированные программные средства, позволяющие моделировать динамические процессы, протекающие в комплексе АДКПК при различных режимах работы.

На основании анализа публикаций и материалов по теме диссертации сформулированы цели и задачи исследования, а также требования к разрабатываемому программному средству.

Во второй главе описывается процесс разработки математической модели комплекса АДКПК (см. рисунок 1), устанавливаются зависимости работы комплекса при различных длинах присоединительного кабеля. На основе полученных зависимостей устанавливается предельная длина кабельной линии, при которой нерегулируемый запуск АД с помощью рудничного пускателя возможен, устанавливается время срабатывания нулевой защиты комплекса, время восстановления питающего напряжения до номинального, после запуска АД.

Элементы комплекса АДКПК, электродвигатель и электромагнит, встроенный в контактор пускателя, математически описываются на основе теории обобщенного электромеханического пре-

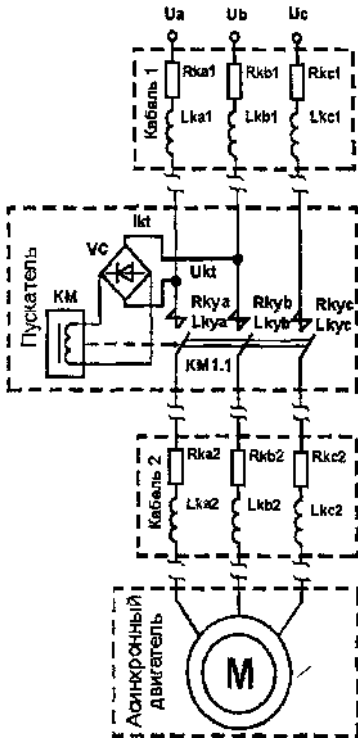


Рисунок 1 - Схема АД с кабелем и устройством коммутации е статорной цепи

образователя энергии. Классическая модель Парка - Горева используется для математического описания АД в комплексе. Учёт несимметричных режимов работы комплекса, таких как запуск АД при помощи контактора пускателя и его отключение, производится путём дополнения модели Парка - Горева уравнением, характеризующим асимметрию источника энергии.

Кроме того, представленный на рисунке 1 комплекс содержит дополнительные сопротивления межконтактного промежутка $R_{ky\alpha}, R_{ky\beta}, R_{ky\gamma}, L_{ky\alpha}, L_{ky\beta}, L_{ky\gamma}$ (электрической дуги), а также сопротивления начального и конечного участка силового кабеля (на рисунке 1 обозначено как «кабель 1» и «кабель 2»), которые учитываются в модели АД при её построении.

На рисунке 1 обозначено: U_{ka}, I_{ka} - напряжение и ток питания обмотки контактора пускателя; KM - электромагнит контактора постоянного тока, $KM1.1$ - главные контакты контактора; VC - выпрямительный мост.

Так как математическое описание АД для различных фаз идентично, дифференциальные уравнения АД в (1) приведены лишь для фазы α .

В (1) обозначено: $\psi_{sa}, \psi_{s\beta}, \psi_{s\gamma}, \psi_{ra}, \psi_{r\beta}, \psi_{r\gamma}$ - потокосцепления статора и ротора по осям системы координат α, β, γ ; $u_\alpha, u_\beta, u_\gamma$ - симметричная трёхфазная система напряжений; $i_{sa}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}, i_{ra}, i_{r\beta}, i_{r\gamma}$ - составляющие токов обмоток статора и ротора; r_s, r_r - активные сопротивления обмоток статора и ротора АД; L_M - взаимоиндуктивность обмоток статора и ротора; ω - угловая скорость вращения ротора АД;

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{sa}}{dt} &= u_\alpha - u_0 - r_s i_{sa} - L_a \frac{di_{sa}}{dt} - R_a i_{sa}; \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} &= -r_r i_{ra} - \frac{p_{\Pi} \omega}{\sqrt{3}} (\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma}); \\ u_0 &= \sum_{x=\alpha, \beta, \gamma} \left(u_X - L_X \frac{di_{sX}}{dt} - R_X i_{sX} \right) / 3; \\ M_{эл} &= p_{\Pi} \left[(i_{sa} i_{r\gamma} + i_{s\beta} i_{r\alpha} + i_{s\gamma} i_{r\beta}) - \right. \\ &\quad \left. - (i_{sa} i_{r\beta} + i_{s\beta} i_{r\gamma} + i_{s\gamma} i_{r\alpha}) \right] \frac{\sqrt{3}}{2} L_M; \\ \|\psi\| &= \|L\| \cdot \|i\|; \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\|\psi\| = \begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{s\gamma} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{r\beta} \\ \psi_{r\gamma} \end{pmatrix}; \quad \|i\| = \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{s\beta} \\ i_{s\gamma} \\ i_{ra} \\ i_{r\beta} \\ i_{r\gamma} \end{pmatrix}; \quad \|L\| = \begin{pmatrix} L_m + L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_m + L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_m + L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m \\ L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m + L_r & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m + L_r & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m + L_r \end{pmatrix}$$

