Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 62-83::621.313.3
ГРНТИ 45.41.31 50.43.00 52.13.29
Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»**
От имени Руководителя организации **_____ / Е. К. Ещин /** **М.П.**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 2 этапа Государственного контракта № 14.740.11.1105 от 24 мая 2011 г.

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.
Проект: Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии
Руководитель проекта: **_____/Семыкина Ирина Юрьевна** (подпись)

Кемерово
2011 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ
по Государственному контракту 14.740.11.1105 от 24 мая 2011 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»

Руководитель темы:

доцент кафедры «Электропривод и автоматизация», кандидат технических наук	_____ подпись, дата	Семыкина И. Ю.

Исполнители темы:

аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация»	_____ подпись, дата	Ложкин И. Ю.
студент группы ЭА-071	_____ подпись, дата	Киселев А. В.
студент группы ЭА-082	_____ подпись, дата	Евстратов А. Э.
студент группы ЭАц-081	_____ подпись, дата	Походяев П. И.

Реферат

Отчет 66 с., 2 ч., 11 рис., 3 табл., 88 источн., 1 прил.

Ключевые слова: горные машины, асинхронный электродвигатель, регулируемый электропривод, энергоэффективность.

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 2 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 "Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии" (шифр "2011-1.2.2-226-011") от 24 мая 2011 по направлению "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук в следующих областях:- атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом;- водородная энергетика; - новые и возобновляемые источники энергии; - производства топлив и энергии из органического сырья; - создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии; - создание энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных средств" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук" , направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы – выполнить критериальную оценку эффективности планируемых средств энергосберегающего управления и определить порядок проведения физических и вычислительных экспериментов.

При выполнении работ по этапу использовались:

1. Метод критериальной оценки.
2. Методы планирования эксперимента.

В качестве инструментария использовались:

1. Результаты обзора научных информационных источников в области средств повышения энергоэффективности асинхронных электроприводов горных машин.
2. Факторы и параметры оптимизации экспериментов.

Результаты, полученные при выполнении 2 этапа Государственного контракта:

1. Перечень применяемых методов управления электроприводом горных машин с обоснованием их эффективности.
2. Программа вычислительных и натурных экспериментов.

Содержание

Определения 5
Обозначения и сокращения 6
Введение 8
Разработка плана теоретических и экспериментальных исследований 9
1. Выбор и обоснование оптимального варианта разработки методов энергосберегающего управления электроприводами горных машин, работающих в динамических режимах 9
Характеристика условий эксплуатации горных машин 9
Типовые системы управления асинхронным электроприводом 12
Сравнение типовых систем управления асинхронным электроприводом 24
Критерии оценки 31
Критериальная оценка энергооприманьных систем электропривода 32
Выводы 35
2. Разработка программы вычислительных и натурных экспериментов 35
Факторы, которые будут исследоваться в экспериментах 36
Параметры оптимизации экспериментов 38
Заключение 41
Список использованных источников 42
Приложение 48

Определения

Резкопеременная нагрузка – под этим термином понимается специфичный для технологического процесса функционирования горных машин момент (усилие) нагрузки на рабочем органе, носящий случайный характер из-за изменения свойств горного массива, нерациональных действий машинистов с недостаточной квалификацией и по ряду других причин.

Автокорреляционная функция – функция, которая показывает статистическую взаимосвязь сигнала с копией самого себя, смещенного на величину времени.

Спектральная плотность мощности – функция, задающая распределение мощности сигнала по частотам. Её значение имеет размерность мощности, делённой на частоту, то есть энергии.

Коэффициент полезного действия – характеристика эффективности системы электропривода в отношении выполнения электромеханического преобразования энергии.

Энергоэффективность – комплексное понятие, в рамках данной работы подразумевающее эффективное использование электрической энергии, потребляемой электроприводом а процессе своего функционирования.

Энергооптимальность – характеристика, свидетельствующая о достижении экстремума (максимума или минимума) какого-либо энергетического показателя качества функционирования.

Обозначения и сокращения

Список использованных обозначений:

Индекс * – заданные величины;

Индексы $_{ном}$ и $_н$ – номинальное значение величины;

Индексы $_\alpha$ и $_\beta$ – составляющие вектора в неподвижной системе координат α-β;

Индексы $_u$ и $_v$ – составляющие вектора в системе координат u-v, вращающейся с произвольной скоростью;

Индексы $_d$ и $_q$ – составляющие вектора в системе координат d-q, вращающейся синхронно с одним из векторов потокосцеплений;

α – угол отпирания тиристоров;

α(1-6) – сектор расположения вектора потокосцепления;

U_1 – действующее значение напряжения, подводимого к статору;

U_d –напряжение звена постоянного тока;

f_1 – частота сети, частота основной гармонической составляющей напряжения, подводимого к статору;

M – электромагнитный момент двигателя;

$M_к$ – максимальный критический момент двигателя;

M_c – момент сопротивления;

p – число пар полюсов электродвигателя;

δM – ошибка регулирования момента;

$\delta \Psi$ – ошибка регулирования потокосцепления;

$\boldsymbol{\psi_1}$ – вектор потокосцепления статора;

ψ_1 – амплитуда вектора потокосцепления статора;

ψ_{1x}, ψ_{1y} – составляющие вектора потокосцепления статора;

$\boldsymbol{\psi_2}$ – вектор потокосцепления ротора;

ψ_2 – амплитуда вектора потокосцепления ротора;

ψ_{2x}, ψ_{2y} – составляющие вектора потокосцепления ротора;

$\mathbf{i_1}$ – вектор тока статора;

i_1 – амплитуда вектора тока статора;

i_{1x}, ψ_{1y} – составляющие вектора тока статора;

$\mathbf{i_2}$ – вектор тока ротора;

i_2 – амплитуда вектора тока ротора;

i_{2x}, i_{2y} – составляющие вектора тока я ротора;

ω_0 – угловая скорость идеального холостого хода;

ω_k – угловая скорость системы координат;

ω_ψ – угловая скорость вектора потокосцепления ротора;

ω – угловая скорость вала двигателя;

s – скольжение;

γ – угол между системами координат α-β и d-q;

R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора;

L_1, L_2 – полные индуктивности обмоток статора и ротора;

$L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора;

L_{12}, L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;

σ, ς – коэффициенты рассеяния;
T_2 – постоянная времени ротора;
J – момент инерции механической части электропривода;
W – энергия на валу двигателя;
ΔW – энергия электрических потерь.

Список использованных сокращений:
АД – асинхронных двигатель.
ГМ – горные машины.
ЭП – электрический привод, электропривод.
СУ – система управления.
КПД – коэффициент полезного действия.
ТРН – тиристорный регулятор напряжения.
РСУ – Разомкнутое скалярное управление.
ПУМ – Прямое управление моментом.
ВУ – Векторное управление.
УГУ – Упрощенное градиентное управление.
ПП – Прямой пуск двигателя.

Введение

Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии предполагает создание нового подхода к СУ горных машин.

При этом следует отметить, что все возможные разработки в области энергосбережения средствами электропривода и собственно в электроприводе можно обобщить в пяти различных направлениях. Данные направления включают в себя более рациональное проведение процедуры выбора мощности двигателя для конкретной установки, использование электродвигателя специальной конструкции, изначально обладающего повышенными энергетическими характеристиками, использование специальных устройств для регулирования режима работы электродвигателя, применение регулируемых электроприводов, а также учет большего числа характеристик электропривода в более сложных математических моделях.

Проведенный в ходе первого этапа работ анализ показал многообразие систем управления, применяемых в энергооптимальных частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Данное многообразие, по нашему мнению, вызвано тем, что электрический привод является многомерным и нелинейным объектом управления, что приводит к различию в СУ в зависимости от координат, выбранных для регулирования. В дополнение, структура СУ может принципиально отличаться в зависимости от того, какой тип управления – скалярный или векторный – выбран для ее построения.

К сожалению, несмотря на распространенность решения задачи оптимизации с учетом нелинейных свойств АД, вопрос минимизации потерь в переходных процессах с обеспечением быстродействия, требуемого для функционирования ГМ, в настоящий момент исследован недостаточно. Исходя из этого, поиск и сравнительный анализ способов управления, обеспечивающих повышение эффективности асинхронных электроприводов горных машин, представляет собой важную задачу, особенно, учитывая наблюдаемую интенсификацию процесса внедрения частотно-регулируемых электроприводов в машины горнодобывающего производства.

Разработка плана теоретических и экспериментальных исследований

В рамках выбора и обоснования оптимального варианта разработки методов энергосберегающего управления электроприводами горных машин, работающих в динамических режимах, выполнена сравнительная оценка эффективности планируемых средств энергосберегающего управления, основанная на присвоении различным вариантам весовых коэффициентов и выбор на их основе наилучшего.

В рамках разработки программы вычислительных и натурных экспериментов проведено ранжирование по времени выполняемых экспериментальных работ в соответствии с методами планирования эксперимента.

При этом используются следующие методы:

– методы критериальной оценки;

– методы планирования эксперимента.

Методы критериальной оценки используются для оценки эффективности планируемых мероприятий и полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем. Они позволяют провести объективную количественную оценку.

Методы планирования эксперимента позволяют разработать план проведения теоретических и экспериментальных исследований, дающих достаточные теоретические и достоверные экспериментальные результаты для решения поставленных научно-исследовательских задач. Эти методы дают возможность реализовать принципы рационального планирования эксперимента за счет чего существенно повысить качество планирования в силу создания наиболее эффективной и информативной программы исследований.

1. Выбор и обоснование оптимального варианта разработки методов энергосберегающего управления электроприводами горных машин, работающих в динамических режимах

Для электроприводов ГМ характерны сложные условия эксплуатации, которые будут оказывать определяющее влияние на результаты сравнительного анализа СУ асинхронных частотно-регулируемых ЭП, планируемых к применению на горных машинах. Исходя из этих условий эксплуатации, в первую очередь будет определяться ряд наиболее важных критериев, по которым будет осуществляться ранжированная оценка. Дополнительные параметры для ранжированной оценки будут определяться особенностями технической реализации СУ с учетом современного промышленного уровня.

Характеристика условий эксплуатации горных машин

Требуемое быстродействие СУ асинхронным электроприводом ГМ определяется динамикой нагрузок, преодолеваемых двигателем. В свою очередь нагрузки в электроприводе ГМ зависят от характера их режимов его работы, интенсивности нагружения, структуры механической подсистемы, особенностей отдельных элементов, и изменяются в широких пределах. При этом по трансмиссии проходят два

встречных потока энергии: от электродвигателя к системе «исполнительный орган – забой» и обратный поток. Динамический процесс в данном случае имеет сложный характер, зависящий от множества факторов.

Экспериментальные исследования фактических режимов работы электроприводов ГМ в нашей стране проводились многими научными коллективами. В результате таких исследований [1-22] было установлено, что все режимные параметры ЭП подземных горных машин изменяются в широких пределах случайным образом и не имеют постоянных законов распределения.

Из анализа автокорреляционных функций и спектральных плотностей дисперсии мощности следует, что у всех исследованных ЭП *очистных комбайнов* они однотипны, следовательно, однотипны и их режимы нагружения, в которых преобладают преимущественно детерминированные по частоте колебательные процессы, но со случайными амплитудами и фазами.

Спектральный анализ показал, что 59-80 % дисперсии мощности приходится на долю колебательных составляющих, из них на колебания в диапазоне 5-12 Гц приходится 31-48 % дисперсии, а в диапазоне 0,2-1,5 Гц – 26-32%.

