

На правах рукописи

Аникин Александр Сергеевич

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ САМОХОДНОГО ВАГОНА**

Специальность 05.09.03 — «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук, профессор  
**Кодкин Владимир Львович.**

Официальные оппоненты: профессор кафедры «Электрификация и энергоэффективность горных предприятий» Московского государственного горного университета, доктор технических наук, профессор  
**Фащиленко Валерий Николаевич;**

заведующий кафедрой «Электромеханика и электромеханические системы» Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук, профессор  
**Воронин Сергей Григорьевич.**

Ведущая организация – **ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет».**

Защита состоится 29 марта 2012 г., в 10 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете (ЮУрГУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ, с авторефератом – на официальном сайте ВАК [www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru) и на официальном сайте ЮУрГУ [www.susu.ac.ru](http://www.susu.ac.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ на имя ученого секретаря, тел./факс: (351) 267-91-23.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.298.05

доктор технических наук, профессор

Ю.С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В подавляющем большинстве механизмов горно-шахтного оборудования применяется либо нерегулируемый электропривод (ЭП) на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗР), либо ЭП со ступенчатым регулированием скорости, путем переключения числа пар полюсов АДКЗР. Одним из примеров таких механизмов является самоходный пневмоколесный вагон, осуществляющий доставку горной массы из забоев до магистральных конвейеров. Из-за низкого диапазона регулирования зачастую приходится выбирать между максимальной скоростью для уменьшения времени доставки и минимальной скоростью для комфортного маневрирования и безопасной эксплуатации. Повышенный удельный расход электроэнергии и низкая производительность вагонов (в настоящее время ниже производительности проходческо-очистных комбайнов) ограничивают в целом эффективность отечественных горно-проходческих комплексов. Поэтому оснащение самоходного подземного транспорта регулируемыми ЭП является актуальной задачей, направленной на обеспечение быстрого и точного регулирования усилий и скорости механизмов, а также ресурсо-энергосберегающих режимов, которые являются сейчас неотъемлемым требованием всех технологических процессов.

Условия эксплуатации тяговых электроприводов (ТЭП) горно-шахтного оборудования имеют специфические особенности, главным образом связанные с ограниченной мощностью и сложностью системы электроснабжения, с динамичной нагрузкой, изменяющейся в больших пределах, и с ограниченными габаритами, предоставляемыми для электрооборудования на подвижных механизмах. В связи с этим решение указанных выше проблем возможно только с применением частотно-регулируемых ЭП горных механизмов. Существенный вклад в развитие этого направления внесли А.А. Булгаков, Г.И. Бабокин, П.Д. Гаврилов, В.А. Дартау, Е.К. Ещин, А.Е. Козярук, В.И. Ключев, В.А. Мищенко, А.С. Сандлер, А.С. Сарваров, А.А. Усольцев, В.А. Шубенко и др. Однако в их трудах подробно исследуется работа электропривода при номинальной нагрузке и мало внимания уделяется характерным для горных механизмов режимам перегрузки.

Более эффективно процесс внедрения происходит, когда заменяют всю систему ЭП (в большинстве случаев такое бывает, когда меняется род тока у электродвигателей). Зачастую, по технико-экономическим причинам при внедрении частотного регулирования в электромеханическую систему интегрируют только преобразователь частоты (ПЧ), если до этого использовались АДКЗР. Когда же речь заходит о специальных двигателях (например: взрывозащищенного исполнения или индивидуальной разработки), то их сохранение является обязательным условием модернизации.

Большинство технологического оборудования шахт и рудников проектировалось 30–40 лет назад. При повышении производительности мощность рабочих механизмов чаще всего не увеличивают, вследствие чего механизмы работают с перегрузками. В результате это приводит к частым отказам и выходам из строя технологического оборудования, т.к. контроль параметров работы нерегулируемых ЭП, как правило, не осуществляется.

Внедрение ТЭП самоходного пневмоколесного вагона с частотным регулированием для повышения его эксплуатационной надежности и производительности требует проведения подробных исследований условий его эксплуатации и разработки эффективной системы управления ЭП.

Работа поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы «УМНИК» (проект №10224) и удостоена диплома Законодательного собрания Челябинской области в номинации «Лучший научно-исследовательский проект».

**Цель работы** – повышение эксплуатационной надежности и производительности тягового электропривода самоходного вагона при перегрузках и ограниченной мощности источника энергоснабжения.

**Для достижения намеченной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:**

- установлены особенности основных режимов работы тягового электропривода самоходного вагона в условиях действующего рудника;
- определены возможности работы используемых асинхронных тяговых электродвигателей с повышенным скольжением в составе частотно-регулируемого электропривода;
- исследованы характеристики тягового электропривода самоходного вагона со стандартными алгоритмами управления двигателями при перегрузках и ограниченной мощности источника энергоснабжения;
- проведены разработка и обоснование алгоритма эффективного частотного управления с учетом конструктивных особенностей и условий работы вагона и используемых тяговых электродвигателей.

#### **Методы исследований.**

В работе использовались методы теории электропривода, теории частотного управления асинхронными электродвигателями, методы теории автоматического управления, методы математического и цифрового моделирования на ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились на опытном образце самоходного пневмоколесного вагона «В17К» в условиях действующего рудника и на лабораторном стенде ATV71-LEXIUM05.

#### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

- результат анализа векторных диаграмм процессов в частотно-регулируемом ЭП с АДКЗР с повышенным скольжением при нагрузках выше номинальной, объяснивший причины повышения статорных токов при увеличении частоты питающего напряжения;
- алгоритм частотного управления асинхронными тяговыми электродвигателями с повышенным скольжением, испытывающими большие нагрузки, подтвержденный экспериментальными исследованиями ТЭП самоходного вагона, снизивший статорные токи на 20%;
- сформулированы условия сохранения работоспособности системы векторного управления при изменении параметров ЭП горно-транспортных механизмов.

#### **Научное значение работы:**

- впервые на основе экспериментальных исследований и с помощью разработанной программы уточненного расчета скорости доказано, что реализуемые в ПЧ алгоритмы компенсации скольжения для асинхронных тяговых электродвига-

телей с повышенным скольжением при нагрузках больше  $1,1 M_H$  (в зоне скольжений от 15% до 50%) неэффективны, увеличение частоты питающего напряжения при неизменном отношении амплитуды к частоте питающего напряжения ( $U/f$ ) вызывает рост статорных токов и уменьшение фактической скорости двигателей;

– выявлено, что в асинхронном тяговом электродвигателе с повышенным скольжением при нагрузках выше номинальной снижается скорость и увеличивается ток статора из-за снижения основного магнитного потока, компенсировать которое возможно путем увеличения напряжения при постоянстве частоты, если существует запас по напряжению, либо путем снижения частоты питающего напряжения при отсутствии запаса по напряжению;

– впервые разработан алгоритм скалярного управления асинхронным тяговым электродвигателем с повышенным скольжением, отличающийся тем, что при увеличении нагрузки компенсируется снижение основного магнитного потока, обеспечивающее по сравнению со стандартными алгоритмами скалярного управления снижение статорных токов на 20–30% и увеличение фактической скорости двигателя на 5–10% за рабочий цикл за счет повышения жесткости механической характеристики.