- матрицы потокосцеплений $\|\psi\|$ и токов $\|i\|$ статора и ротора АД; $\|L\|$ - матрица коэффициентов индуктивностей АД; L_s, L_r - индуктивности обмоток статора и ротора; u_0 - точка смещения статорных напряжений, подстрочный символ X в уравнении u_0 может принимать значения $X=\alpha, \beta, \gamma$ и обозначает признаки принадлежности, соответственно, к фазам α, β или γ ; $M_{эл}$ - электромагнитный момент; p_{Π} - число пар полюсов; $R_\alpha = R_{ka1} + R_{ky\alpha} + R_{ka2}$; $R_\beta = R_{k\beta1} + R_{ky\beta} + R_{k\beta2}$; $R_\gamma = R_{k\gamma1} + R_{k\gamma\epsilon} + R_{k\gamma2}$; $L_\alpha = L_{k\alpha1} + L_{ky\alpha} + L_{k\alpha2}$; $L_\beta = L_{k\beta1} + L_{ky\beta} + L_{k\beta2}$;

$L_{\gamma} = L_{k\gamma 1} + L_{k\gamma \gamma} + L_{k\gamma 2}$ - активные и индуктивные сопротивления силовой цепи питания АД; $R_{k\alpha}, R_{k\beta}, R_{k\gamma}$ активное сопротивление кабельной линии; $L_{k\alpha}, L_{k\beta}, L_{k\gamma}$ - индуктивность кабельной линии;

Математическая модель электромагнита постоянного тока, встроенного в контактор пускателя описывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = U_{kt} - i(\psi, x)R, \\ \frac{dx}{dt} = v, \\ \frac{dv}{dt} = \frac{P_{em}(\psi, x) + P_m - P_{mh}}{M}, \end{cases} \quad (2)$$

где: U_{kt} - напряжение питания электромагнита; ψ - потокосцепление втягивающей обмотки; x - расстояние между якорем контактора и полюсными наконечниками магнитной системы (магнитный зазор); v - скорость движения якоря; P_{em} - электромагнитная сила; P_m - вес якоря, в зависимости от рассматриваемой конструкции контактора может действовать в ту же сторону, что и электромагнитная сила или в противоположную ей сторону; P_{mh} - суммарная сила механизма, противодействующая электромагнитной; M - масса якоря и подвижной системы (траверсы).

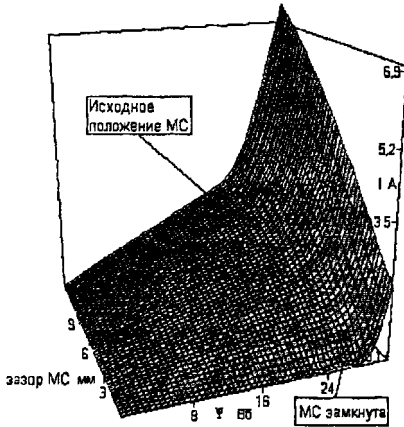


Рисунок 2 - Зависимость тока I , от потокосцепления Ψ , при различных положениях якоря x электромагнита

функции $i_{kt}(\psi_{kt}, x_{kt})$ и $P_{em}(\psi_{kt}, x_{kt})$.

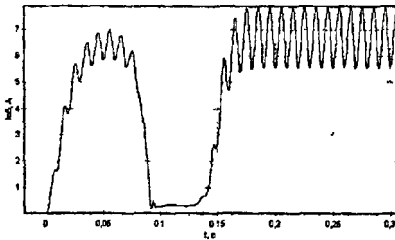


Рисунок 3 - Пусковой ток включения электромагнита контактора КТУ-4Б

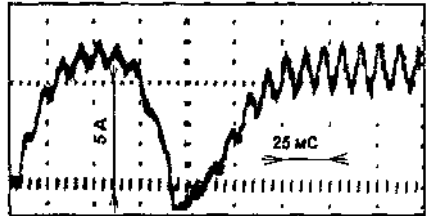


Рисунок 4 - Осциллограмма пускового тока включения электромагнита контактора КТУ-4Б

На рисунке 2 показана двумерная сплайн-интерполяция статических характеристик потокоцепления обмотки электромагнита от величины питающего её тока при различных зазорах магнитной системы (МС). На рисунках 3 и 4, соответственно, показаны результаты моделирования и эксперимента пускового тока включения электромагнита контактора КТУ-4Б. Расхождение между результатами моделирования и результатами эксперимента находится в пределах инженерной погрешности.