Режимы работы электроприводов *забойных конвейеров*, *перегружателей и скребковых конвейеров* также отличаются значительным спектром нагрузок, изменяющихся в широких пределах, и также зависят от большого числа факторов.

Продолжительность пуска АД с незагруженным конвейером составляет 0,7-1,1 с, а с загруженным – в 2-4 раза больше. Из-за тяжелых условий работы бывают несостоявшиеся пуски и стопорения исполнительных органов. При этом напряжение на зажимах АД в момент пуска снижается на 20 и более процентов. Кратность пускового момента АД в этих условиях составляет всего 2,5-3, а максимального – 3,0-3,5 по отношению к номинальному.

В электроприводах скребковых конвейеров устанавливаются от одного до четырех АД, что вызывает проблему согласования их механических характеристик. Из-за различия механических характеристик АД и турбомуфт они нагружаются поразному, с отличием в 1,4-1,5 раза. При этом мощность, развиваемая головным и хвостовым электроприводами, периодически изменяется в противофазе из-за влияния неустранимой слабины цепи, перемещающейся с головной на хвостовую часть конвейера и обратно [13], с возникновением значительных динамических нагрузок во всех элементах электропривода конвейера и тяговой цепи.

Динамика установившихся эксплуатационных режимов скребковых конвейеров оказывает также значительное влияние на нагрузки в электроприводе и тяговой цепи из-за возникновения автоколебаний в тяговом органе и электроприводах, причем амплитуда и частота автоколебаний зависят от длины конвейера, изменения производительности добычной машины и характера ее движения.

Автоколебания скорости движения и усилий в тяговых цепях приводят к снижению в 2-3 раза надежности и долговечности тяговых цепей, а также электродвигателей и редукторов из-за накопления в них усталостных повреждений и приводят к необходимости ограничения длины тяговых цепей и скоростей их движения.

Установлено, что электроприводы конвейера и их АД имеют высокодинамичную нагрузку, содержащую как случайные, так и гармонические колебания. При

этом случайные составляющие нагрузки находятся в диапазоне до 0,1 Гц и зависят в основном от изменения загрузки конвейера, искривления его става под действием движущейся массы комбайна, а также от перераспределения нагрузки между отдельными АД в многодвигательном электроприводе.

Гармонические колебания нагрузки в диапазоне частот 1-10 Гц возникают из-за внутренних факторов, таких как конструктивные особенности конвейера и динамические свойства отдельных элементов и всего электропривода как системы в целом. Амплитуды колебаний в диапазоне 1-3 Гц составляют 5-10 % от среднего значения потребляемой мощности за период колебаний, а в диапазоне 6-10 Гц – до 90-95%. Эти выводы подтверждает анализ корреляционных функций и спектральных плотностей дисперсии нагрузки.

Режим работы электроприводов *проходческих комбайнов* по многочисленным исследованиям [2, 5-6, 10] является повторно-кратковременным с частыми пусками и резкопеременными динамическими нагрузками с циклами, изменяющимися по продолжительности.

Количество пусков электродвигателей привода исполнительного органа проходческого комбайна, например ПК-9Р, в течение часа составляют 5-7. При этом продолжительность пуска в зависимости от нагрузки изменяется от 0,8 до 1,3 с.

Совокупность колебательной системы, в которую входит проходческий комбайн с его электроприводами и исполнительным органом и горный массив, представляет собой замкнутую нелинейную динамическую систему, в которой устанавливаются автоколебания со смешанным детерминированно-случайным характером [10, 15]. Распределение нагрузок в приводе исполнительных органов в значительной мере отличается от нормального закона распределения, а в распределении нагрузок наблюдаются провалы, которые характерны для гармонической функции. В структуре корреляционных функций присутствуют устойчивые периодические составляющие.

На случайную составляющую нагрузок у комбайнов ПК-3, ПК-3М и 4ПУ приходится 55-65% общей дисперсии нагрузок, а на периодические составляющие – 35-45% [15]. У комбайнов с распорношагающим механизмом передвижения дисперсия случайных составляющих нагрузок в приводе исполнительного органа уменьшается и составляет 25-27% общей дисперсии, а 75% всей дисперсии приходится на периодические нагрузки.

При этом максимальные значения моментов в трансмиссии велики, например, у комбайнов ПК-8, ПК-10 они достигают 6-8-кратных значений номинального момента двигателя и являются опасными для отдельных узлов трансмиссии [16].

Опыт эксплуатации проходческих комбайнов со стреловидным исполнительным органом на шахтах Кузбасса показывает [8], что исполнительный орган комбайнов имеет недостаточную мощность электропривода для разрушения крепких и вязких углей, большую энергоемкость, повышенную динамичность при эксплуатации, снижающую надежность работы и долговечность исполнительного органа, электропривода и всего комбайна в целом. Например, анализ распределения отказов по основным механизмам и узлам проходческих комбайнов со стреловидным исполнительным органом показывает [8, 15], что от 20 до 45% всех отказов приходит-

ся на электропривод исполнительного органа, а среднее время восстановления этих отказов в большинстве случаев превышает среднее время восстановления по комбайну. Основной причиной этих отказов является накопление усталостных повреждений в элементах электропривода.

Опыт эксплуатации комбайнов ПК-9Р в Донбассе показал [2], что простои проходческих забоев из-за отказов комбайнов составляют 25% времени всех простоев при проходке, а из-за ремонта – 17% общего времени работы комбайна.

Аналогичными являются режимы нагружения и у других типов основных и вспомогательных горных машин и установок. Таким образом, приведенные выше количественные характеристики нагрузок, преодолеваемых электроприводами ГМ, свидетельствуют о необходимости высокого быстродействия и высокой точности регулирования СУ электроприводом ГМ.

Типовые системы управления асинхронным электроприводом

В настоящее время на рынке преобразовательной техники, предназначенной для управления асинхронным электроприводом, существует достаточно большое количество устройств, которые позиционируются как средства, позволяющие обеспечить энергосбережение при функционировании технологических установок. Однако, как отмечалось еще в [23], данный результат зачастую является следствием рациональной организации работы электропривода в конкретных технологических условиях. Тем не менее, даже для электроприводов общепромышленного назначения в зависимости от подхода, используемого в его системе управления, энергопотребление может существенно изменяться. Учитывая приведенные характеристики условий эксплуатации ГМ, данное утверждение для их электроприводов будет справедливо в еще большей мере.

В связи с этим целесообразно рассмотреть различные применяемые системы электропривода, среди которых выделим следующие:

– асинхронный электродвигатель с ТРН;
– разомкнутое скалярное управление асинхронным электродвигателем;
– прямое управление моментом;
– векторное управление;
– упрощенное градиентное управление.

Для приведенных систем рассмотрим подробнее принцип их действия.

1. Асинхронный электродвигатель с ТРН

Тиристорные регуляторы напряжения представляют собой тиристорное переключающее устройство по трем фазам двигателя, обеспечивающее плавный пуск и остановку трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Оно объединяет функции плавного пуска и торможения, защиты механизмов и двигателей, а также связи с системами автоматизации [26-28].

Наиболее распространенная структура электропривода по системе ТРН-АД приведена на рис. 1. Она состоит из шести тиристоров, включенных попарно встречно-параллельно в статорные цепи трехфазного асинхронного двигателя.

ТРН предназначен для регулирования первой, или основной, гармоники питающего двигатель напряжения изменением угла открытия тиристоров α в диапазоне

от $\alpha = 0$ до $\alpha = 180°$. В этом случае действующее фазное напряжение первой гармоники изменяется от $U_1=U_{1ном}$, где $U_{1ном}$ – действующее фазное номинальное напряжение питающей сети до $U_1 = 0$. Частота переменного напряжения основной гармоники остается неизменной и равна частоте сети, т.е. $f_1=f_{1ном}$. При таком управлении синхронная скорость асинхронного двигателя и критическое скольжение не изменяются, но регулируется момент двигателя $M=f(U_1^2)$.

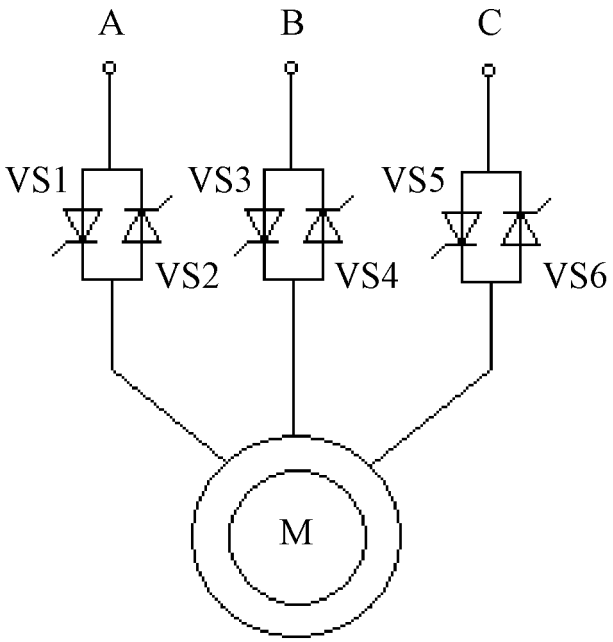

Рис. 1. Структурная схема ТПН-АД

При таком способе управления осуществляется дискретное воздействие на асинхронный двигатель и в течение периода питающего напряжения, равного 0,02 с при частоте $f_{1ном}$ 50 Гц, происходит чередование схем подключения статорных цепей двигателя к трехфазной питающей сети в следующей последовательности: трехфазное подключение, двухфазное подключение разных фаз, отключение всех фаз двигателя. В связи с этим даже в установившемся режиме наблюдаются пульсации момента двигателя с частотой 300 Гц и, при пониженном напряжении, статический режим представляет собой квазистатический, или установившийся динамический, режим. Такие системы электропривода применяются в электроприводах скребковых и ленточных конвейеров, добычных машин и других тиров ГМ, с целью улучшения условий пуска.

2. Разомкнутое скалярное управление асинхронным электродвигателем

Наиболее простым способом частотного регулирования АД является скалярное частотное управление по разомкнутой схеме [29, 30]. Принцип регулирования при этом базируется на линейной зависимости угловой скорости идеального холостого хода ω_0 от частоты питающего напряжения f_1:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p},$$

где p – число пар полюсов электродвигателя. При этом напряжение с требуемой ча-

стотой реализуется в автономном инверторе напряжения преобразователя частоты с помощью широтно-импульсной модуляции.

При частотном регулировании одновременно с изменением частоты необходимо изменять напряжение U_1, подведенное к статору АД. Существует несколько принципов одновременного регулирования частоты и напряжения. Чаще всего стремятся сохранить постоянной перегрузочную способность асинхронного двигателя, т. е. сделать так, чтобы при всех режимах отношение максимального критического момента $M_к$ к моменту сопротивления M_c на валу электродвигателя оставалось постоянным.

Эта задача решается с помощью законов частотного регулирования М.П. Костенко [31], в которых напряжение U_1 необходимо изменять относительно номинального значения $U_н$ пропорционально произведению относительной частоты и квадратного корня из относительного момента:

$$\frac{U_1}{U_н} = \frac{f_1}{f_н}\sqrt{\frac{M_c}{M_н}},$$

где $f_н$ – номинальное значение частоты питающего напряжения; $M_н$ – номинальное значение момента сопротивления.