#### **Практическое значение работы:**

– проведен комплекс испытаний тягового электропривода самоходного вагона в условиях действующего рудника, доказавший неэффективность существующих алгоритмов коррекции систем со скалярным управлением и целесообразность компенсации снижения основного магнитного потока для поддержания скорости асинхронных тяговых электродвигателей с повышенным скольжением при больших нагрузках;

– показано, что для данного типа многодвигательного электропривода при конструктивных особенностях наиболее целесообразно применять скалярное управление;

– реализованный алгоритм управления преобразователем частоты Vacon NXP 0261, компенсирующий снижение основного магнитного потока двигателя при увеличении нагрузки, позволил повысить грузоподъемность самоходного вагона до 14–16 т с сохранением скорости при углах возвышения 10–13°, что не обеспечивали стандартные алгоритмы скалярного управления, при которых предельная нагрузка составляла 8–9 т, в результате чего производительность вагона была увеличена практически в 2 раза;

– разработанная программа уточненного расчета скорости, базирующаяся на сигналах суммарного тока статора, амплитуды и частоты напряжения питания двигателей позволила без установки дополнительного оборудования повысить точность определения скорости передвижения самоходного вагона.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается корректным использованием методов описания статических и динамических процессов в математических и компьютерных моделях при общепринятых допущениях, результатами внедрения и эксплуатации частотно-регулируемого ТЭП самоходного вагона.

#### **Реализация результатов работы:**

Разработанный алгоритм управления, компенсирующий снижение основного магнитного потока при нагрузке выше номинальной, реализован в ТЭП опытного

образца самоходного вагона «В17К» (заводской № 3) ОАО «Копейский машиностроительный завод» (г. Копейск, Челябинская область), который проходит промышленные испытания на калийном руднике ОАО «Уралкалий» (г. Соликамск, Пермский край).

**Апробация работы.** Основные положения работы рассматривались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении» (Магнитогорск, РУМЦ «Персонал», 2008), «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (Пенза, ПГУ, 2009), II Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «БУДУЩЕЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ РОССИИ» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009), VI международной (XVII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2010» (Тула, ТулГУ, 2010), XVII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА» (Москва, МЭИ, 2011), научно-технических конференциях ЮУрГУ в 2008–2011 гг.

**Публикации.** Основные положения, выводы и практические результаты изложены в 14 научных работах, включая 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, одна из которых вышла в отраслевом журнале «Горное оборудование и электромеханика» №4, 2011, 10 материалов научно-технических конференций и тезисов докладов. На оригинальное техническое решение получен 1 патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 114 страниц, заключения, списка используемой литературы из 104 наименований и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 148 страниц, включая 70 рисунков и 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния тяговых электроприводов (ЭП) подземного самоходного транспорта на примере самоходных вагонов.

В настоящее время отмечается, что эффективность отечественных проходческо-очистных комплексов ограничивается из-за недостаточной производительности шахтных самоходных вагонов, которая в настоящее время ниже производительности комбайнов, и из-за повышенного удельного расхода электроэнергии. Повышение производительности и энергоэффективности отечественных проходческо-очистных комплексов и самоходных вагонов в частности можно достичь внедрением регулируемых электроприводов.

Особенностью работы ЭП самоходного вагона является недетерминированная нагрузка, изменяющаяся в большом диапазоне. Наличие неровностей трассы совместно с изменяющимся рельефом способствует постоянному присутствию переходных процессов в механических передачах. Следствием этого и одной из

основных причин поломок элементов трансмиссий самоходных вагонов является накопление в них усталостных повреждений. Особую роль при этом играет наличие нерегулируемого ЭП, который существенно ускоряет накопление усталостных повреждений деталей в процессе прямого пуска электродвигателей, равносильного ударным нагрузкам. К тому же 5–7-кратные пусковые токи сокращают ресурс тяговых электродвигателей и приводят к 10–20% просадкам питающего напряжения.

Для повышения эксплуатационных показателей надежности на Соликамском калийном рудоуправлении №2 была собрана информация о наиболее частых отказах и неисправностях узлов и оборудования самоходных вагонов. За период с 01.01.2008 по 31.12.2008 в эксплуатации находилось 20 самоходных вагонов. По причине ступенчатого регулирования скорости в среднем у одного отечественного самоходного вагона выходит из строя почти 15 частей тягового привода в год, причем замена большинства из них (ступицы на коническом редукторе, первой и второй шестерней углового редуктора и др.) вызывает длительные простои из-за объемных ремонтных работ. Установлено, что основными видами поломок тяговых электродвигателей являются пробой обмоток и распайка бандажей, возникающих в результате повышенного нагрева. Это свидетельствует о токовых перегрузках тяговых двигателей.

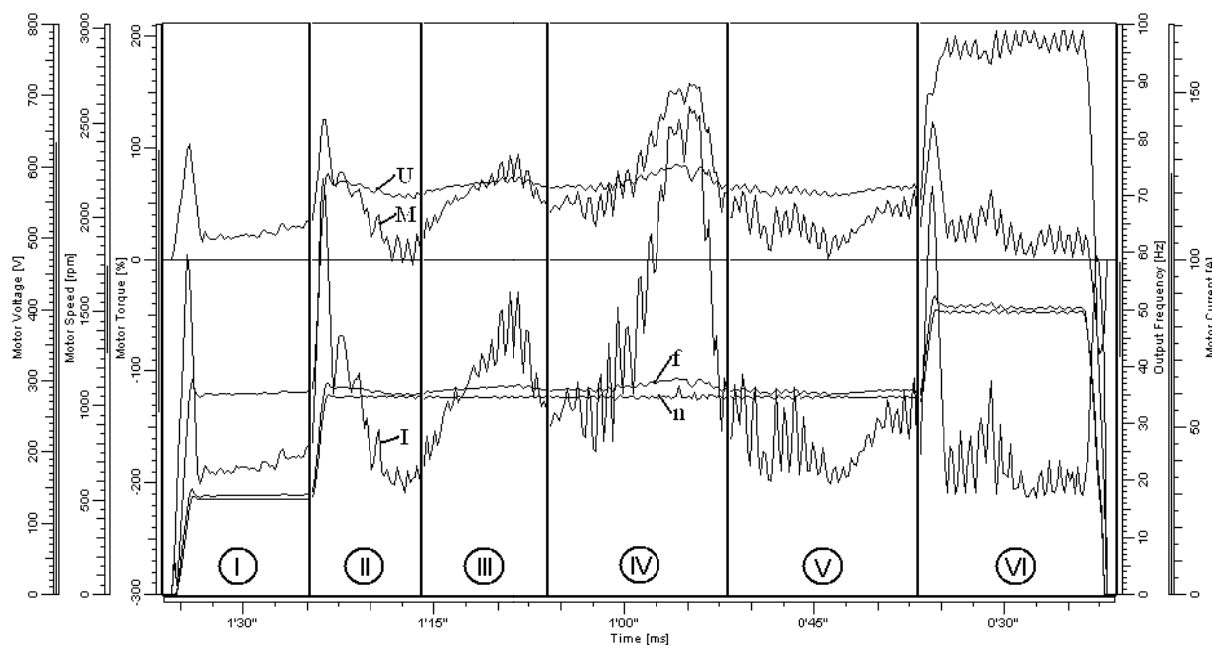
Выявлены основные проблемы внедрения частотно-регулируемых ЭП горных машин. Для самоходного вагона эти проблемы заключаются в обеспечении трех скоростей передвижения при больших уклонах и загрузке. При этом необходимо обеспечить плавный пуск и повысить надежность работы (увеличить ремонтные сроки). Конструкция вагона была определена, т.е. тяговый ЭП должен был строиться на базе специально разработанных мотор-колес (асинхронный двигатель АИУЕ225М с повышенным скольжением сагрегированный с двухступенчатым планетарным редуктором), на которые не возможно установить датчики скорости по условиям взрывобезопасности и конструкции вагона. Так же необходимо было учитывать ограниченные габариты станции управления, не позволяющие установить четыре ПЧ, и ограниченную мощность источника энергоснабжения, где наблюдаются 10% падения напряжения на питающем кабеле ограниченного сечения. В связи с этим было принято решение интегрировать в электромеханическую систему только ПЧ, что позволило сохранить конструкцию ходовой части самоходного вагона без изменений.