Для синтеза математической модели АДКПК необходимо определить её со следующими условиями и ограничениями: расположение коммутационного устройства на кабельном участке может быть произвольным; влиянием тока управления коммутационного устройства на силовую цепь можно пренебречь, т.к. пусковой и рабочий ток коммутационного аппарата на 3-4 порядка меньше, соответственно, пускового и рабочего тока асинхронной машины; асинхронный двигатель и коммутационный аппарат получают питание через один кабельный участок, следовательно, начиная с момента включения и заканчивая моментом отключения коммутационного аппарата, они электрически связаны и влияют на работу друг друга.

Совместное математическое описание электромеханических преобразователей энергии: АД и электромагнита пускателя, можно получить в результате математической записи уравнений Кирхгофа для электрических цепей, представленных на рисунке 1.

Для этого необходимо преобразовать (1) относительно первых производных потокоцеплений АД. Чтобы это сделать, нужно из матрицы потокоцеплений (последнее уравнение в системе 1) выразить токи АД, продифференцировать их и полученные производные токов подставить в уравнения статора асинхронной машины. В результате получим математическое описание АД комплекса в следующем виде:

$$\begin{array}{c}
 \frac{1}{3D} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline (L_\beta + L_\gamma)C - 2AL_\alpha - 3D & AL_\beta + (L_\gamma - 2L_\alpha)C & AL_\gamma + (L_\beta - 2L_\alpha)C & L_m(4L_\alpha + L_\beta + L_\gamma) \\ \hline AL_\alpha + (L_\gamma - 2L_\beta)C & (L_\alpha + L_\gamma)C - 2AL_\beta - 3D & AL_\gamma + (L_\alpha - 2L_\beta)C & L_m(L_\gamma - 2(L_\alpha + L_\beta)) \\ \hline AL_\alpha + (L_\beta - 2L_\gamma)C & AL_\beta + (L_\alpha - 2L_\gamma)C & (L_\alpha + L_\beta)C - 2AL_\gamma - 3D & L_m(L_\beta - 2(L_\alpha + L_\gamma)) \\ \hline 0 & 0 & 0 & 3D \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{|c|c|} \hline L_m(L_\gamma - 2(L_\alpha + L_\beta)) & L_m(L_\beta - 2(L_\alpha + L_\gamma)) \\ \hline L_m(L_\alpha + 4L_\beta + L_\gamma) & L_m(L_\alpha - 2(L_\gamma + L_\beta)) \\ \hline L_m(L_\alpha - 2(L_\gamma + L_\beta)) & L_m(L_\alpha + L_\beta + 4L_\gamma) \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 3D & 0 \\ \hline 0 & 3D \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \frac{d\psi_{sa}}{dt} \\ \hline \frac{d\psi_{sb}}{dt} \\ \hline \frac{d\psi_{sa}}{dt} \\ \hline \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ \hline \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\ \hline \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ \hline \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \frac{1}{3}(I_{sa}(3R_s + 2R_\alpha) - I_{sb}R_\beta - I_{sr}R_\gamma - 2U_\alpha + U_\beta + U_\gamma) \\ \hline \frac{1}{3}(-I_{sa}R_\alpha + I_{sb}(3R_s + 2R_\beta) - I_{sr}R_\gamma + U_\alpha - 2U_\beta + U_\gamma) \\ \hline \frac{1}{3}(-I_{sa}R_\alpha - I_{sb}R_\beta + I_{sr}(3R_s + 2R_\gamma) + U_\alpha + U_\beta - 2U_\gamma) \\ \hline -r_r I_{ra} - \frac{2p\omega}{\sqrt{3}}(\psi_{rb} - \psi_{rr}) \\ \hline -r_r I_{rb} - \frac{2p\omega}{\sqrt{3}}(\psi_{rr} - \psi_{ra}) \\ \hline -r_r I_{rr} - \frac{2p\omega}{\sqrt{3}}(\psi_{ra} - \psi_{rb}) \\ \hline \end{array} \quad (3)
 \end{array}$$

Для получения математической модели схемы, представленной на рисунке 1, необходимо дополнить систему уравнений (3):

- уравнениями электрической дуги в межконтактном промежутке пускателя;

- дифференциальными уравнениями приводного электромагнита, встроенного в контактор пускателя, расположенного в статорной цепи АД.

Учёт сопротивления электрической дуги в межконтактном промежутке описывается при помощи зависимостей Майра. Модель электрической дуги Майра задаёт неизменным радиус дуги, а температуру дуги, изменяющейся во времени и по радиусу и зависящей от величины тока дуги ($r_d = const$, и $T \rightarrow var$ при $i_d \rightarrow var$).