Из общей формы записи законов М.П. Костенко выводятся частные случаи законов частотного регулирования для различных видов нагрузки. Так, при активной нагрузке и реактивной нагрузке типа «идеальное сухое трение» закон частотного управления принимает наиболее распространенную форму $U_1 / f_1 = const$ (рис. 2, а), а при реактивной нагрузке типа «вентиляторная характеристика» – форму $U_1 / f_1^2 = const$ (рис. 2, б).

Законы частотного регулирования сформулированы, пренебрегая падением напряжения на активных сопротивлениях цепи статора. В связи с этим, при снижении угловой скорости перегрузочная способность электродвигателя уменьшается, однако в пределах диапазона регулирования, свойственного управлению по разомкнутой схеме, падение перегрузочной способности можно считать незначительным.

Электроприводы с разомкнутым скалярным управлением АД предназначены в первую очередь для применения в общепромышленных приводах, однако могут использоваться, так же как и ТРН для обеспечения плавного пуска механизмов.

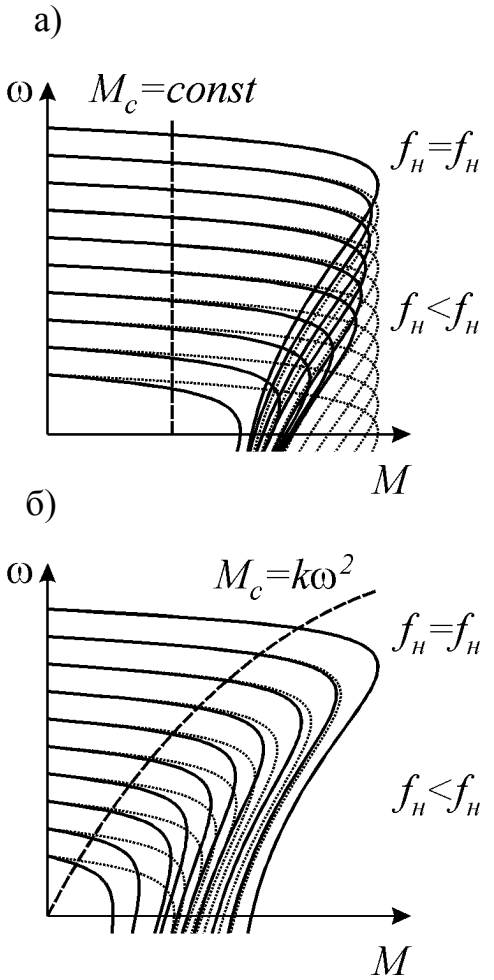

Рис. 2. Механические характеристики частотно-регулируемого асинхронного электропривода:
а) закон $U_1 / f_1 = const$;
б) закон $U_1 / f_1^2 = const$

3. Прямое управление моментом

В случае прямого управления моментом АД, в отличие от рассмотренного выше способа частотного управления, используется не широтно-импульсная модуляция, а изменение состояний ключей автономного инвертора напряжения, исходя из текущего значения потокосцепления ротора и электромагнитного момента [32-34]. Структурная схема такой системы управления показана на рис. 3, а.

Выбор требуемого переключения ключей инвертора производится в соответствии с таблицей оптимальных переключений (табл. 1). Входными величинами для этой таблицы служат сигналы компаратора потока и компаратора момента, сравнивающие их заданные и текущие значения. На выходе компараторов формируется сигнал, принимающий одно из возможных состояний: 0, 1 или -1, исходя из рассогласования.

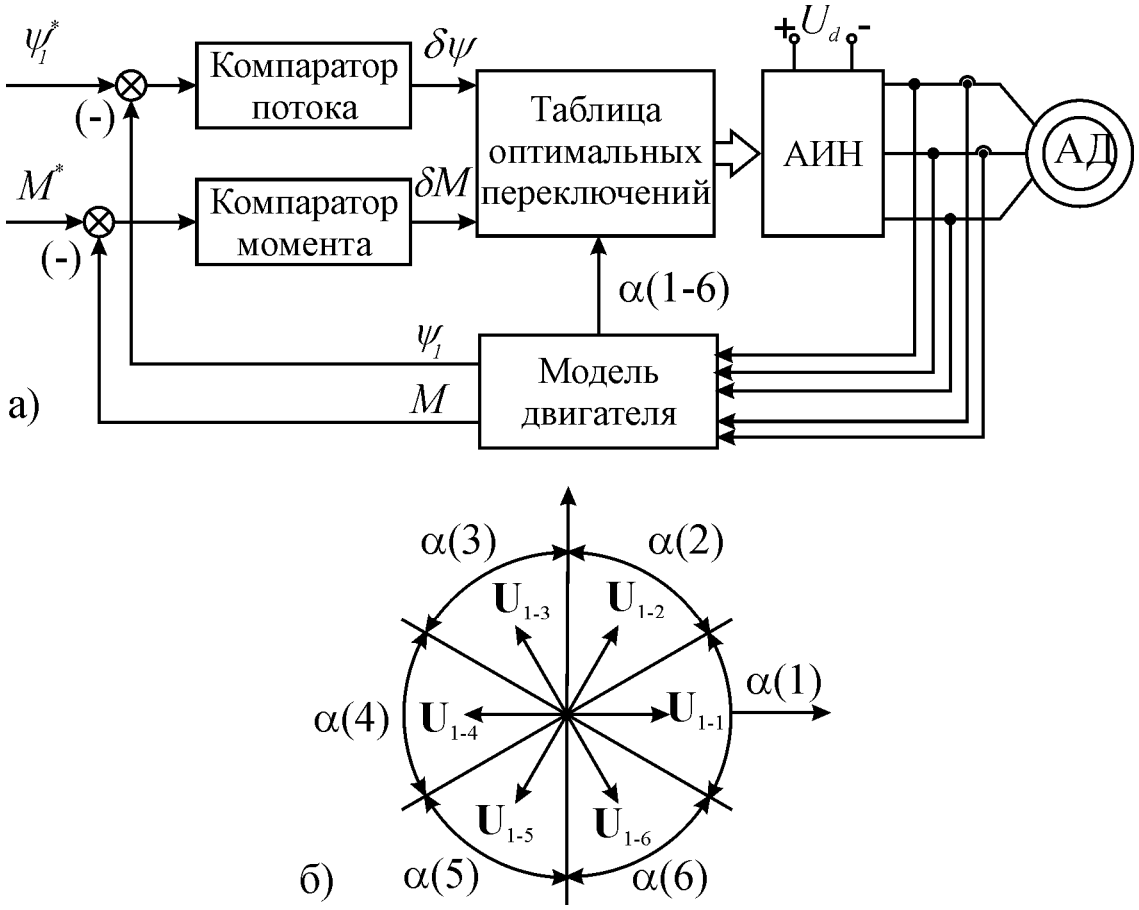

Рис. 3. Прямое управление моментом: а) структурная схема системы управления; б) положения векторов напряжения

В зависимости от значений сигналов компаратора потока и компаратора момента, для каждого из шести секторов комплексной плоскости, в котором в данный момент времени может располагаться вектор потокосцепления ротора, определяется набор ключей инвертора, обеспечивающий устранение рассогласования. При этом

пространственный вектор напряжения на выходе инвертора может занимать одно из шести фиксированных ненулевых положений (рис. 3, б) и два нулевых положения.

В соответствии табл. 1, в зависимости от значений ошибки по моменту δM и ошибки по потокосцеплению $\delta\psi$ для каждого сектора, в котором в данный момент времени располагается вектор потокосцепления, указан вектор напряжения, а следовательно, и набор ключей инвертора, который должен быть включен при данном состоянии. Из нулевых векторов выбирается тот, для включения которого в данной ситуации требуется меньшее число переключений ключей.

Таблица 1

Возможные состояния ключей инвертора

$\delta\Psi$	δM	Сектор					
		α(1)	α(2)	α(3)	α(4)	α(5)	α(6)
1	1	$\mathbf{U_{1\text{-}2}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}3}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}4}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}5}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}6}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}1}}$
	0	$\mathbf{U_{1\text{-}7}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}8}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}7}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}8}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}7}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}8}}$
	-1	$\mathbf{U_{1\text{-}6}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}1}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}2}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}3}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}4}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}5}}$
0	1	$\mathbf{U_{1\text{-}3}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}4}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}5}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}6}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}1}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}2}}$
	0	$\mathbf{U_{1\text{-}8}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}7}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}8}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}7}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}8}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}7}}$
	-1	$\mathbf{U_{1\text{-}5}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}6}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}1}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}2}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}3}}$	$\mathbf{U_{1\text{-}4}}$

Для организации прямого управления моментом надо располагать текущими значениями потокосцепления статора и момента АД. Эти значения рассчитываются в модели двигателя на основании значений тока и напряжения на выходе инвертора (рис. 3, а). Кроме того, для определения номера сектора, в котором в данный момент находится вектор потокосцепления статора, также необходимо использовать модель двигателя.

Основным недостатком ПУМ является необходимость иметь информацию о параметрах двигателя, которая не всегда априори имеется, к тому же может изменяться в процессе работы в зависимости от условий эксплуатации электропривода. Также Важно использовать правильную модель двигателя для определения M и ψ_1, поскольку существуют модели, имеющие ограниченную работоспособность при низких угловых скоростях АД.

4. Векторное управление

Векторное управление строится на базе математической модели АД, записанной для системы координат, вращающейся синхронно с одним из векторов потокосцеплений [32, 35, 36]. Исходя из этого, векторное управление более корректно именовать полеориентированным управлением, как это делается в англоязычной литературе [37-40].

Рассмотрим модель АД в системе координат d-q, в которой ось d направлена вдоль вектора потокосцепления ротора, как это показано на рис. 4. Уравнения электрического равновесия асинхронного двигателя в этом случае будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} u_{1d} = i_{1d}R_1 + \dfrac{L_m}{L_2}\dot{\psi}_{2d} + \varsigma L_1 \dot{i}_{1d}; \\ u_{1q} = i_{1q}R_1 + \dfrac{L_m}{L_2}\dot{\psi}_{2q} + \varsigma L_1 \dot{i}_{1q}; \\ 0 = i_{2d}R_2 + \dot{\psi}_{2d} - \left(\omega_\psi - p\omega\right)\psi_{2q}; \\ 0 = i_{2q}R_2 + \dot{\psi}_{2q} + \left(\omega_\psi - p\omega\right)\psi_{2d}, \end{cases}$$

где u_{1d}, u_{1q} – составляющие вектора напряжения статора; i_{1d}, i_{1q}, i_{2d}, i_{2q} – составляющие векторов тока статора и ротора соответственно; ψ_{2d}, ψ_{2q} – составляющие векторов потокосцепления ротора; ω_ψ – угловая скорость вектора потокосцепления ротора; R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора; $L_1=L_{\sigma1}+L_m$, $L_2=L_{\sigma2}+L_m$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора; $L_{\sigma1}$, $L_{\sigma2}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; ω – угловая скорость вала двигателя; $\varsigma=1-L_m/(L_1L_2)$.