ОАО «Копейский машиностроительный завод» в 2007–2011 гг. проводит работы по оснащению вновь создаваемого пневмоколесного вагона В17К частотно-регулируемым тяговым электроприводом. В связи с тем, что известные преобразователи частоты не предназначены для горно-шахтных механизмов, и из-за отсутствия информации о реальных нагрузках и параметрах питающей сети необходимо проведение подробных исследований условий их работы с последующей разработкой алгоритма управления для работы в этих условиях.

**Во второй главе** проведен тяговый расчет, учитывающий условия эксплуатации подземного самоходного транспорта и представлены результаты внедрения частотного регулирования на вагон В17К. На основе теоретических и экспериментальных исследований были разработаны основные требования к ТЭП самоходного вагона.

Силовой преобразователь должен располагаться во взрывозащищенной оболочке ограниченных габаритов, в связи с чем по технико-экономическим причинам было принято решение в пользу многодвигательной схемы ТЭП с вариантом питания 4-х двигателей, специально разработанных для самоходного вагона, от одного ПЧ. Из-за тяжелых условий работы и отсутствия контроля загрузки, для выбора ПЧ коэффициент, обеспечивающий запас по токовой нагрузке, принят равным 2,1 от номинального тока асинхронного двигателя (АД) и с учетом того, чтобы преобразователь допускал 2,5-кратные перегрузки в течение более 45 с. Исходя из габаритных и ценовых показателей, а так же удобства эксплуатации был выбран ПЧ NXP 0208 6 финской фирмы Vascon. Многодвигательная схема и мягкая механическая характеристика тяговых двигателей (критическое скольжение составляет 60%) дают возможность получить так называемый «электрический дифференциал», т.е. различные скорости колес при прохождении закруглений и при неравномерной нагрузке из-за неровностей трассы.

Экспериментальные исследования тягового электропривода самоходного вагона проводились на СКРУ-2 ОАО «Уралкалий» (г. Соликамск). На рис. 1 представлены результаты проведенных испытаний ТЭП самоходного вагона в условиях действующего рудника с ПЧ со стандартными настройками (характеристика  $U/f$  – линейная).



**Рис. 1. Изменение нагрузки в широких пределах:**

$U$  (Motor Voltage) – напряжение двигателей, В;  $I$  (Motor Current) – суммарный полный ток двигателей, А;  $M$  (Motor Torque) – суммарный момент двигателей, %;  $n$  (Motor Speed) – расчетная скорость двигателей, об/мин;  $f$  (Output frequency) – частота на выходе преобразователя, Гц

Необходимо отметить, что при испытаниях без ПЧ измерений тока не проводилось, а проведенные испытания показали, что при движении вагона с максимальной нагрузкой (15–17т) и углами возвышения трасс 12–14°, токи достигают 2–2,5 номинального тока. При этом и на первой и на второй скорости результаты работы ТЭП удовлетворительны, а на третьей нет. Применяемые ПЧ фирмы Vascon позволяют реализовывать два режима управления: «управление частоты питания двигателя» и «управление скоростью двигателя». В преобразователе рассчитыва-



ется до 10 контролируемых параметров работы ЭП, но в ходе экспериментов установлено, что достоверными являются: суммарный ток, напряжение и частота питания двигателей.

В ходе испытаний обнаружено, что при движении груженого вагона по одной и той же трассе полный ток ПЧ увеличивается с ростом скорости. Осциллограммы суммарного тока в зависимости от проходимого расстояния при движении груженого вагона (6–7 т) на разных скоростях при работе ПЧ в режиме «управления частотой питания двигателя» представлены на рис. 2. Сначала движение происходит на уклон 7–8°, а затем на уклон 6–7°.

При преодолении первого уклона (участок 0–10 м рис. 2) ЭП работает в режиме токоограничения, при котором напряжение снижается до 600 В. Ток на этом участке при 50 Гц на 40% выше, чем при 17 Гц и 35 Гц. Однако, при движении по второму уклону (15–20 м) ток на 10% выше, а напряжение при этом составляет 660 В.

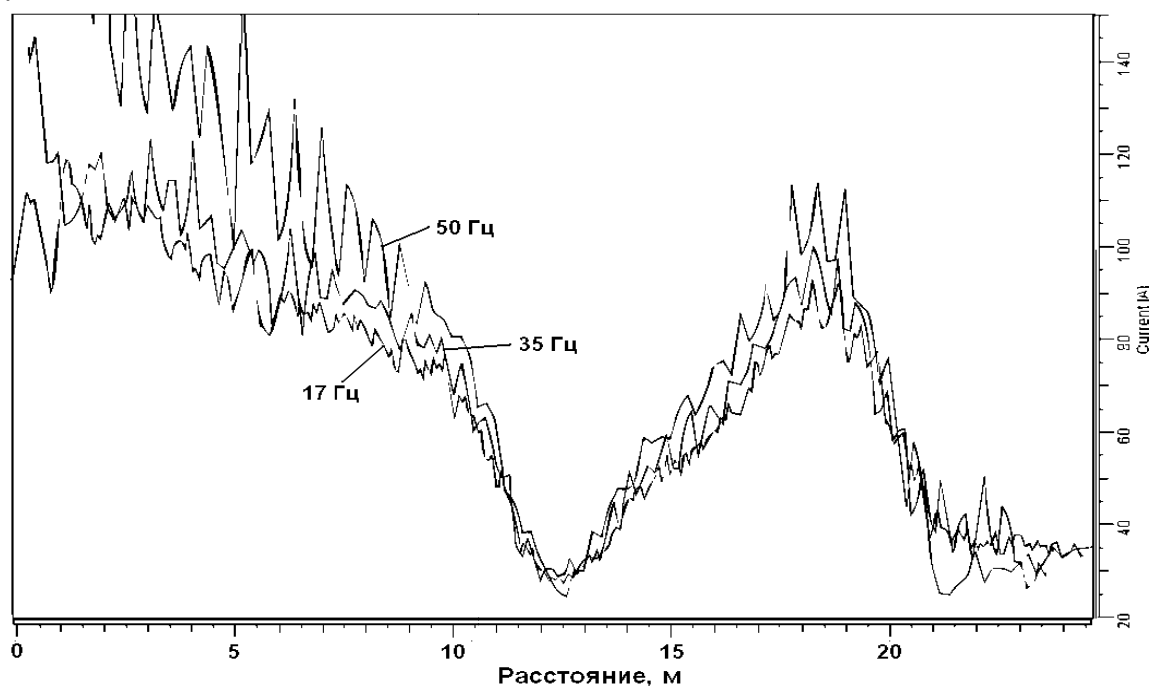


Рис. 2. Зависимости токов на разных скоростях от расстояния в режиме «управления частотой питания двигателя»

При работе ПЧ в режиме «управления скоростью двигателя» при токоограничении напряжение снижается до 645 В, а функция поддержания скорости увеличивает частоту питающего напряжения до 54 Гц, суммарный ток двигателей при этом – 203 А. При этих условиях превышение тока составляет 23% по сравнению с токами на 17 Гц и 35 Гц (168 А). При движении на третьей скорости по второму уклону функция поддержания скорости увеличивает частоту до 54 Гц, однако, согласно стандартным настройкам, при росте частоты выше номинального значения напряжение на статоре остается неизменным и равным номинальному значению напряжения питания двигателя (660 В). При движении по данному участку на третьей скорости суммарный ток равен 180 А, а при движении на первой и второй скоростях – 155 А, т.е. превышение составило 17%.