Активное сопротивление дуги по модели Майра, для синусоидального тока $i_d = \sqrt{3}I_0 \sin(2\pi ft)$, описывается следующим выражением:

$$R_d = \frac{P_0 H_d [1 + 4(2\pi f - \varphi)^2 \Theta^2]}{3I_0^2 [2(2\pi f - \varphi)^2 \Theta^2 + \sin(2\pi ft - \varphi)^2 - (2\pi f - \varphi)\Theta \sin(4\pi ft - 2\varphi)]}, \quad (4) \quad \begin{array}{l} \text{где } P_0 - \text{удельная} \\ \text{отводимая} \\ \text{мощность;} \end{array}$$

Θ – тепловая постоянная времени дуги; f – промышленная частота питающей сети; t – время; I_0 – действующее значение коммутируемого тока; φ – угол сдвига фазы между током и напряжением. В аппаратах низкого напряжения $P_0 = 5-100 \text{ кВт/см}$; $\Theta = 50 \pm 200 \text{ мкс}$; H_d – высота столба дуги.

Считается, что сопротивление горячей дуги на низких частотах имеет преимущественно активный характер, а её индуктивность стремится к нулю.

Функцию, описывающую процесс коммутации можно представить двумя системами уравнений:

$$R_{ky} = \begin{cases} 0.001, & \text{если } x_{kl} < x_{min}, \\ \frac{P_0 H_d [1 + 4(2\pi f - \varphi)^2 \Theta^2]}{3I_0^2 [2(2\pi f - \varphi)^2 \Theta^2 + \sin(2\pi ft - \varphi)^2 - (2\pi f - \varphi)\Theta \sin(4\pi ft - 2\varphi)]}, & \text{если } x_{kl} \geq x_{min} \end{cases}, \quad (5)$$

$$L_{ky} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{kl} < x_{min}, \\ \frac{P_0 H_d [1 + 4(2\pi f - \varphi)^2 \Theta^2]}{3(100I_0)^2 [2(2\pi f - \varphi)^2 \Theta^2 + \sin(2\pi ft - \varphi)^2 - (2\pi f - \varphi)\Theta \sin(4\pi ft - 2\varphi)]}, & \text{если } x_{kl} \geq x_{min} \end{cases}, \quad (6)$$

где: x_{min} – минимальный зазор магнитной системы, при котором главные контакты контактора остаются замкнутыми.

$$U_{kl} = \frac{1}{D} \left[(L_\beta C - L_\alpha A) \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + (L_\beta A - L_\alpha C) \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + C(L_\beta - L_\alpha) \cdot \right. \\ \left. \cdot \frac{d\psi_{rc}}{dt} + L_m \left(2I_\alpha + L_\beta \right) \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - (L_\alpha + 2L_\beta) \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \right. \\ \left. + (L_\beta - L_\alpha) \frac{d\psi_{rc}}{dt} \right] - I_{\alpha} R_\alpha + U_\alpha + I_{\beta} R_\beta - U_\beta, \quad (7)$$

Электромагнит пускателя питается выпрямленным двухполупериодным током через диодный мост VC (см. рисунок 1). Напряжение

питания электромагнита – линейное, выпрямленное, следовательно: $U_{kl} = |U_{AB}| = |U_{SA} - U_{SB}|$. Преобразовывая последнее выражение через первые про-

изводные потокосцеплений статора АД, получаем напряжение питания электромагнита контактора (7).

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{\alpha}}{dt} &= \frac{1}{D} \left[(L_{\beta}C - L_{\alpha}A) \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} + (L_{\beta}A - L_{\alpha}C) \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + \right. \\ &+ C(L_{\beta} - L_{\alpha}) \frac{d\psi_{sc}}{dt} + Lm \left(2L_{\alpha} + L_{\beta} \right) \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - (L_{\alpha} + 2L_{\beta}) \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + \\ &\left. + (L_{\beta} - L_{\alpha}) \frac{d\psi_{rc}}{dt} \right] - I_{\alpha}R_{\alpha} + U_{\alpha} + I_{s\beta}R_{\beta} - U_{\beta} - i_{\alpha}(\psi_{\alpha}, x_{\alpha})R_{\alpha}, \quad (8) \\ \frac{dx_{\alpha}}{dt} &= v, \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{P_{em}(\psi_{\alpha}, x_{\alpha}) + P_m - P_{mh}}{M} \end{aligned} \right.$$

Подставляя (7) в (2) получим модель электромагнита контактора пускателя (8) системы, отображённой на рисунке 1.

Объединяя (3), (5), (6) и (8) в одну систему уравнений, а также дополняя её основным уравнением движения электропривода:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{эл} \pm M_C,$$

получим математическое описание комплекса АДКПК.