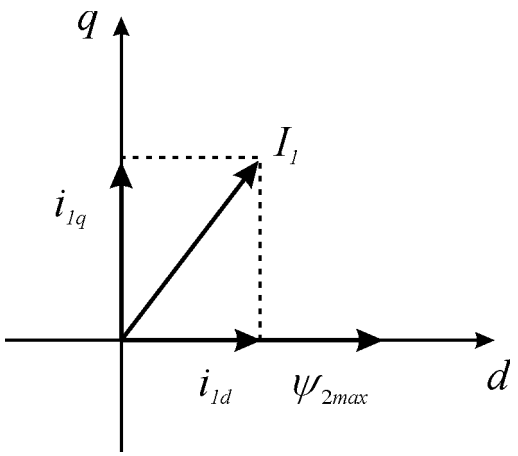

Рис. 4. Векторная диаграмма АД

Учитывая, что для выбранного расположения системы координат $\psi_{2d}=\psi_{2max}$, а $\psi_{2q}=0$, уравнения электрического равновесия роторной цепи системы примут вид:

$$\begin{cases} 0 = i_{2d}R_2 + \dot{\psi}_{2d}; \\ 0 = i_{2q}R_2 + \left(\omega_\psi - p\omega\right)\psi_{2d}. \end{cases} \quad (1)$$

Выразим составляющие тока ротора через потокосцепление ротора и ток статора:

$$i_{2d} = \frac{\psi_{2d}}{L_2} - i_{1d}\frac{L_m}{L_2};$$

$$i_{2q} = \frac{\psi_{2q}}{L_2} - i_{1q}\frac{L_m}{L_2},$$

и подставим в (1). В результате получим:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{2\max} = \dfrac{L_m}{T_2} i_{1d} - \dfrac{1}{T_2} \psi_{2\max}; \\ 0 = \dfrac{L_m}{T_2} i_{1q} + \left(\omega_\psi - p\omega\right)\psi_{2\max}, \end{cases} \tag{2}$$

где $T_2 = L_2 / R_2$ – постоянная времени ротора.

Уравнение электромагнитного момента для выбранной системы координат имеет следующий вид:

$$M = p\frac{L_m}{L_2}\left(\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}\right) = p\frac{L_m}{L_2}\psi_{2\max} i_{1q}.$$

Из полученной модели видно, что составляющая тока статора i_{1d} формирует потокосцепление ротора, а i_{1q} – электромагнитный момент, что дает возможность разделить каналы регулирования момента и магнитного потока.

Структурная схема асинхронного двигателя, управляемого током статора, приведена на рис. 5. На ней канал формирования потокосцепления ротора является апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени ротора T_2, а канал формирования момента при постоянном потокосцеплении ротора – безынерционным звеном. Полученная модель является линейной только при постоянстве потокосцепления, поэтому на практике обычно сначала намагничивают магнитную систему машины до требуемого уровня, после чего начинают регулировать момент.

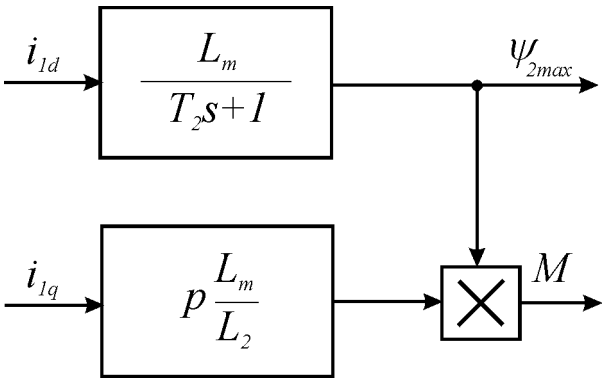

Рис. 5. Структурная схема АД в системе координат *d-q* при питании от источника тока

На основании этой модели строят систему управления, как обратную по отношению к структуре двигателя. Структурная схема этой системы управления представлена на рис. 6.

Измеренные токи статора $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ и сигналы задания токов на выходе системы управления $i_{1\alpha}^*$, $i_{1\beta}^*$ формируются в неподвижной системе координат. В связи с этим, при полеориентированном управлении используют координатные преобразования для перехода от неподвижной системы координат α-β к вращающейся синхронно с вектором потокосцепления ротора – *d-q*, и обратно, в соответствии с зависимостями:

$$i_{1d} = i_{1\alpha}\cos\gamma + i_{1\beta}\sin\gamma;$$
$$i_{1q} = -i_{1\alpha}\sin\gamma + i_{1\beta}\cos\gamma;$$
$$i^*_{1\alpha} = i^*_{1d}\cos\gamma - i^*_{1q}\sin\gamma;$$
$$i^*_{1\beta} = i^*_{1d}\sin\gamma + i^*_{1q}\cos\gamma,$$
где γ – угол между системами координат α-β и d-q.

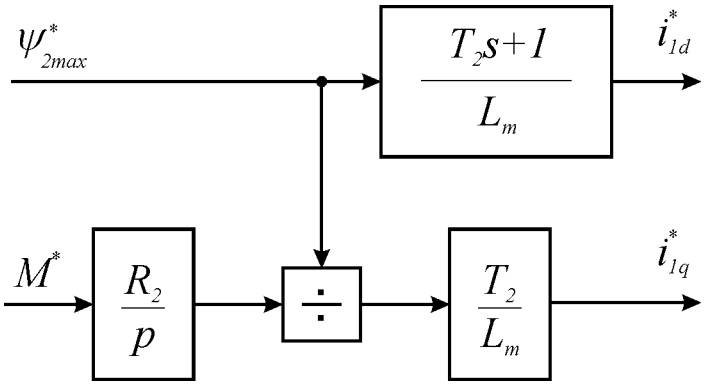

Рис. 6. Структурная схема системы полеориентированного управления АД, построенной на базе токовой модели

Для определения угла γ существует два основных способа: прямое и косвенное полеориентирование [58-64]. В первом способе по измеренным токам и напряжениям рассчитываются составляющие вектора потокосцепления ротора по неподвижным осям α и β, после чего определяются необходимые для координатных преобразований значения синуса и косинуса угла γ:

$$\cos\gamma = \frac{\psi_{2\alpha}}{\psi_{2\max}};\ \sin\gamma = \frac{\psi_{2\beta}}{\psi_{2\max}};\ \psi_{2\max} = \sqrt{\psi^2_{2\alpha} + \psi^2_{2\beta}}\,.$$

Во втором способе угол γ определяют путем интегрирования частоты вращения вектора потокосцепления ротора, которое выражают из второго уравнения (2):

$$\gamma = \int\left(\frac{L_m}{T_2}\frac{i_{2q}}{\psi_{2\max}} + \omega\right)dt\,.$$

При прямом полеориентировании требуется знать все электрические параметры двигателя, которые на практике не всегда известны, в связи с чем такие системы управления дополняют системой идентификации параметров АД. При косвенном полеориентировании требуется установка высокоточного датчика угловой скорости ротора двигателя. Ошибка определения угла γ при таком подходе также сильно зависит от точности задания величины активного сопротивления ротора, которое может существенно изменятся при изменении теплового состояния обмотки ротора. Для исключения этого влияния, на практике используют устройство идентификации, которое отслеживает в реальном времени изменение R_2 [41-43], либо делают систему нечувствительной (робастной) по отношению к его изменениям [44].

В качестве источника тока в такой системе может использоваться автономный инвертор напряжения с обратной связью по току статора [32]. В этом случае задание напряжения формируется как:

$$u_{1\alpha}^{*} = k_i \int (i_{1\alpha}^{*} - i_{1\alpha})dt + k_p (i_{1\alpha}^{*} - i_{1\alpha});$$

$$u_{1\beta}^{*} = k_i \int (i_{1\beta}^{*} - i_{1\beta})dt + k_p (i_{1\beta}^{*} - i_{1\beta}),$$

где $i_{1\alpha}^{*}$, $i_{1\beta}^{*}$ – составляющие вектора заданного тока статора в неподвижной системе координат; k_i, k_p – постоянные коэффициенты.

5. Градиентное управление

Градиентное управление решает основную технологическую задачу асинхронного электропривода, а именно управление электромагнитным моментом асинхронного двигателя.

В общем случае, электромагнитный момент возникает в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора электродвигателя. При этом момент одной и той же величины может быть получен при взаимодействии полей разной интенсивности и при различном их взаимном расположении, что наглядно показано на рис. 7. Исходя из этого, при формировании требуемого электромагнитного момента возможна работа электродвигателя в энергетически неоптимальных режимах, что недопустимо с точки зрения эффективности. Чтобы избежать таких режимов работы необходимо иметь возможность управлять потокосцеплением обмоток двигателя.

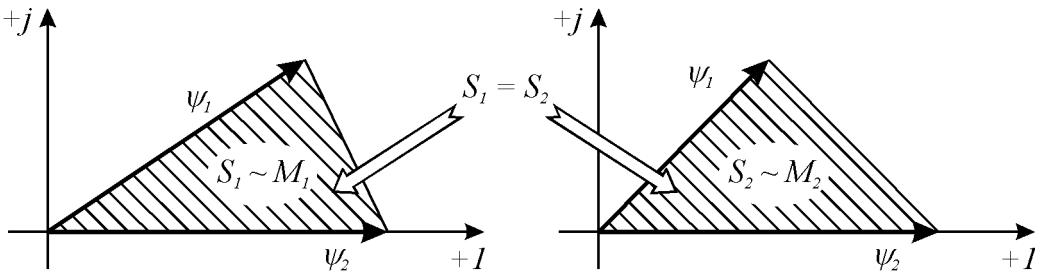

Рис. 7. Пример различного расположения магнитных полей статора и ротора, дающих одинаковый электромагнитный момент

Таким образом, для качественного управления процессом электромеханического преобразования энергии достаточно решить три локальные задачи: формирование электромагнитного момента, потокосцепления обмотки статора и потокосцепления обмотки ротора.

Для получения обобщенного решения этих задач воспользуемся математическим описанием процесса электромеханического преобразования энергии в виде известной модели обобщенной электрической машины [25], выраженной через потокосцепления двигателя в произвольно вращающейся системе координат *u-v*:

$$\frac{\psi_{1u}}{dt} = -\sigma L_2 R_1 \psi_{1u} + \sigma L_{12} R_1 \psi_{2u} + \omega_k \psi_{1v} + u_{1u};$$

$$\frac{\psi_{1v}}{dt} = -\sigma L_2 R_1 \psi_{1v} + \sigma L_{12} R_1 \psi_{2v} - \omega_k \psi_{1u} + u_{1v};$$

$$\frac{\psi_{2u}}{dt} = \sigma L_{12} R_2 \psi_{1u} - \sigma L_1 R_2 \psi_{2u} + \left(\omega_k - p\omega\right)\psi_{2v} + u_{2u};$$
$$\frac{\psi_{2v}}{dt} = \sigma L_{12} R_2 \psi_{1v} - \sigma L_1 R_2 \psi_{2v} - \left(\omega_k - p\omega\right)\psi_{2u} + u_{2v}, \quad (3)$$

где ψ_{1u}, ψ_{1v} и ψ_{2u}, ψ_{2v} – составляющие векторов потокосцепления статора и ротора соответственно; u_{1u}, u_{1v} и u_{2u}, u_{2v} – составляющие векторов напряжения, подводимого к статору и ротору; R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора; L_1, L_2 – индуктивности статора и ротора; L_{12} – взаимная индуктивность; $\sigma = 1/(L_1L_2\text{-}L_{12}^2)$; p – количество пар полюсов; ω – угловая скорость вала двигателя; ω_k – угловая скорость системы координат.