Установлено, что кроме того рост статорных токов возникает из-за падения напряжения в питающем кабеле и из-за работы режима токоограничения. Сигнал превышения тока статора одновременно воздействует как на канал задания ам-

плитуды и частоты выходного напряжения ПЧ, так и только на канал задания амплитуды выходного напряжения. Из-за того, что амплитуда напряжения питания АД уменьшается в большей степени, жесткость механической характеристики снижается, уменьшается основной магнитный поток и момент двигателя, вызывая опрокидывание механической характеристики асинхронного двигателя. Токи статора и ротора резко возрастают, вызывая перегрев двигателя и преобразователя, что в итоге приводит к аварийной ситуации.

Таким образом, главная проблема, которую необходимо решить – это ограничение статорных токов (тока ПЧ) на номинальной скорости.

**Третья глава** посвящена исследованиям влияния изменения параметров АД (индуктивности намагничивания, сопротивлений статора и ротора и т.д.) на работу системы векторного управления, а также возможности ее функционирования в многодвигательном ЭП самоходного вагона, который состоит из четырех двигателей параллельно питающихся от одного ПЧ.

В литературе указывается, что векторное управление является самым эффективным, но неработоспособным в многодвигательных приводах, а также в приводах, где в больших пределах меняются параметры двигателя при отсутствии датчиков скорости. Однако не указывается, что же будет с АД, параметры которого не совпадают с параметрами модели в системе векторного управления. Задача была решена с помощью математического моделирования в программной среде MATLAB приложения Simulink и исследований на лабораторном стенде.

При векторном управлении введением дополнительных компенсирующих связей пытаются линеаризовать всю структуру ЭП с выходом по потокосцеплению или по электромагнитному моменту. При моделировании использовалась система токового управления во вращающейся системе координат, представленная в монографии А.А. Усольцева. В качестве управляющих сигналов приняты продольная составляющая потокосцепления ротора и угловая частота тока ротора.

Устройство управления формируется таким образом, что продольная составляющая потокосцепления ротора  $\Psi_{2d}$  будет определяться как

$$\Psi_{2d} = \Psi_{2d}^* \frac{1+T_2^*p}{L_m^*} \cdot e^{j\theta_1^*} \cdot e^{-j\theta_1} \cdot \frac{L_m}{1+T_2 \cdot p} = k_\Psi \cdot \Psi_{2d}^*, \quad (1)$$

где  $k_\Psi$  – передаточная функция по продольной составляющей потокосцепления ротора

$$k_\Psi = \frac{1+T_2^*p}{L_m^*} \cdot e^{j\theta_1^*} \cdot e^{-j\theta_1} \cdot \frac{L_m}{1+T_2 \cdot p}. \quad (2)$$

Угловая частота тока ротора  $w_2$  будет вычисляться следующим образом:

$$w_2 = w_2^* \frac{\Psi_{2d}^* \cdot T_2^*}{L_m^*} \cdot e^{j\theta_1^*} \cdot e^{-j\theta_1} \cdot \frac{L_m}{\Psi_{2d} \cdot T_2} = k_w \cdot w_2^*, \quad (3)$$

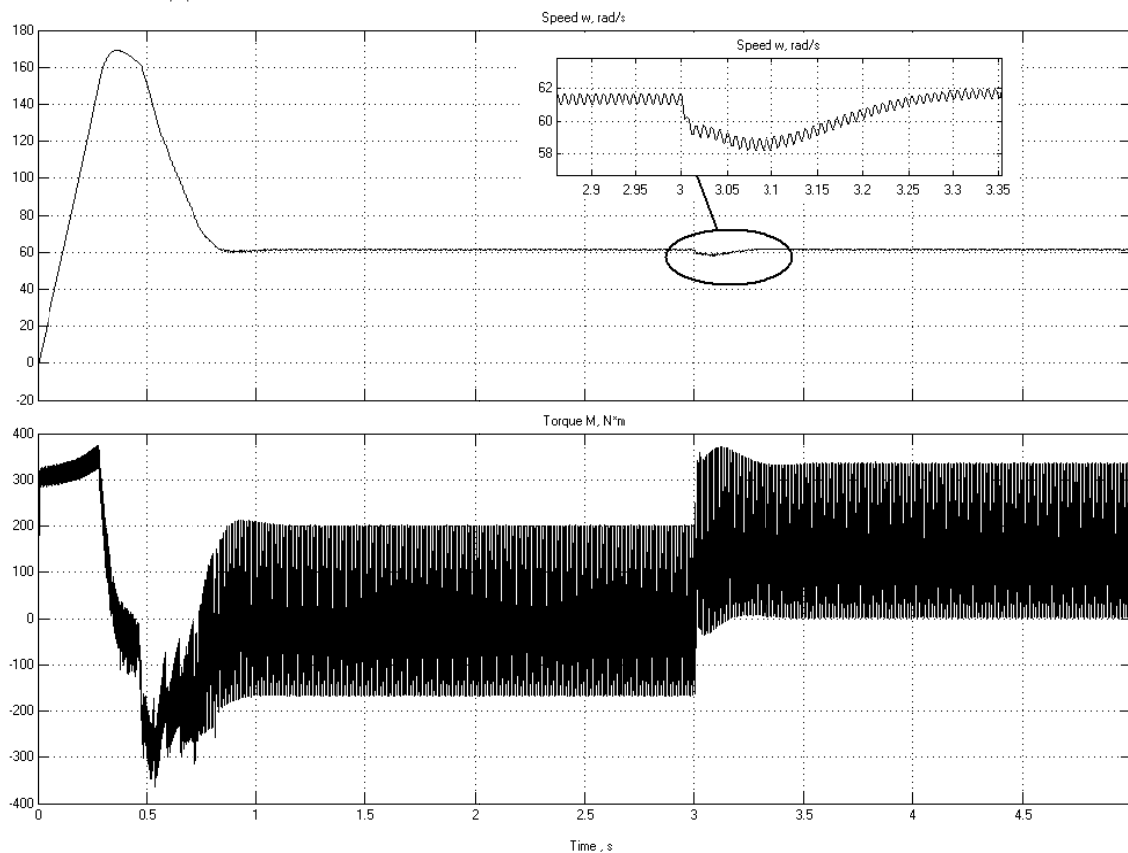
где  $k_w$  – передаточная функция по угловой частоте тока ротора

$$k_w = \frac{\Psi_{2d}^* \cdot T_2^*}{L_m^*} \cdot e^{j\theta_1^*} \cdot e^{-j\theta_1} \cdot \frac{L_m}{\Psi_{2d} \cdot T_2}. \quad (4)$$

При точном измерении угловой частоты вращения ротора, необходимой для перехода к неподвижной системе координат, и точных параметрах АД ( $L_m^*$ ,  $L_2^*$ ,  $r_2^*$ ), вводимых в систему векторного управления, эти передаточные функции  $k_w$  (2) и  $k_\Psi$  (4) будут равны единице.

В результате моделирования установлено, что максимальная точность требуется для измерения скорости вала двигателя. Если в модели используется точное значение скорости, то другие параметры не оказывают существенного влияния. При уменьшении индуктивности контура намагничивания  $L_m$  в два раза обе передаточные функции (2) и (4) по каналам задания примут вид пропорционального звена с коэффициентом усиления 2. В этом случае уменьшилось время отработки возмущающего воздействия, однако, появились колебания из-за снижения запаса устойчивости. В целом же система управления удовлетворительно работает.