На основе полученной модели был произведён расчёт семейства динамических характеристик комплекса при различных длинах кабельного участка и получены зависимости (рисунок 5), отражающие особенности работы комплекса в динамике. В качестве примера для расчёта взят АД типа ДКВ250КМ, номинальной мощностью 200кВт; пускатель типа ПВИ-250Б со встроенным контактором КТУ-4Б. Длина кабеля изменяется от 0 до 300 м. Пускатель располагается вместе с АД в конце кабельной линии.

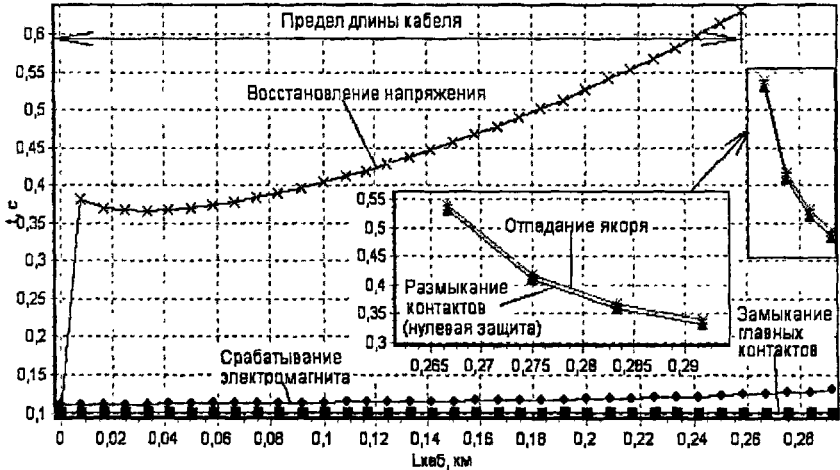


Рисунок 5 - Зависимости времени восстановления напряжения, возврата якоря, замыкания и размыкания (срабатывания нулевой защиты) главных контактов контактора от длины питающего кабеля

Учёт паразитной ёмкости сети производится путем математической записи уравнений Кирхгофа для межфазных ёмкостей кабельной линии и ста-

торных обмоток АД и добавления этих уравнений в общее математическое описание комплекса АДКПК.

В третьей главе описывается процесс разработки математической модели типового электромеханического модуля (ТЭМ) системы электроснабжения. Каждый двигатель и пускатель в ТЭМ (рисунок 6) представляют собой взаимозависимый комплекс, рассмотренный в главе 2.

Синтез математической модели ТЭМ производится следующим образом. Сначала производится запись уравнений для i-ого АД в ТЭМ. Статорные токи i-ого АД задаются выражением (9), которое определяет величину общего тока

$$Ik\alpha = \sum_{j=1}^N Is\alpha_j; Ik\beta = \sum_{j=1}^N Is\beta_j; Ik\gamma = \sum_{j=1}^N Is\gamma_j, \quad (9)$$

кабельного участка. Производится решение полученной системы уравнений

относительно первых производных потокоцеплений АД.

Далее производится запись уравнений для i-ого пускателя в ТЭМ. Напряжение питания i-ого электромагнита пускателя линейное, выпрямленное и по величине одинаково для всех пускателей и равно статорному напряжению i-ого АД. Производится его запись через первые производные потокоцепления АД.

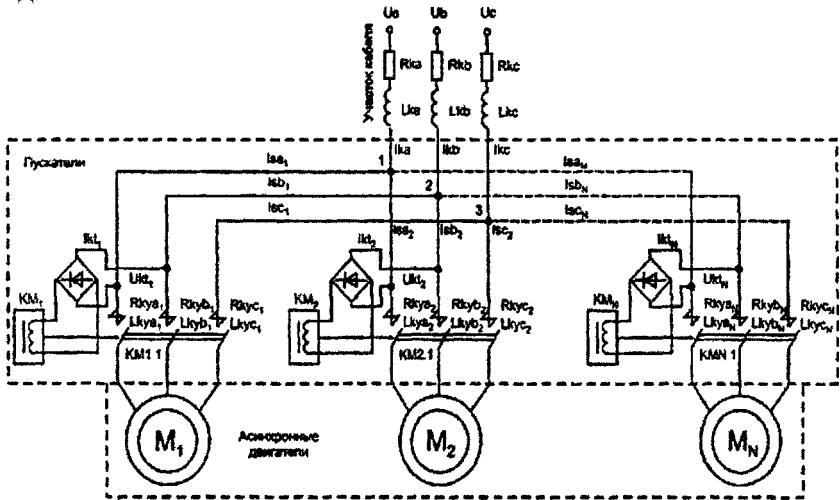


Рисунок 6 - Типовой электромеханический модуль шахтной системы электроснабжения

Затем производится запись уравнений для электрической дуги, возникающей в i-ом пускателе на основе уравнения Майра.

Объединение полученных уравнений в общую систему представляет собой математическую модель ТЭМ с учётом режимов работы КА.