Для этой модели поставленные задачи управления математически можно сформулировать в виде следующих целей:

$$M = K(\psi_{1v}\psi_{2u} - \psi_{1u}\psi_{2v}) = M^*;$$
$$\psi_1^2 = \psi_{1u}^2 + \psi_{1v}^2 = \left(\psi_1^2\right)^*; \quad (4)$$
$$\psi_2^2 = \psi_{2u}^2 + \psi_{2v}^2 = \left(\psi_2^2\right)^*,$$

где индексом x^* отмечены заданные величины; M – электромагнитный момент; ψ_1 и ψ_2 – амплитуды векторов потокосцепления статора и ротора соответственно; $K=pL_{12}\sigma$.

Задача реализации целей управления (4) с учетом сложности математического описания объекта требует использования нелинейных методов управления. Одним из них является метод скоростного градиента [45, 46], гарантирующий изменение управляющего воздействия пропорционально градиенту скорости изменения функционала, задающего цель управления.

Чтобы воспользоваться этим методом, для объекта управления, представленного в виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x},\mathbf{u}),$$

где $\mathbf{x}$ – вектор переменных состояния объекта управления; $\mathbf{u}$ – вектор управляющих воздействий, необходимо записать цели управления в виде локального целевого функционала:

$$Q = 0{,}5[\mathbf{y} - \mathbf{y}^*]^T \mathbf{H}[\mathbf{y} - \mathbf{y}^*],$$

где $\mathbf{y}$ и $\mathbf{y}^*$ – вектор-функция управляемых величин и их желаемых траекторий соответственно; $\mathbf{H}$ – матрица весовых коэффициентов.

Для построения алгоритма управления необходимо вычислить скалярную функцию Ω, представляющую собой скорость изменения функционала Q в силу уравнений объекта управления:

$$\Omega = \frac{\partial Q}{\partial t} + [\nabla_{\mathbf{x}} Q]^T \mathbf{F}(\mathbf{x},\mathbf{u}),$$

зная которую алгоритм изменения управляющего воздействия определяется как:

$$\frac{\mathbf{du}}{\mathbf{dt}} = -\mathbf{\Gamma}\nabla_{\mathbf{u}}\Omega,$$

где **Г** – матрица усиления.

Результатом применения метода скоростного градиента для обобщенной электрической машины (3), выступающей в качестве модели процесса электромеханического преобразования энергии, и целей управления (4) является обобщенный алгоритм, работу которого естественно называть градиентным управлением:

$$\dot{\mathbf{u}} = -\mathbf{r}, \tag{5}$$

где **r** – вектор-функция переменных состояния:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{1u} \\ u_{1v} \\ u_{2u} \\ u_{2v} \end{bmatrix}; \ \mathbf{r} = \begin{bmatrix} -h_1\psi_{2v}\Delta_M + h_2\psi_{1u}\Delta_{\Psi 1} \\ h_1\psi_{2u}\Delta_M + h_2\psi_{1v}\Delta_{\Psi 1} \\ h_1\psi_{1v}\Delta_M + h_3\psi_{2u}\Delta_{\Psi 2} \\ -h_1\psi_{1u}\Delta_M + h_3\psi_{2v}\Delta_{\Psi 2} \end{bmatrix};$$

$$\Delta_M = M - M^*; \ \Delta_{\Psi 1} = \psi_1^2 - \left(\psi_1^2\right)^*; \ \Delta_{\Psi 2} = \psi_2^2 - \left(\psi_2^2\right)^*;$$

h_1, h_2, h_3 – настроечные коэффициенты, определяющие вес каждой из целей (4).

Фактически, приведенный алгоритм представляет собой математические зависимости, определяющие в каком направлении должен изменяться вектор управляющих воздействий.

В простейшем случае реализовать заданное направление вектора **u** можно с использованием интегрального закона регулирования, однако метод скоростного градиента предоставляет более широкие возможности для управления электромеханическими преобразователями. Его форма записи может конкретизироваться не только в интегральном виде, но и трансформироваться в форму линейной или знаковой зависимости [45, 46], представляя собой пропорциональный или релейный регулятор. Очевидно также, что не исключены различные комбинации способов задания направления для вектора управляющих воздействий, применение которых будет определять динамику процесса электромеханического преобразования энергии, управляемого по закону (5).

Анализируя приведенный алгоритм градиентного управления, следует обратить особое внимание на то, что при его синтезе использовалась математическая модель обобщенной электрической машины, рассматриваемая в произвольно вращающейся системе координат, однако как составляющий элемент в уравнении (5) угловая скорость системы координат ω_k отсутствует. Это позволяет сделать вывод, что алгоритм управления (5) инвариантен относительно выбранной системы координат и может без изменений использоваться при необходимости координатных преобразований. В силу этих особенностей обобщенная форма алгоритма градиентного управления в ряде случаев может по смыслу совпадать с известными законами управления электродвигателями.

Чтобы наглядно продемонстрировать структуру градиентного управления на рис. 8 приведена блок-схема, отражающая взаимодействие между его отдельными составляющими. Она подчеркивает, что для реализации алгоритма управления достаточно информации о векторах потокосцепления статора и ротора электродвигателя $\boldsymbol{\psi}_1$ и $\boldsymbol{\psi}_2$, независимо от того, относительно какой системы координат рассмат-

ривается электродвигатель как электромеханический преобразователь энергии. Также на этой блок-схеме разделены элементы, обеспечивающие формирование направления вектора управляющих воздействий **u** и его реализацию с помощью регулятора, поскольку направление вектора **u** определяется аналитически исходя из заложенных целей управления, а задача выбора регулятора для его реализации должна решаться исходя из требований, предъявляемых к качеству переходных процессов в электроприводе.

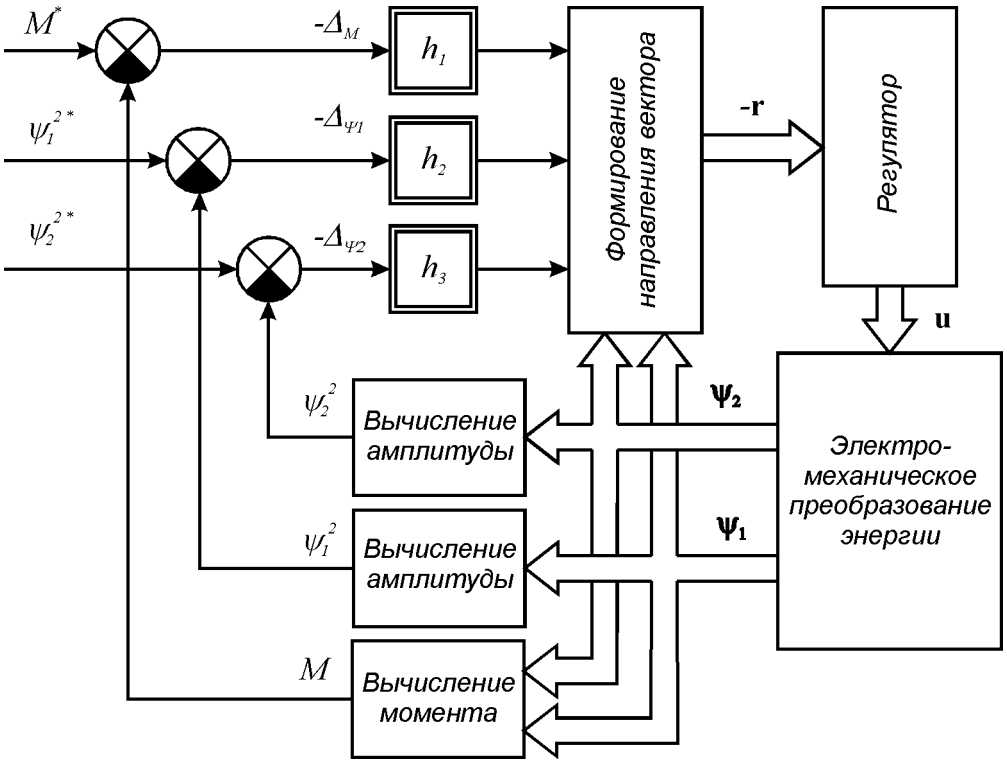

Рис. 8. Структура системы управления

Отдельной задачей, не имеющей однозначного решения, является выбор значений настроечных коэффициентов h_1, h_2 и h_3. При их определении необходимо либо проводить анализ динамики работы электропривода и аналитически выводить значения настроечных коэффициентов в зависимости от его параметров, либо адаптировать алгоритм (5) к текущему состоянию, в случае чего настроечные коэффициенты будут зависеть от потокосцеплений двигателя. Таким образом, в общем случае настроечные коэффициенты не являются константами, что графически выделено на рис. 8.

Несмотря на перечисленные особенности, важно отметить, что обобщенную форму алгоритма (5) можно использовать для управления электрическими двигателями любого типа. Для этого достаточно применить приемы, справедливые для перехода от обобщенной электрической машины к математическому описанию конкретных типов двигателей. При этом, однако, становится очевидным, что решение задачи в полном соответствии с изначально поставленными целями возможно лишь для тех типов электрических машин, в которых конструктивно предусмотрены каналы воздействия не менее чем на три составляющие вектора **u**, поскольку в про-

тивном случае система становится лишь частично управляемой. Этому требованию в полной мере отвечают синхронные электродвигатели и машины двойного питания.

При получении на базе обобщенного алгоритма частного решения для управления АД, двигатель удобно рассматривать в неподвижной системе координат α-β, в которой вектор управляющих воздействий запишется как:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{1\alpha} & u_{1\beta} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

С учетом приведенного вектора **u** математическая зависимость (5) трансформируется в выражение:

$$u_{1\alpha} = -\int\left(-h_1\psi_{2\beta}\Delta_M + h_2\psi_{1\alpha}\Delta_{\Psi 1}\right)dt;$$
$$u_{1\beta} = -\int\left(h_1\psi_{2\alpha}\Delta_M + h_2\psi_{1\beta}\Delta_{\Psi 1}\right)dt.$$

Как можно отметить, в приведенном выражении отсутствует возможность формировать амплитуду вектора потокосцепления ротора. Это объясняется частичной управляемостью асинхронного двигателя относительно изначально поставленных целей управления.

Несмотря на формальное несоответствие поставленным задачам электропривода, анализ динамических свойств модификации алгоритма градиентного управления для АД, изложенный в [47, 48], свидетельствует, что по основным показателям он не уступает широко известному полеориентированному управлению и, следовательно, данная модификация алгоритма полностью применима для управления электроприводом на базе АД. Применимость данного способа управления для электроприводов с высокой динамикой, характерной для ГМ, обоснована теоретически и экспериментально [48-50].

Сравнение типовых систем управления асинхронным электроприводом

Энергетические характеристики асинхронного электропривода определяются уровнем его потерь при электромеханическом преобразовании энергии, а также потерь в полупроводниковом управляющем устройстве, каждый из которых зависит от режима его работы [24]. При этом на энергопотребление оказывает влияние не только величина преодолеваемой нагрузки и необходимость разгонов и торможений, но и текущее состояние, как двигателя, так и преобразователя. В частности, нелинейный характер напряжения, питающего двигатель, а также ограничения, накладываемые электрической сетью на его величину, увеличивает как электрические, так и магнитные потери, вследствие чего растет потребляемый ток двигателя и снижается его КПД. В общие потери электропривода добавляются также потери в электрическом преобразователе, сетевых фильтрах и питающих двигатель кабелях, которые зависят, в том числе, от требуемой угловой скорости. Исходя из этого, всестороннюю оценку энергетических характеристик конкретного электропривода можно получить только в ходе серии физических экспериментов.