Если же скорость измеряется с ошибкой, то в передаточных функциях появившаяся частотная составляющая приведет к наличию импульсной составляющей в переходных процессах (рис. 3). Скорость, поступающая в систему управления, была ниже действительной на 10%.



**Рис. 3. Переходные процессы в системе ПЧ-АД при 10% ошибке по скорости в устройстве управления**

На рис. 3 видно, что при включении в работу регулятора скорости система управления входит в режим автоколебаний. Задание по скорости не отрабатывается, ошибка составляет более 50%. Система векторного управления сохраняет свою работоспособность при менее чем 5% ошибках по скорости вращения вала. Поэтому такое управление считается неприемлемым для многодвигательного ЭП. При характерных для горных механизмов статических просадках напряжения и перегрузках система векторного управления не может обеспечить поддержание скорости из-за пониженного уровня напряжения в звене постоянного тока.

Результаты моделирования подтвердили испытания на лабораторном стенде ATV71-LEXIUM05. При введении заводских параметров двигателя и проведении автонастройки, которая определяет недостающие параметры двигателя для системы векторного управления и расчета скорости вращения, возникает режим авто-

колебаний в контуре скорости, не допустимый для работы привода. Подбором параметров, используемых в ПЧ для системы управления, с учетом реальной нагрузки эти колебания исключены.

Проведено исследование математической модели многодвигательного ТЭП, составленной на базе стандартной модели векторного управления и модели АД. Они были состыкованы с моделью четырехдвигательной нагрузки с учетом механических упругостей. Установлено, что в многодвигательном приводе для работоспособности системы векторного управления достаточно точно измерять скорость хотя бы одного из двигателей, которые связаны общей нагрузкой.

Таким образом, несмотря на то что, применение векторного управления в многодвигательном ЭП возможно при точном изменении скорости одного из двигателей, этот вариант не подходит, т.к. нет датчиков скорости, и параметры двигателей изменяются в больших пределах. Поэтому исследования продолжались в рамках скалярного управления, к которому, как показали эксперименты, относятся оба режима управления в ПЧ Vacon.

**Четвертая глава** посвящена исследованию причин роста тока статора при номинальной частоте питания в частотно-регулируемом электроприводе с асинхронным двигателем с повышенным скольжением.

При скалярном управлении для расчета механических характеристик при изменении частоты традиционно пользуются расчетом по Т-образной схеме замещения АД. При сопоставлении каталожной (полученной с завода изготовителя – ОАО «НИИВЭМ», г. Кемерово) и рассчитанной по Т-образной схеме замещения механических характеристик АД АИУЕ225М для  $2p=4$  выявлено, что различия характеристик становятся существенными при моментах больших 280 Н·м (1,75 в относительных единицах). При 2,5-кратном моменте расчетное скольжение на 27% меньше каталожного.

Следует также отметить, что кривая намагничивания тоже не учитывает магнитных потерь в сердечниках машины. При малых скольжениях (от 0 до 0,05) они незначительны, и их можно не учитывать. Как показывают проведенные эксперименты (глава 2), двигатель работает в зоне больших скольжений от 12 до 45 %. Значит пренебрегать данным видом потерь некорректно.

Формула комплексной амплитуды основного магнитного потока имеет вид

$$\underline{\Phi}_m = \frac{-j}{2 \cdot \pi \cdot w_{1\sigma}} \left( \frac{\underline{U}_{1m}}{f_1} - \frac{r_1}{f_1} \underline{I}_{1m} - j2 \cdot \pi \cdot L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_{1m} \right), \quad (5)$$

где  $w_{1\sigma}$  – частота вращения электромагнитного поля статора;  $\underline{U}_{1m}$  – комплексная амплитуда напряжения питания;  $f_1$  – частота напряжения питания;  $\underline{I}_{1m}$  – комплексная амплитуда тока статора;  $r_1$  – активное сопротивление статора;  $L_{1\sigma}$  – индуктивность рассеяния статора.

Если в этой формуле принять  $r_1=0$  и  $L_{1\sigma}=0$ , то амплитуда основного магнитного потока будет пропорциональна отношению  $U_1/f_1$ . Поэтому в большинстве общепромышленных частотно-регулируемых ЭП со скалярным управлением для поддержания постоянного основного магнитного потока при изменении частоты питания АД одновременно изменяют напряжение питания.

Электродвигатель АИУЕ 225 М изначально проектировался для прямого пуска, и поэтому его номинальное скольжение равно 12%, индуктивность рассеяния статора – 3,1 мГн, активное сопротивление статора – 0,6 Ом. Поэтому второе и третье слагаемые в формуле 5 будут оказывать влияние на основной магнитный

поток АД, снижая его. Это снижение пропорционально величине тока статора и увеличивается по мере увеличения нагрузки АД

$$\Phi \cong \left( \frac{U_1}{f_1} - kI_1 \right), \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый параметрами статора АД и частотой напряжения питания.

Для дальнейшего анализа работы АД при перегрузках используется метод векторных диаграмм, при том допущении, что для рассматриваемых режимов справедлива Г-образная схема замещения двигателя. Уравнения Кирхгофа в векторной форме для статического режима работы АД имеют следующий вид

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{E} + \dot{I}'_2 \cdot \left( r_1 + \frac{r'_2}{s} + j(x_1 + jx'_2) \right); \\ \dot{U}_1 = jx_\mu \dot{I}_\mu; \\ \dot{I}_\mu = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{cases} \quad (7)$$

Из теории электрических машин известно, что электромагнитный момент на валу образуется в результате взаимодействия магнитного поля и тока, протекающего в обмотках статора или ротора, и может быть представлен в виде векторного произведения

$$m = \frac{m}{2} \cdot z_p \cdot (\dot{\Psi}_m \times \dot{i}_2) = \frac{m}{2} \cdot z_p \cdot |\dot{\Psi}_m| \cdot |\dot{i}_2| \cdot \sin \alpha, \quad (8)$$

где  $m$  – число фаз статора;  $z_p$  – число пар полюсов двигателя;  $\dot{\Psi}_m$  – вектор основного магнитного потока;  $\dot{i}_2$  – вектор тока ротора;  $\alpha$  – угол между векторами  $\dot{\Psi}_m$  и  $\dot{i}_2$ .

Вектор основного магнитного потока сонаправлен с вектором тока намагничивания  $\dot{\Psi}_m \uparrow \dot{I}_\mu$ , значит, угол  $\alpha$  является углом между вектором  $\dot{I}_\mu$  и вектором  $\dot{I}_2$ .

На рисунке 4а представлена векторная диаграмма АД при номинальном режиме работы, т.е. ток статора  $I_1$  равен 25,4 А, скольжение  $s$  – 12%.