Результаты моделирования режима включения ТЭМ, состоящего из трёх АД и пускателей, представлены на рисунках 7-10. Выбраны следующие параметры моделирования системы. Двигатели: тип первого АД - АВР280Л4 мощность 160 кВт; второго АД - ДКВ45 мощность 45 кВт; третьего АД -

ДВК355LB4 мощность 315 кВт. Протяженность кабельного участка - 400 м, сечение кабеля **70 мм²**. В качестве коммутационного аппарата для всех АД выбран пускатель типа ПВИ-250Б со встроенным контактором КТУ-4Б. Время расчета переходного процесса - 1,4 с.

Запуск двигателей производится в следующей последовательности, первый пускатель включается в нулевой момент времени, второй - спустя 0,1 с, третий - в 0,3 с.

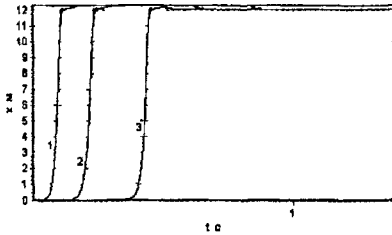


Рисунок 7 - Перемещения якорей контакторов

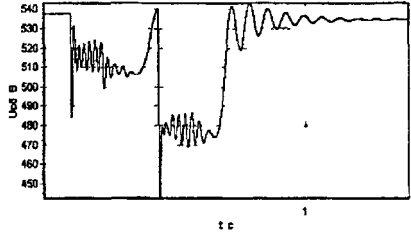


Рисунок 8 - Напряжение питания обмоток электромагнитов

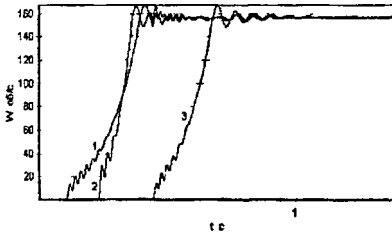


Рисунок 9 - Скорости вращения АД

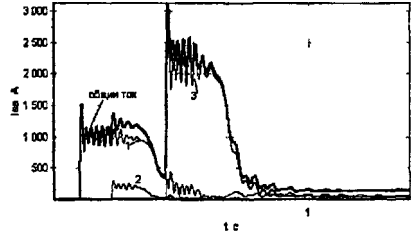


Рисунок 10 - Токи системы

В четвертой главе описано разработанное программное средство моделирования режимов работы пусковой аппаратуры «Модель АД с кабелем и пускателем в статорной цепи», предназначенное для исследования переходных процессов в СЭС горных машин. Интерфейс программного средства показан на рисунке 11.

В программном средстве параметры модели задаются в окне свойств текущей модели. После задания всех параметров можно приступить к расчету динамических характеристик имитационной модели комплекса АДКПК. Полученные результаты автоматически сохраняются в виде базы данных числовых значений на жестком диске ЭВМ, а также отображаются в графическом виде в «Окне динамических характеристик» или в виде поверхностей характеристик в «Окне поверхности».

После того, как произведен расчет модели, можно устанавливать его зависимости работы. В этом случае запускается алгоритм методики нахождения зависимостей комплекса, заключающейся в следующем. Программа начинает перебор и анализ сохраненной базы данных числовых расчетов, фиксирует изменения, произошедшие в состоянии комплекса, например: замыкание главных контактов, произошло в такой-то момент времени, последующее их размыкание - в такой, или уровень напряжения на обмотке

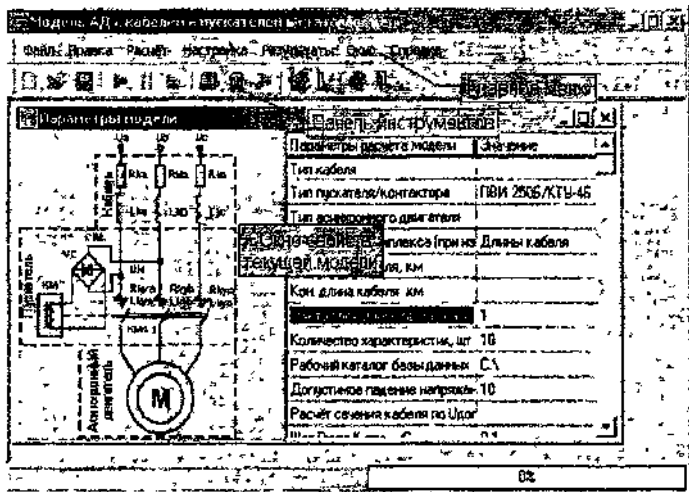


Рисунок 11 - Интерфейс программы «Модель АД с кабелем и пускателем в статорной цепи»