К сожалению, при постановке задачи сравнения с точки зрения энергопотребления различных преобразовательных устройств и систем управления асинхронным электроприводом физический эксперимент поставить затруднительно, особенно если речь идет об оценке пилотных разработок, для которых не создана широкая ли-

нейка мощностей. Вычислительный эксперимент позволит произвести такую оценку, но для его проведения необходимо использовать компьютерную модель, позволяющую учитывать основные факторы, влияющие на энергетические характеристики регулируемого асинхронного электропривода.

Помимо сравнения энергетических характеристик, для электроприводов важно оценить позволяет ли система управления, обеспечивающая минимальное энергопотребление, добиться высоких динамических показателей работы, поскольку меры повышения энергоэффективности могут привести к их снижению. Исходя из вышесказанного, рассмотрим результат сравнительного анализа как энергетических, так и динамических характеристик различных способов управления асинхронным электроприводом.

При анализе использовалась компьютерная модель, в которой приняты общеизвестные допущения для моделирования асинхронных двигателей [25], однако учитывается кривая намагничивания, эффект вытеснения токов для нерегулируемого электропривода. Для регулируемого электропривода также учитывался нелинейный характер питающего напряжения, а также ограничения на величину напряжения, накладываемые питающей сетью. Моделирование производилось для двигателей малой средней и высокой мощности марок 4А80А4У3, 4А280S4У3 и 4А315М4У3 соответственно, но с учетом удобства интерпретации таблицы и графики приведены только для двигателя марки 4А80А4У3, мощность которого составляет 1,1 кВт. Листинг программы, написанной в среде разработки Delphi, приведен в Приложении.

Сравнение энергетических характеристик различных систем электропривода проводилось по результатам пуска электродвигателя из состояния покоя в рабочую точку с номинальной угловой скоростью и нагрузкой, при этом характер нагрузки был выбран типа «идеальное сухое трение». В качестве эталонной меры использовались результаты прямого пуска электродвигателя, а для оценки были выбраны следующие системы электропривода:

1. Асинхронный электродвигатель с тиристорным регулятором напряжения. В данной системе в зависимости от требуемой интенсивности разгона изменялась временная диаграмма угла отпирания тиристоров в статорной цепи двигателя.

2. Разомкнутое скалярное управление асинхронным электродвигателем. В качестве закона частотного регулирования применен наиболее простой вариант $U/f=const$ с линейной характеристикой и отсутствием компенсации падения напряжения на активных сопротивлениях цепи статора.

3. Прямое управление моментом.

4. Векторное управление асинхронным электродвигателем при питании от регулируемого источника тока. Учитывая, что допущения об идеальности источника тока могут негативно отразиться на показателях регулирования электропривода в целом, в качестве источника тока выбран автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией, охваченный обратными связями по току, с включением в контур регулирования пропорционально-интегральных регуляторов, настроенных на обеспечение полосы пропускания разомкнутого контура равной 50 Гц.

5. Упрощенное градиентное управление асинхронным двигателем, где для настройки весовых коэффициентов применен подход нормирования относительно

номинальных значений, а для реализации заданного направления вектора подводимого к двигателю напряжения использована комбинация пропорционального и интегрального закона регулирования. Таким образом, управление асинхронным двигателем осуществляется автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией по закону:

$$\mathbf{u} = -g\mathbf{r} - \lambda \int \mathbf{r},$$

где $\mathbf{u}=[u_{s\alpha}, u_{s\beta}]^{\mathrm{T}}$ – вектор подводимого к статору двигателя напряжения в неподвижной системе координат α-β; g, λ – коэффициенты усиления пропорциональной и интегральной составляющих закона управления; $\mathbf{r}$ – вектор-функция управления:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} -\dfrac{M - M^*}{M_n}\psi_{s\beta} + \dfrac{\psi_s^{\,2} - \psi_s^{*2}}{\psi_{sn}^{\,2}}\psi_{s\alpha} \\ \dfrac{M - M^*}{M_n}\psi_{s\alpha} + \dfrac{\psi_s^{\,2} - \psi_s^{*2}}{\psi_{sn}^{\,2}}\psi_{s\beta} \end{bmatrix};$$

M, M_n, M^* – текущий, номинальный и заданный электромагнитный момент двигателя соответственно; ψ_s, ψ_{sn}, ψ_s^* – текущая, номинальная и заданная амплитуда вектора потокосцепления статора; $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$ – составляющие вектора потокосцепления статора в системе координат α-β. Значения коэффициентов усиления выбирались из условия, чтобы подводимое к статору двигателя напряжение при максимальном рассогласовании не превышало допустимого значения.

Следует отметить, что прямое управление моментом, векторное управление и градиентное управление относятся к тому классу систем, которые обеспечивают поддержание на заданном уровне электромагнитного момента асинхронного двигателя, а для управления угловой скоростью в них применяются регуляторы скорости, зачастую пропорционально-интегрального типа. При этом, как отмечается в [51], от выбранных настроек этих регуляторов существенно зависит энергопотребление электропривода, так количество потребляемой энергии практически прямо пропорционально коэффициенту передачи. Таким образом, задача настройки регулятора скорости для этих систем электропривода является достаточно важной для проведения сравнительного анализа. Например, снижение коэффициента передачи увеличит ошибку регулирования, и, как следствие, приведет к снижению угловой скорости вала двигателя при той же нагрузке. Значит, наблюдаемое уменьшение потерь при работе электропривода может объясняться не энергоэффективностью самой системы управления, а неверной, по сути, настройкой регулятора скорости, спровоцировавшей снижение полезной мощности на валу.

Исходя из этого, при компьютерном моделировании во всех перечисленных системах электропривода, во-первых, были использованы пропорциональные регуляторы скорости с идентичной настройкой, а во-вторых, сама настройка производилась из расчета, что скольжение двигателя по окончании пуска должно соответствовать номинальному значению s_n,. Чтобы это обеспечить, использовалась классическая методика линейной теории автоматического управления, основанная на принципе последовательной коррекции и обеспечивающая замкнутому контуру свойства

одноемкостного звена с заданной инерционностью. Для ее применения были приняты допущения, что механическая часть электропривода с достаточной точностью описывается одномассовой системой, а инерционность системы управления электромагнитным моментом пренебрежимо меньше инерционности контура регулирования угловой скорости T.

Структурная схема контура, соответствующая перечисленным условиям, приведена на рис. 9, где обозначено ω_n, ω^* – заданная и номинальная угловая скорость двигателя соответственно; J – момент инерции механической части электропривода. Согласно этой схеме, уравнение статического равновесия электропривода выражается зависимостью:

$$\omega_n = \omega^* - \frac{T}{J} M_n,$$

откуда, приняв в качестве ω^* угловую скорость идеального холостого хода ω_0, определим:

$$T = J\omega_0 \frac{s_n}{M_n}.$$

Полученная инерционность контура регулирования угловой скорости, согласно проведенным расчетам, выше электромагнитной постоянной времени, что свидетельствует о допустимой интенсивности протекания переходных процессов по сравнению с неуправляемым пуском двигателя и, как следствие, о правомерности сравнения всех перечисленных выше систем электропривода.

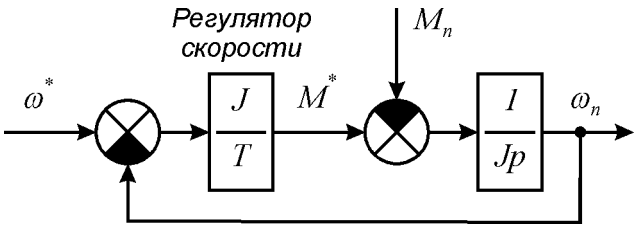

Рис. 9. Структурная схема контура регулирования угловой скорости

Непосредственное сопоставление энергетических характеристик проводилось путем сравнения полезной энергии на валу двигателя W и энергии электрических потерь ΔW в абсолютном выражении и относительно потребляемой двигателем энергии, рассчитанных за фиксированный промежуток времени при различных значениях заданного времени перехода из состояния покоя в номинальную рабочую точку T_r. Количественно полученный результат представлен в табл. 2.

Общий характер представленных данных сохраняется и для двигателей средней и высокой мощности, однако, что соответствует принципам проектирования электродвигателей, с ростом мощности величина потерь снижается. Примечательно, что за исключением системы с тиристорным регулятором напряжения, все системы электропривода имеют оптимальное время T_r, соответствующее минимуму потерь энергии, которое, как показали исследования, близко по значению к длительности переходного процесса прямого пуска асинхронного двигателя.

Таблица 2

Энергоэффективность систем электропривода

T_r, с	W, Вт·с / ΔW, Вт·с / ΔW, %					
	ПП	ТРН	РСУ	ПУМ	ВУ	УГУ
0,1	5077 / 1986 / 28,1	5001 / 2101 / 29,6	5092 / 1843 / 26,6	5116 / 1850 / 26,5	4399 / 1783 / 28,8	4911 / 1764 / 26,4
0,2		4912 / 2156 / 30,5	5049 / 1732 / 25,5	5062 / 1779 / 26,0	4372 / 1693 / 27,9	4873 / 1657 / 25,4
0,3		4822 / 2209 / 31,4	4997 / 1683 / 25,2	5007 / 1753 / 25,9	4335 / 1645 / 27,5	4824 / 1632 / 25,3
0,4		4733 / 2261 / 32,3	4941 / 1667 / 25,2	4652 / 1740 / 25,9	4759 / 1659 / 25,8	4772 /1619 / 25,3
0,5		4644 / 2312 / 33,2	4882 / 1666 / 25,4	4898 / 1731 / 26,1	4708 / 1665 / 25,9	4719 / 1611 / 25,4
0,8		4380 / 2462 / 35,9	4714 / 1639 / 25,8	4734 / 1714 / 26,5	4549 / 1621 / 26,3	4560 / 1598 / 25,9
1,1		4118 / 2605 / 38,7	4543 / 1637 / 26,5	4570 / 1703 / 27,1	4390 / 1607 / 26,8	4399 / 1589 / 26,5
1,4		3858 / 2743 / 41,5	4376 / 1625 / 27,1	4406 / 1696 / 27,8	4223 / 1598 / 27,4	4240 / 1582 / 27,1
1,7		3599 / 2875 / 44,4	4207 / 1621 / 27,8	4242 / 1690 / 28,5	4070 / 1590 / 28,1	4080 / 1575 / 27,8
2,0		3343 / 3002 / 47,3	4039 / 1614 / 28,5	4079 / 1686 / 29,2	3910 / 1584 / 28,8	3920 / 1569 / 28,6

Время расчета энергии 5 с.

Производя количественное сравнение рассмотренных систем электропривода, во-первых, подтверждается, что частотные способы управления позволяют сократить электрические потери даже на двигателях малой мощности, а при возрастании мощности наблюдается значительное повышение энергоэффективности, во-вторых, применительно к задаче пуска электропривода этого сокращения потерь можно добиться даже с применением наиболее простого разомкнутого скалярного управления.

Исходя из этого, эффективное применение прямого управления моментом, векторного управления, градиентного управления и других систем аналогичного типа в силу их большей стоимости возможно только когда перед электроприводом стоит задача динамичного регулирования, требующая управления непосредственно электромагнитным моментом двигателя. Таким образом, помимо сравнения энергоэффективности, данные системы оценивались по динамическим показателям качества.