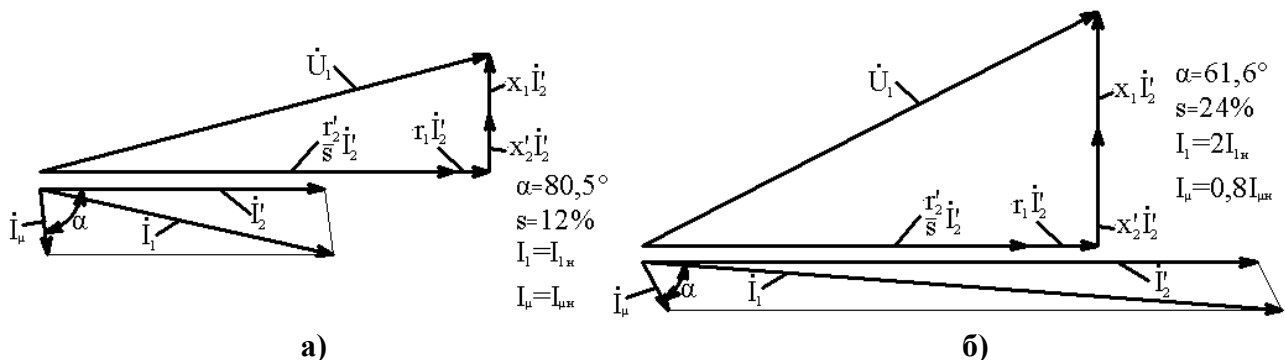


Рис. 4. Векторная диаграмма АД при номинальном режиме работы (а) и при  $M=1,9M_n$  (б)

При увеличении нагрузки до  $1,9M_n$  (рис. 4б) скольжение  $s$ , определяемое по каталожной механической характеристике, равно 24%, ток статора составляет 50 А, т.е.  $2I_{1н}$ , при этом учтено снижение потока через снижение тока намагничивания. По диаграмме видно, что согласно (7) при большой нагрузке возрастает падение напряжения на активном сопротивлении статора и на индуктивных сопротивлениях по сравнению с векторной диаграммой для номинального режима. Это приводит к уменьшению угла  $\alpha$  между моментобразующими векторами тока намагничивания и тока ротора в (8) до  $61,6^\circ$ .

При движении на второй скорости, соответствующей 35 Гц, с таким же моментом нагрузки на тяговый привод (рис. 5а) ток статора составляет 40 А (т.к.

суммарный ток двигателей – 160 А), относительное скольжение – 26%. При снижении частоты уменьшаются индуктивные сопротивления, поэтому угол  $\alpha$  увеличивается до  $69,3^\circ$ . В результате для формирования того же самого момента (что и на 50 Гц) требуется меньший ток ротора. В итоге ток статора при 35 Гц снижается до  $1,6I_{1н}$ . Не смотря на то, что относительное скольжение увеличилось на 2%, абсолютное скольжение двигателя при частоте питания 35 Гц и моменте нагрузки  $1,93M_n$  составило 260 об/мин, тогда как при 50 Гц – 360 об/мин. При построении векторной диаграммы для данного режима необходимо учесть, что ток намагничивания в двигателе составит примерно  $0,9I_{\mu}$ . Далее на рис. 5б представлена векторная диаграмма при компенсации снижения основного магнитного потока до номинального значения. В этом случае жесткость механической характеристики возрастет, что приведет к снижению скольжения до 18% при моменте нагрузки  $1,93M_n$ . За счет этого для данного момента снижается ток статора до  $1,6I_{1н}$ , по сравнению с  $2I_{1н}$  при сниженном потоке. При этом угол  $\alpha$  увеличивается до  $72,8^\circ$ .

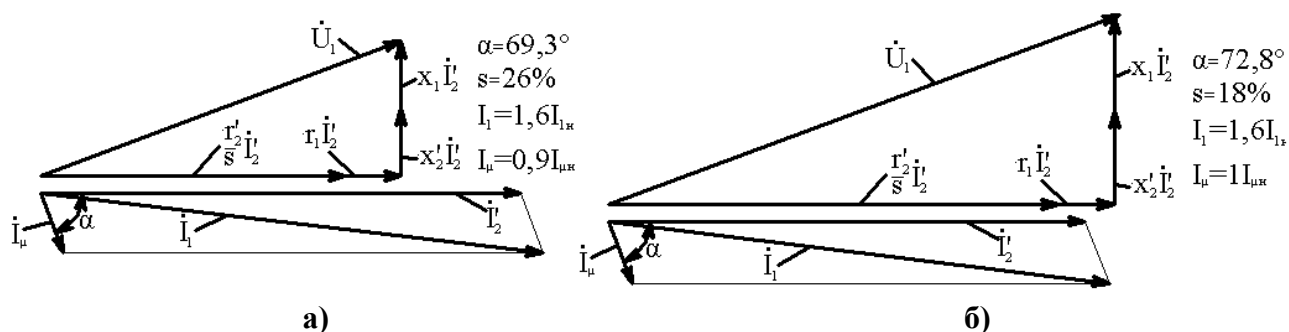


Рис. 5. Векторная диаграмма АД при  $M=1,9M_n$  и  $f_1=35$  Гц (а) и при  $M=1,9M_n$  и  $f_1=50$  Гц с компенсацией снижения основного магнитного потока (б)

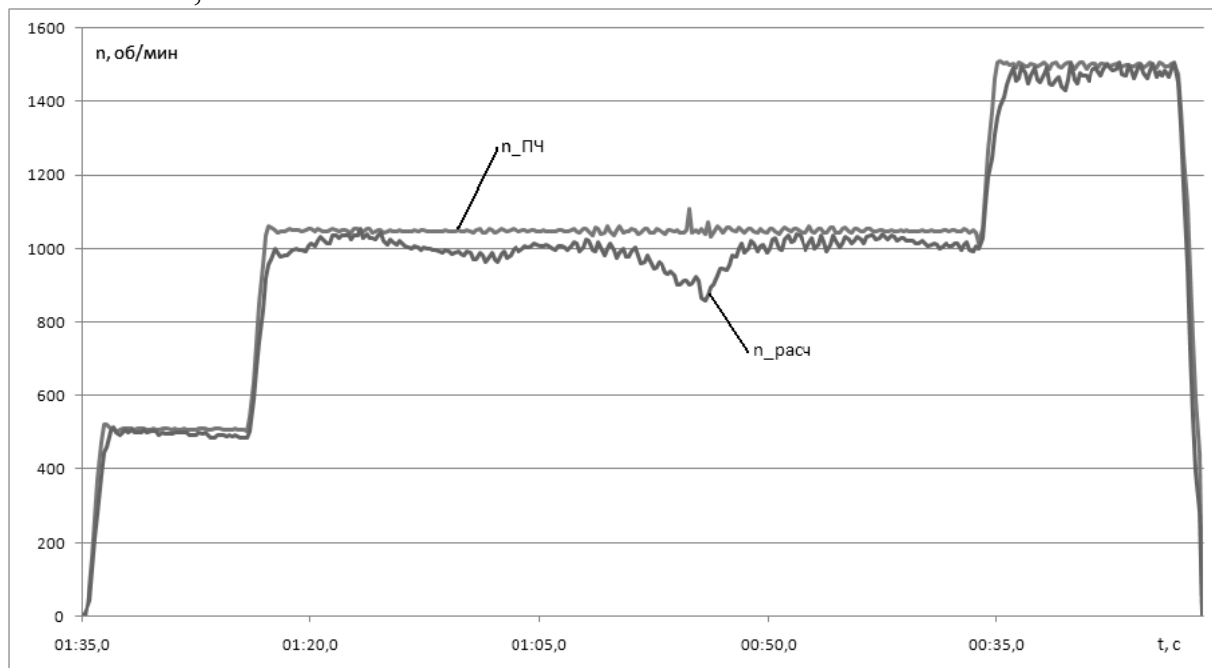
Отмечено, что в режиме «управление скоростью» при больших токах статора увеличиваются амплитуда и частота напряжения питания двигателей, но существенно возрастают токи статора. При этом фактическая скорость, как показывают замеры времени, не увеличивается.