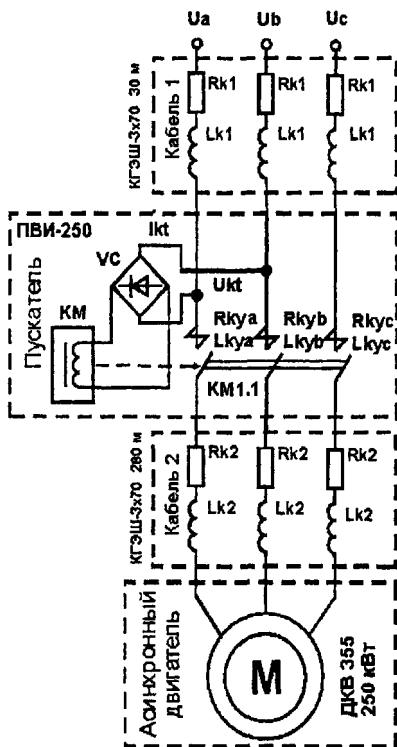


Рисунок 12 - Схема комплекса АДКПК

контактора восстановился до номинальных значений (после запуска АД) в такой-то момент времени, и т.д. На основе этих данных, на графике зависимостей откладываются точки, отражающие текущее состояние комплекса. Набор таких точек для одного параметра, например для времени замыкания магнитной системы, будет *искомой зависимостью* времени срабатывания электромагнита

В пятой главе приведены и проанализированы результаты вычислительного эксперимента, проведенного с целью определения работоспособности математической модели комплекса АДКПК. Расчёт производился на примере участка СЭС изображённого на рисунке 12. В качестве режима работы двигателя выбран перерыв питания с последующим восстановлением системы.

Такой режим выбран из следующих соображений. Возможность электромеханической системы восстанавливаться после кратковременного снижения напряжения отмечается как очень важная, а порой и жизненно необходимая для системы функция.

Восстановление системы, в случае кратковременного исчезновения напряжения, зависит от времени срабатывания нулевой защиты в рудничном пускателе. Если нулевая защита срабатывает, то автоматического восстановления электромагнитической системы не произойдёт. Напряжение отпадания контактов пускателей строго не регламентировано. Оно зависит от конструктивных особенностей этих аппаратов, от состояния магнитной системы, от регулировки контактной системы, натяжения пружин и меняется в достаточно широких пределах: 0,6 - 0,35 от номинального.

Результаты экспериментов приведены на рисунках 13-16.

В момент времени $t \approx 0,6с.$ исчезает напряжение питания, подаваемое на комплекс. В этот момент времени комплекс находится в следующем состоянии: напряжение питания комплекса равно нулю, главные контакты пускателя замкнуты, ротор АД продолжает вращаться со скоростью близкой к номинальной, на статоре АД присутствует ЭДС, величина которой близка к амплитудному значению сети.

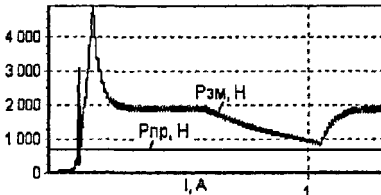


Рисунок 13- Электромагнитная сила притяжения якоря к магнитной системе и статические противодействующие силы

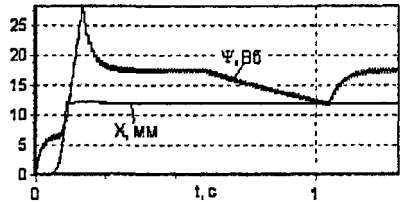


Рисунок 14— Потокосцепление обмотки Ψ и положение X якоря электромагнита

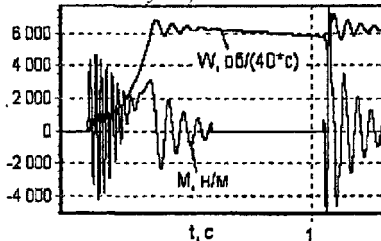


Рисунок 15- Электромагнитный момент M и скорость вращения W ротора

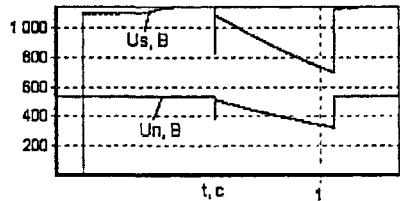


Рисунок 16- Напряжение на статорных обмотках АД U_s и питающее напряжение электромагнита U_n

В момент исчезновения напряжения на комплексе электромагнит контактора получает питание через кабельную линию от статора АД и развивает электромагнитную силу притяжения, пропорциональную остаточной ЭДС (рисунок 16), которая зависит от скорости вращения ротора (рисунок 15) и постепенно убывает (рисунок 13).