Сравнение динамических характеристик проводилось в нескольких режимах. Первым рассматривался вопрос виляния T_r на динамическую точность регулирования электромагнитного момента в том же режиме, в котором анализировалась энергоэффективность, а также на статическую точность регулирования потокосцепле-

ния. Далее оценивалось влияние на показатели регулирования электропривода динамики изменения потокосцепления.

В силу нелинейного характера питающего напряжения дать четкую количественную оценку ошибкам регулирования можно только с применением фильтрации к полученным результатам моделирования, понимая при этом, что результат будет обладать погрешностью. Анализируя полученные результаты данным образом можно отметить, что во всех рассмотренных системах динамическая ошибка регулирования электромагнитного момента двигателя не зависит от интенсивности переходных процессов по угловой скорости и для прямого управления моментом находится в пределах 20 %, а для векторного управления и градиентного управления – 35%. Статическая ошибка регулирования потокосцепления во всех системах так же практически постоянна и составляет не более 0,5 % для прямого управления моментом, 1,5 % для градиентного управления и 3 % для векторного управления.

Указанные исследования проводились при постоянстве заданного потокосцепления, однако в зависимости от режима работы при переменных нагрузках потокосцепление двигателя целесообразно изменять для обеспечения энергоэффективности работы электропривода. Исходя из этого, был проведен ряд экспериментов, предусматривающих изменение формы заданного потокосцепления. Их суть заключалась в стабилизации электромагнитного момента при условии, что задание потокосцепления изменяется по линейной и синусоидальной зависимости с различной интенсивностью.

Для примера на рис. 9 приведены результаты работы систем электропривода при линейно нарастающем потокосцеплении и задании электромагнитного момента на уровне номинального значения.

Как можно видеть, для векторного управления заниженное потокосцепление, особенно при низких темпах его нарастания, приводит к проявлению нелинейных эффектов, вызывающих резкое повышение электромагнитного момента. Причина наблюдаемых переходных процессов заключается в том, что для достижения электромагнитным моментом заданного уровня источник тока, входящий в состав системы управления, стремиться увеличить активный ток, однако в силу ограничений, накладываемых питающей сетью на подводимое к двигателю напряжение, заданный уровень активного тока не достигается. При этом работа инвертора напряжения в режиме ограничения негативно отражается и на точности поддержания реактивного тока, что вызывает отклонение формы переходного процесса потокосцепления от заданной. Ошибка регулирования потокосцепления вносит погрешности в канал формирования электромагнитного момента, чем дополнительно провоцирует его отклонение от задания.

В отличие от векторного управления, упрощенное градиентное управление с пропорционально-интегральным законом регулирования при заниженном потокосцеплении не вызывает работу электропривода в режиме ограничения напряжения. Однако в силу особенностей настройки пропорциональной и интегральной частей внутреннего регулятора переходные процессы по потокосцеплению обладают инерционностью, а при заниженном задании (менее 60 % от ψ_{sn}) препятствуют развитию электромагнитного момента.

Система электропривода с прямым управлением моментом в соответствии со своим принципом действия не демонстрирует ни нелинейных искажений, вызванных ограничением напряжения, ни проявлений инерционности собственно способа управления двигателем.

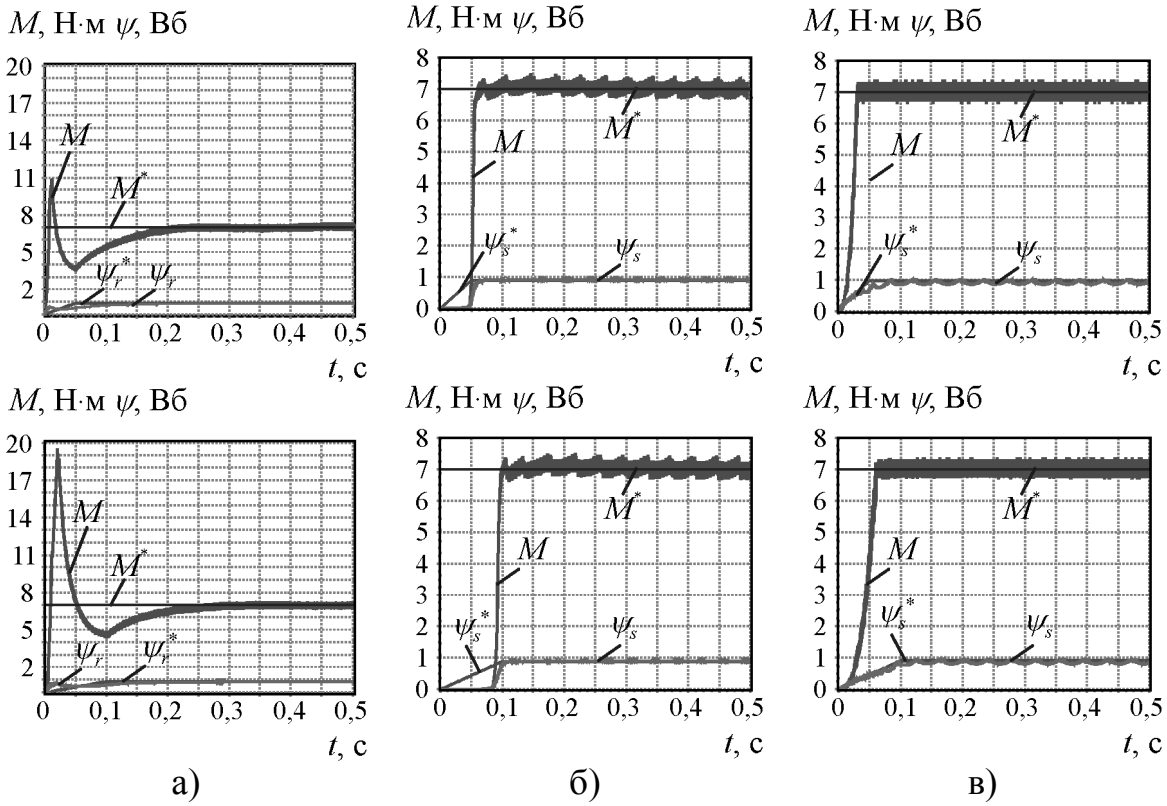

Рис. 9. Переходные процессы при линейном изменении потокосцепления: а) векторное управление; б) градиентное управление; в) прямое управление моментом

Схожие качественно результаты были продемонстрированы при формировании задания потокосцепления по синусоидальному закону относительно номинального значения. Основными критериями оценки в данных экспериментах выбраны отклонения потокосцепления от заданной траектории по амплитуде и фазе, а также максимальная ошибка регулирования электромагнитного момента, вызванная изменяющимся потокосцеплением.

При работе векторного управления с увеличением амплитуды синусоиды заданного потокосцепления отклонение по амплитуде существенно увеличивается, а отклонение по фазе, напротив, снижается, что объясняется, как и в предыдущих экспериментах, влиянием ограничений по напряжению. При этом максимальная ошибка регулирования электромагнитного момента в процентном выражении близка к соотношению амплитуды синусоиды заданного потокосцепления к номинальному значению.

Несколько иное влияние на изменяющееся задание потокосцепления наблюдается при работе градиентного управления. При прохождении верхней полуволны синусоиды практически отсутствует как ошибка регулирования потокосцепления, так и влияние на точность регулирования электромагнитного момента. Однако су-

щественным отличием обладает реакция электропривода при работе на нижней полуволне синусоиды. Как и в опыте с линейным нарастанием потокосцепления при заниженном задании наблюдается падение электромагнитного момента, а при значениях менее 60 % от ψ_{sn} – резкое снижение его значения до нуля с последующим восстановлением на верхней полуволне.

Что характерно, в электроприводе с прямым управлением моментом колебания потокосцепления на точность регулирования электромагнитного момента влияния не оказывают. При этом, однако, сказываются ограничения на величину подводимого напряжения, которые выражаются в несоответствии заданной и отрабатываемой траектории потокосцепления. Прохождение нижней полуволны синусоиды выполняется без искажения, в то время как максимальное потокосцепление при прохождении верхней полуволны синусоиды ограничивается, начиная с амплитуды заданной синусоидальной составляющей, равной 30 % от ψ_{sn}.

Проведенный анализ энергетических и динамических характеристик регулируемого асинхронного электропривода, естественно, не может претендовать на полноту, поскольку существуют десятки разновидностей систем управления асинхронным двигателем. Тем не менее, анализ охватывает представителей систем управления различных классов, что позволит в инженерной практике осуществить изначальный выбор типа системы электропривода, подходящего для конкретной задачи.

Так, для решения задач пуска, торможения и реверса с точки зрения энергоэффективности наилучшим выбором будут простейшие системы разомкнутого скалярного управления. Для регулирования угловой скорости в приводах с высокими динамическими требованиями наилучшим выбором будут системы прямого управления моментом, а при менее критичных динамических требованиях – системы класса векторного управления или градиентного управления.

В качестве дополнительного вывода из проведенных исследований можно отметить, что дополнительные электрические потери в двигателе при знаковом управлении электрическим преобразователем, вызванные высокочастотными составляющими токов, не превышают аналогичные потери в электроприводах с использованием широтно-импульсной модуляции, и в то же время способствует существенному повышению динамических показателей.

Критерии оценки

Исходя из характеристик условий эксплуатации горных машин, а также особенностей функционирования типовых системы управления асинхронным электроприводом, в рамках выбора и обоснования оптимального варианта разработки методов энергосберегающего управления электроприводами горных машин, работающих в динамических режимах, проведем анализ существующих СУ по следующим критериям:

- диапазон регулирования скорости;
- точность отработки программных значений скорости;
- работоспособность при малых скоростях;
- время переходного процесса при подаче ступенчатого задающего воздействия;

- робастность (нечувствительность) по отношению к неопределенностям параметров и внешних воздействий;
- минимизация электропотребления как в переходных, так и в установившихся режимах при различных нагрузках;
- минимальное влияние на точность наброса и сброса нагрузки, как при больших, так и при малых скоростях;
- быстрота готовности к работе после включения двигателя;
- минимальное количество датчиков;
- минимальность объема вычислений;
- способность восстанавливать свою работоспособность после сбоев в системе или прекращения подачи питания без повторного перезапуска системы после остановки ротора.

Сравнительная оценка будет производиться по 11 бальной системе, где 0 – минимальное, а 10 – максимальное соответствие текущему критерию.

Критериальная оценка энергооприманьных систем электропривода

Существующие энергооптмальные СУ можно разделить по структуре на скалярные и векторные.

Скалярные СУ энергооптимального электропривода построены на определении рациональных соотношений между частотой и амплитудой подводимого напряжения. Данное соотношение определяет энергетические показатели работы ЭП, поскольку от него, а также от параметров двигателя, зависит его магнитное состояние [52, 53]. Скалярные СУ [54-57] асинхронным ЭП построены на принципе однозначной линейной зависимости между угловой скоростью идеального холостого двигателя и частотой подводимого напряжения. Таким образом, для конкретной рабочей точки, характеризующейся установившимся значением угловой скорости и электромагнитного момента двигателя, может быть найдено оптимальное соотношение *u/f*, при котором на формирование электромагнитных переменных двигателя будет расходоваться минимум общих потерь. Энергооптимальные скалярные СУ можно разделить на СУ с аналитическими регуляторами и интеллектуальными регуляторами.