Проведены эксперименты на вагоне с программируемой U/f-характеристикой, подтверждающие теоретические предположения, т.е. компенсация снижения основного магнитного потока двигателя при превышении нагрузки выше номинальной позволяет снизить токи статора и увеличить фактическую скорость движения вагона для данного типа асинхронных ТЭД.

**Пятая глава** посвящена разработке алгоритма управления двигателем, компенсирующего снижение основного магнитного потока при большой нагрузке на номинальной скорости двигателя.

В преобразователе частоты VACON NXP сигнал, соответствующий скорости двигателя, поддерживается с достаточно высокой точностью при любых изменениях нагрузки. По техническим причинам скорость является недоступной прямому измерению величиной. Однако во время экспериментов при больших нагрузках визуально было заметно снижение скорости. Для более точной оценки была написана программа «УРС» для уточненного расчета скорости, использующая достоверные сигналы тока статора, напряжения и частоты с преобразователя. Для этого использована разработанная на кафедре ЭПА «Южно-Уральского государственного университета» (НИУ) программа для расчета характеристик АД

«*haradkz.m*». В программе для заданных значений частоты и напряжения статора комплексным методом рассчитываются сопротивления, токи, мощность сети, мощность на валу и потери АД для одной фазы на базе Т-образной схемы замещения с учетом кривой намагничивания двигателя. По диаграммам работы тягового привода самоходного вагона при изменении нагрузки в широких пределах (см. рис. 1) видно, что скорость поддерживается с точностью до 3% при увеличении суммарного тока от 32 А до 145 А (т.е. относительный ток статора двигателя изменяется от 0,3 до 1,4). С помощью программы «УРС» для данной диаграммы был произведен расчет значений скорости (рис. 6). Произведенный расчет значений уточненной скорости показал, что при 2,4-кратном токе статора ошибка составляет не 5%, а около 37%.

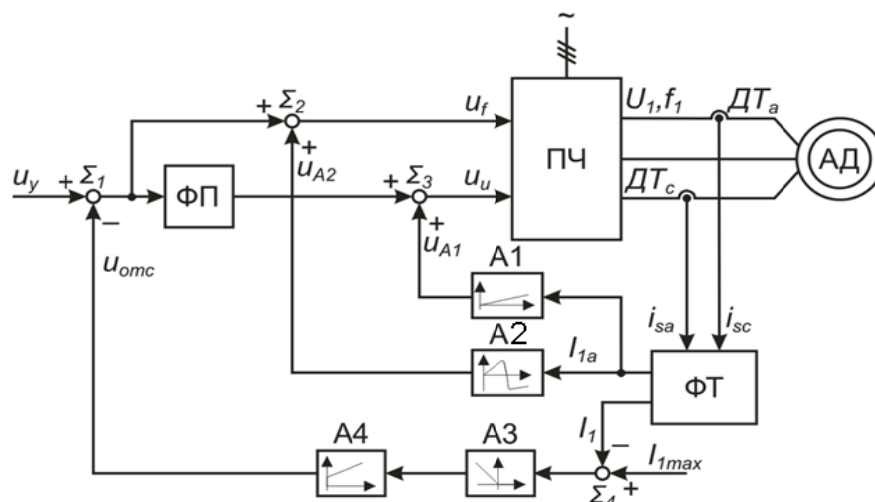


**Рис. 6. Уточненная осциллограмма скорости для рис. 1**

Исходя из результатов исследований, было предложено устройство управления электроприводом с алгоритмом автоматической компенсации снижения основного магнитного потока при большой нагрузке (рис. 7), который обеспечивает работоспособность привода в исключительно тяжелых условиях с минимальными потерями скорости. Данное устройство защищено патентом №2412526 на изобретение «УСТРОЙСТВО ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ» [15].

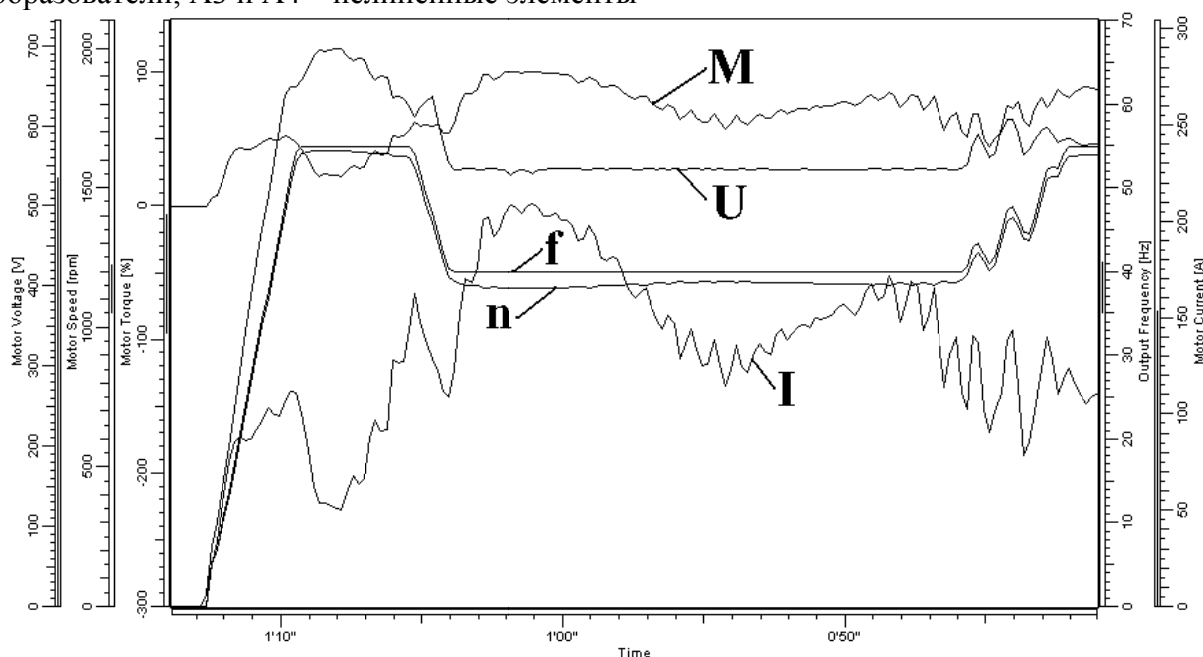
Проведены испытания вагона с алгоритмами управления, реализующими указанный метод, подтвердившие их преимущество перед стандартными (рис. 8). Таким образом, в существующем преобразователе частоты можно обеспечить режим работы с низким скольжением и, соответственно, низким током статора. Этого можно добиться путем изменения характеристики  $U/f$  в зависимости от нагрузки или режима работы (принудительное переключение с «тяжелого» режима работы на «обычный»). На повышенной скорости осуществлять переход с режима «управления скоростью двигателя» на режим «управления частотой двигателя», что бы частота больше не повышалась, а поток будет увеличен путем регулирования  $U/f$ . Данный алгоритм был реализован в существующем ПЧ, хотя он не предусмотрен стандартными макропрограммами, что подтверждает акт внедрения.

Внедрение данного алгоритма на частотно-регулируемы тяговый электропривод самоходного вагона позволило обеспечить его работоспособность при уклонах до  $12^{\circ}$  с полной загрузкой вагона (14–16 т) со средним током 150 А. Как было выявлено во 2 главе, при стандартных алгоритмах с полной загрузкой преодолеваемый уклон составлял  $6-7^{\circ}$ . В результате производительность была повышена практически в 2 раза.