Время перерыва питания равно: $t_{\text{леп}} = 0,45с.$, за это время остаточная ЭДС статора не успевает снизиться до значений, менее напряжения удержания якоря электромагнита, и магнитная система остаётся в замкнутом положении. Элек-

ромагнитная сила притяжения якоря не успевает уменьшиться до значений, менее суммарных статических противодействующих сил электромагнита (рисунк 13), нулевая защита в пускателе не срабатывает и не отключает главные контакты пускателя.

После того как напряжение питания на комплексе восстановится, произойдет восстановление работы электромеханической системы после кратковременного снижения напряжения.

Длительность перерыва питания, в течение которого комплекс обладает способностью к самовосстановлению, зависит от следующих факторов:

- скорости затухания электромагнитного поля АД;
- темпа замедления вращения ротора;
- скорости затухания электромагнитного поля приводного электромагнита встроенного в контактор пускателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основе математических моделей электродвигателя и приводного электромагнита, встроенного в контактор пускателя, разработана взаимозависимая математическая модель АДКПК и решена задача разработки методов и средств, предназначенных для исследования режимов работы пусковой аппаратуры в СЭС с электродвигательной нагрузкой.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты, выводы и рекомендации:

1. Разработана математическая модель взаимозависимого комплекса АДКПК, учитывающая изменение режимов работы пусковой аппаратуры в СЭС с электродвигательной нагрузкой;

2. Разработана методика нахождения основных зависимостей работы комплекса. Выявленные зависимости позволяют:

- установить предел длины кабельной линии, при которой неуправляемый запуск АД при помощи пускателя возможен;
- установить время срабатывания нулевой защиты в пускателе при любых режимах работы комплекса;
- оценить состояние контактора пускателя и АД и стабильность их работы в предельных режимах эксплуатации;

3. Разработано программное средство для моделирования и исследования режимов работы пусковой аппаратуры в СЭС с электродвигательной нагрузкой, позволяющее в инженерной практике рассчитывать динамические характеристики СЭС, в которой учитываются условия работы пусковой аппаратуры;

4. Найден предел длины кабельной линии, при которой неуправляемый запуск АД при помощи пускателя возможен и определено время срабатывания нулевой защиты в пускателе в зависимости от длины кабельной линии, для любых режимов работы АД;

5. Даны рекомендации по увеличению предельной длины кабельной линии, по увеличению времени восстановления комплекса после кратковременного перерыва питания;

6. Исследовано влияние параметров схемы электроснабжения и параметров контактора пускателя на состояние контактора пускателя и АД и стабильность их работы в предельных режимах;

7. Разработанное программное средство для моделирования и исследования режимов работы пусковой аппаратуры в СЭС с электродвигательной нагрузкой можно рекомендовать для анализа и расчётов основных показателей режимов работы пусковой аппаратуры при проектировании систем электроснабжения горных машин.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Губенков А. В. Автоматизация исследования режимов работы асинхронного двигателя с кабелем и пускателем в статорной цепи // AS' 2003: труды IV всероссийской научно-практической конференции//Новокузнецк. - СибГИУ. - 2003. - С. 277-278.

2. Губенков А.В. Исследование режимов работы электротехнического комплекса «электродвигатель - коммутационный аппарат». // сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика и энерго-сберегающие технологии» // Липецк. - 2004г. - С. 53-54.

3. Губенков А. В. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя с кабелем и пускателем в статорной цепи // сб. трудов IX международной открытой научной конференции «Современные проблемы информатизации», вып. 9 / под общ. ред. д.т.н. О. Я. Кравца // Воронеж. - 2004. - С. 181-182.

4. Губенков А.В. Модель асинхронного электродвигателя с кабелем и устройством коммутации в статорной цепи // Вестник КузГТУ. - 2003. - №5. - С.59-64.

5. Губенков А.В. Модель типового модуля системы электроснабжения с коммутационной аппаратурой // Вестник КузГТУ. - 2004. - №4. - С.52-57.

6. Губенков А.В. Модель типового модуля системы электроснабжения с коммутационной аппаратурой. - М.: ВНИИЦ, 2004. - №50200400591.

7. Губенков А.В. Модель электромагнита контактора серии КТУ-4Б // Вестник КузГТУ. - 2004. - №4. - С.73-76

8. Губенков А.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 203611452. - М.: Российское агентство по патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ), 2003.

9. Губенков А.В. Трёхфазная модель асинхронного двигателя с кабелем и пускателем в статорной цепи // Вестник КузГТУ. - 2003. - №6. - С.56-61.

Подписано в печать 2.02.2005 Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Объём 1,1 п.л.

Отпечатано на ризографе.

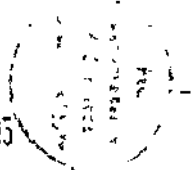
Тираж 100 экз. Заказ 66

ГУ Куз ГТУ, 650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография ГУ Куз ГТУ, 650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А.

05.09 - 05.11

22 MAR 2005



1370