**Рис. 7. Схема оптимизированного частотного управления асинхронным двигателем:**

АД – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; ПЧ – преобразователь частоты; ДТa и ДТc – датчики фазных токов; ФТ – функциональный преобразователь токов; ФП – функциональный преобразователь;  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$ ,  $\Sigma_3$  и  $\Sigma_4$  – суммирующие элементы; А1 и А2– статические преобразователи; А3 и А4 – нелинейные элементы



**Рис. 8. Автоматическое снижение скорости при большой нагрузке:**

U (Motor Voltage) – напряжение двигателей, В; I (Motor Current) – суммарный полный ток двигателей, А; M (Motor Torque) – суммарный момент двигателей, %; n (Motor Speed) – расчетная скорость двигателей, об/мин; f (Output frequency) – частота на выходе преобразователя, Гц

**Приложения к диссертационной работе.** В приложении 1 приведен документ о внедрении результатов работы на производстве. В приложении 2 приведена программа для уточненного расчета скорости двигателя «УРС», написанная на языке программирования Delphi.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – повышена эксплуатационная надежность и производительность тягового электропривода самоходного вагона при перегрузках и ограниченной мощности источника энергоснабжения за счет снижения токов статора тягового асинхронного двигателя стабилизацией основного магнитного потока. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1) на основе экспериментальных исследований и с помощью разработанной программы уточненного расчета скорости доказано, что реализуемые в ПЧ алгоритмы компенсации скольжения для асинхронных тяговых электродвигателей с повышенным скольжением при нагрузках больше  $1,1M_H$  (в зоне скольжений от 15% до 50%) неэффективны, рост частоты питающего напряжения при неизменном отношении амплитуды к частоте питающего напряжения ( $U/f$ ) вызывает рост статорных токов и уменьшение фактической скорости двигателей;

2) выявлено, что в асинхронном тяговом электродвигателе с повышенным скольжением при нагрузках выше номинальной снижается скорость и увеличивается ток статора из-за снижения основного магнитного потока, компенсировать которое возможно путем увеличения напряжения при постоянстве частоты, если существует запас по напряжению, либо путем снижения частоты питающего напряжения при отсутствии запаса по напряжению;

3) впервые разработан алгоритм скалярного управления асинхронным тяговым электродвигателем с повышенным скольжением, отличающийся тем, что при увеличении нагрузки компенсируется снижение основного магнитного потока, обеспечивающий по сравнению со стандартными алгоритмами скалярного управления снижение статорных токов на 20–30% и увеличение фактической скорости двигателя на 5–10% за рабочий цикл за счет повышения жесткости механической характеристики.

4) проведен комплекс испытаний ТЭП самоходного вагона в условиях действующего рудника, доказавших неэффективность существующих алгоритмов коррекции систем со скалярным управлением и целесообразность компенсации снижения основного магнитного потока для поддержания скорости асинхронных тяговых электродвигателей с повышенным скольжением при больших нагрузках;

5) показано, что для данного типа многодвигательного ЭП при конструктивных особенностях наиболее целесообразно применить скалярное управление;

6) реализованный в ПЧ Vacon NXP 0261 алгоритм управления, компенсирующий снижение основного магнитного потока двигателя при увеличении нагрузки, позволил повысить грузоподъемность самоходного вагона до 14–16 т с сохранением скорости передвижения при углах возвышения 10–13°, что не обеспечивали стандартные алгоритмы скалярного управления, при которых предельная нагрузка составляла 8–9 т, в результате чего производительность вагона была увеличена практически в 2 раза;

7) разработанная программа уточненного расчета скорости, базирующаяся на сигналах суммарного тока статора, амплитуды и частоты напряжения питания

двигателей позволила без установки дополнительного оборудования повысить точность определения скорости передвижения самоходного вагона.

### **Научные публикации по теме диссертации.**

#### **В журналах, рекомендованных ВАК России**

1. Аникин, А.С. Внедрение частотно-регулируемого асинхронного электропривода на шахтный самоходный вагон В15К / А.С. Аникин // Вестник ЮУрГУ. серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 11. – №15(148). – С. 67–71.

2. Аникин, А.С. Опыт внедрения частотно-регулируемого электропривода на базе преобразователя частоты VACON на самоходный вагон В15К / А.С. Аникин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 220–226.

3. Мальчер, М.А. Проблемы внедрения частотного регулирования в горнодобывающей отрасли / М.А. Мальчер, А.С. Аникин // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – №4 – С. 40–46.

#### **Другие научные публикации**

4. Регулируемый асинхронный электропривод в горных машинах. Опыт внедрения, проблемы и перспективы / В.В. Семенов, М.А. Мальчер, В.Л. Кодкин, А.С. Аникин // Доклады Международной конференции «Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении». – Магнитогорск: РУМЦ «Персонал», 2008. – С.87–92.

5. Кодкин, В.Л. Тяговый многодвигательный электропривод шахтного самоходного вагона В15К / В.Л. Кодкин, А.С. Аникин // Сборник научных трудов Второй Всероссийской научно-технической конференции «электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий». – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – С. 36–40.

6. Кодкин, В.Л. Оптимальное управление скоростью в асинхронном электроприводе с векторным управлением / В.Л. Кодкин, А.С. Аникин // «Наука и технологии». Тезисы докладов ХХІХ Российской школы, посвященной 85-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. – Миасс: МСНТ, 2009. – С.78–79

7. Аникин, А.С. Система регулирования скорости асинхронного электродвигателя для горнодобывающего оборудования / А.С. Аникин // Материалы докладов 61-й научной конференции ЮУрГУ: секция технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т.2. – С. 194–198.

8. Кодкин, В.Л. Опыт промышленных испытаний тягового электропривода с частотным управлением / В.Л. Кодкин, А.С. Аникин // Наука ЮУрГУ: материалы докладов 61-й научной конференции ЮУрГУ: секция технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т.2. – С. 198–202.

9. Аникин, А.С. Асинхронный электропривод с оптимизированной системой векторного управления скоростью / А.С. Аникин // Будущее машиностроения России: сборник трудов Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С. 100–101.

10. Аникин, А.С. Асинхронный электропривод с оптимизированной системой векторного управления скоростью / А.С. Аникин // Будущее машиностроения России: сборник статей на CD-диске II Всерос. конф. молодых ученых и специа-

листов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – ФГУП НТЦ «Информрегистр» №0320901785.

11. Аникин, А.С. Оптимальная по быстродействию система регулирования скорости в асинхронном электроприводе с частотным управлением / А.С. Аникин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб. тр. Международной научно-технической конференции. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2009. – С. 16–18.

12. Аникин, А.С. Оптимальное управление скоростью в асинхронном электроприводе с векторным управлением / А.С. Аникин // Научный поиск: материалы II научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ, – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 2. – С. 132–136.

13. Кодкин, В.Л. Моделирование систем частотного регулирования асинхронным электродвигателем / В.Л. Кодкин, А.С. Аникин // Наука ЮУрГУ: материалы 62-ой научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 3. – С. 99–103.

14. Кодкин, В.Л. Особенности частотного управления асинхронным электроприводом с преобразователем частоты и напряжения фирмы «Schneider Electric» ATV7 / В.Л. Кодкин, В.Л. Немков, А.С. Аникин // Наука ЮУрГУ: материалы 62-ой научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 3. – С. 103–107.

#### **Патент РФ**

15. Пат. №2412526 Российская Федерация, МПК H02P 23/00. Устройство частотного управления асинхронным электроприводом / В.Л. Кодкин, А.С. Аникин. – № 2010108563/07; заявл. 09.03.2010; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5 – 12 с.