От выбранного типа регуляторов и соотношения *u/f* во многом зависят как статические, так и динамические показатели качества работы электропривода, однако, большинство скалярных СУ в сравнении уступают векторным.

Таким образом, оценка скалярных энергооптимальных СУ выражается следующими значениями критериев:

- диапазон регулирования скорости: 2-8 (зависит от закона регулирования);
- точность отработки программных значений скорости: 5-10 (зависит от точности настроек регуляторов и принятых допущениях);
- работоспособность при малых скоростях: 0-10 (зависит от точности настроек регуляторов и принятых допущениях);
- время переходного процесса при подаче ступенчатого задающего воздействия: 5;
- робастность по отношению к неопределенностям параметров и внешних воздействий: 0;

- минимизация электропотребления как в переходных, так и в установившихся режимах при различных нагрузках: 5;
- минимальное влияние на точность наброса и сброса нагрузки, как при больших, так и при малых скоростях: 4;
- быстрота готовности к работе после включения двигателя: 8;
- минимальное количество датчиков: 8;
- минимальность объема вычислений: 0-10 (зависит от принятых допущений);
- способность восстанавливать свою работоспособность после сбоев в системе или прекращения подачи питания без повторного перезапуска системы после остановки ротора: 9.

Векторные СУ характеризуются тем, что управляют взаимным пространственным положением векторов переменных состояния АД с целью регулирования электромагнитных переменных двигателя (потокосцеплений), его электромагнитного момента, а также угловой скорости или других механических координат электропривода.

Среди векторных СУ также можно выделить СУ с аналитическими и интеллектуальными регуляторами, а также отдельный класс СУ – поисковые, которые добиваются энергооптимального управления путем изменения какого-либо параметра для минимизации одного из критериев энергооптимальности.

Так как все рассмотренные векторные СУ имеют в своей основе сложное математическое описание принципов работы АД с возможностью вариации его параметров, то отнести большинство из них к простым СУ не представляется возможным.

Наиболее известной разновидностью векторных СУ является полеориентированное управление (field oriented control), часто именуемое в литературе векторным управлением. Такие СУ строятся на основании математического описания АД в пространстве состояний с использованием линейных преобразований к системе координат, направленной вдоль одного из векторов состояния. При помощи перехода к новой системе координат организовать управление АД можно по аналогии с двигателями постоянного тока, разделяя управляющие воздействия для электромагнитных переменных и электромагнитного момента. Это позволяет применять для регулируемого асинхронного электропривода опыт построения систем управления, накопленный для электроприводов постоянного тока, в том числе проводить оптимизацию работы по различным критериям.

Таким образом, оценка полеориенторованных энергооптимальных СУ выражается следующими значениями критериев:

- диапазон регулирования скорости: 7-9;
- точность отработки программных значений скорости: 9;
- работоспособность при малых скоростях: 8;
- время переходного процесса при подаче ступенчатого задающего воздействия: 10;
- робастность (нечувствительность) по отношению к неопределенностям параметров и внешних воздействий: 8;
- минимизация электропотребления как в переходных, так и в установившихся режимах при различных нагрузках: 8;

- минимальное влияние на точность наброса и сброса нагрузки, как при больших, так и при малых скоростях: 8;
- быстрота готовности к работе после включения двигателя: 8;
- минимальное количество датчиков: 5;
- минимальность объема вычислений: 4;
- способность восстанавливать свою работоспособность после сбоев в системе или прекращения подачи питания без повторного перезапуска системы после остановки ротора: 8.

Другой разновидностью векторных СУ является прямое управление моментом (direct torque control), различные варианты которого представлены в [65-73]. Данные СУ обладают наибольшим быстродействием среди всех способов управления АД, поскольку их принцип работы построен на разрывном управлении ключами инвертора напряжения ПЧ. Однако в силу этой же особенности для АД характерны высокие пульсации электромагнитного момента, что влияет на статическую точность и диапазон регулирования.

Таким образом, оценка энергооптимальных СУ с прямым управлением моментом выражается следующими значениями критериев:

- диапазон регулирования скорости: 5-9;
- точность отработки программных значений скорости: 3-9;
- работоспособность при малых скоростях: 3-9;
- время переходного процесса при подаче ступенчатого задающего воздействия: 4-8;
- робастность (нечувствительность) по отношению к неопределенностям параметров и внешних воздействий: 6;
- минимизация электропотребления как в переходных, так и в установившихся режимах при различных нагрузках: 8;
- минимальное влияние на точность наброса и сброса нагрузки, как при больших, так и при малых скоростях: 5;
- быстрота готовности к работе после включения двигателя: 7;
- минимальное количество датчиков: 4;
- минимальность объема вычислений: 7;
- способность восстанавливать свою работоспособность после сбоев в системе или прекращения подачи питания без повторного перезапуска системы после остановки ротора: 5.

Помимо перечисленных разновидностей векторных СУ, существуют разработки, в которых управление АД организуется на основе алгоритмов синтезированных с использованием методов нелинейной теории автоматического управления. Так, достаточно высокие результаты демонстрирует градиентное управление [74-80], синтезированное на базе метода скоростного градиента, разработанного А.Л. Фрадковым, и управление с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина [154 81-86]. Обе приведенные разновидности векторных СУ проанализированы на предмет работы в условиях резкопеременных нагрузок.

Таким образом, оценка нелинейных энергооптимальных СУ, таких как градиентное управление, выражается следующими значениями критериев:

- диапазон регулирования скорости: 9;
- точность отработки программных значений скорости: 10;
- работоспособность при малых скоростях: 9;
- время переходного процесса при подаче ступенчатого задающего воздействия: 9;
- робастность (нечувствительность) по отношению к неопределенностям параметров и внешних воздействий: 8;
- минимизация электропотребления как в переходных, так и в установившихся режимах при различных нагрузках: 9;
- минимальное влияние на точность наброса и сброса нагрузки, как при больших, так и при малых скоростях: 8;
- быстрота готовности к работе после включения двигателя: 9;
- минимальное количество датчиков: 7;
- минимальность объема вычислений: 5;
- способность восстанавливать свою работоспособность после сбоев в системе или прекращения подачи питания без повторного перезапуска системы после остановки ротора: 6.

Выводы

Проведенный анализ энергетических и динамических характеристик регулируемого асинхронного электропривода показал, что для решения задач пуска, торможения и реверса с точки зрения энергоэффективности наилучшим выбором будут простейшие системы разомкнутого скалярного управления.

Для регулирования угловой скорости в приводах с высокими динамическими требованиями наилучшим выбором будут системы прямого управления моментом, а при несколько менее критичных динамических требованиях – системы класса векторного управления или градиентного управления.

Среди алгоритмов оптимизации по энергетическим критериям наилучшими вариантами являются аналитические беспоисковые регуляторы, построенные на базе уточненного математического описания АД.

2. Разработка программы вычислительных и натурных экспериментов

Для разработки программы проведения теоретических и экспериментальных исследований, дающих достаточные теоретические и достоверные экспериментальные результаты для решения задачи создания средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы необходимо воспользоваться методами планирования эксперимента.

Экспериментальные исследования ведутся во всех областях науки и техники, и все они имеют, так или иначе, одну цель – установление новых факторов об исследуемом явлении. Для наиболее эффективного проведения экспериментов были разработаны специальные методы статистического планирования эксперимента [87, 88] – это правильная организация процесса экспериментального исследования, позволяющая собрать необходимые данные, применить для их анализа статистические

методы и сделать верные выводы. В случае если данные эксперимента содержат ошибки – статистические методы представляют собой единственный объективный метод их анализа.

Перед началом планирования эксперимента необходимо установить цель оптимизации планирования, факторы, независимые и взаимодействующие, ограничения, вызванные физическими свойствами, либо технико-экономическими показателями, а также параметры математической модели.

Факторы, которые будут исследоваться в экспериментах

Планирование эксперимента это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

В ходе вычислительных и натурных экспериментов в рамках данной научно-исследовательской работы должны быть достигнуты следующие цели:

1. Энергетические характеристики асинхронного электропривода определяются уровнем его потерь при электромеханическом преобразовании энергии, а также потерь в полупроводниковом управляющем устройстве, каждый из которых зависит от режима его работы. При этом на энергопотребление оказывает влияние не только величина преодолеваемой нагрузки и необходимость разгонов и торможений, но и текущее состояние, как двигателя, так и преобразователя. В частности, нелинейный характер напряжения, питающего двигатель, а также ограничения, накладываемые электрической сетью на его величину, увеличивает как электрические, так и магнитные потери, вследствие чего растет потребляемый ток двигателя и снижается его КПД. С точки зрения потерь в двигателе, недостаточно сформулированным является их описание с учетом насыщения магнитопровода, наличия вихревых токов, а также возможности работы в неполнофазном режиме. В общие потери электропривода добавляются также потери в электрическом преобразователе, сетевых фильтрах и питающих двигатель кабелях, которые зависят, в том числе, от требуемой угловой скорости.

Таким образом, требуется создать математическое описание отдельных аспектов, влияющих на потери энергии в процессе функционирования электропривода в динамических режимах и агрегировать эти описания в единую модель.

2. Применение регулируемых асинхронных электроприводов с преобразователями частоты во взрывозащищенном рудничном исполнении сопряжено со сложными техническими задачами, среди которых существенную препятствующую роль играет защита от токов утечки на землю. Суть проблемы заключается в высокой вероятности ложных срабатываний реле утечки, применяемых в качестве аппаратов защиты от утечек на землю в шахтных электрических сетях, причиной которых являются переходные процессы, вызываемые коммутацией полупроводниковых ключей в преобразователе частоты, особенно при большой емкости силовых жил питающих кабелей относительно земли. Емкостные токи утечки, вызванные зарядом-разрядом емкостей кабельной линии, являются значительными, и частота их следования соответствует частоте коммутаций, поэтому реле утечки может сработать даже при исправной изоляции кабелей.

Таким образом, для селекции высокочастотных емкостных токов для обеспечения бесперебойной работы энергоэффективных шахтных электроприводов необходимо создать математическое описание протекания токов утечек в шахтных сетях, содержащих силовые полупроводниковые элементы.

3. На основе анализа современного состояния электроприводов ГМ формируются следующие основные требования к их электроприводу:

– быстродействие и точность регулирования скорости движения исполнительного органа должны быть достаточными для достижения требуемой производительности ГМ;

– должны подавляться динамические нагрузки в элементах электропривода, вызванных изменением сил сопротивления и процессами разгона и торможения исполнительного органа;

– должно минимизироваться влияние оператора на формирование динамических нагрузок в элементах электропривода.

Из первого требования вытекает, что одной из регулируемых координат должна являться скорость движения исполнительного органа, так как ее значение и интенсивность ее изменения будут определять производительность ГМ.

Второе и третье требования определяют, что система управления должна формировать динамическое состояние элементов трансмиссии, которое определяется изменением в них упругих сил и упругих моментов. Таким образом, помимо регулирования скорости система управления должна регулировать упругие силы и упругие моменты в элементах трансмиссии. Поскольку воздействовать на указанные механические переменные возможно только электромагнитным моментом, формируемым электродвигателем, система управления должна также обеспечивать регулирование электромагнитного момента с быстродействием достаточным для функционирования в условиях резкопеременных нагрузок.

Учитывая, что каждый из факторов, определяющих электрические потери в электроприводе, зависит от режима его работы, при помощи моделирования необходимо выявить взаимосвязь между характеристиками динамичности изменения переменных величин электропривода, определяющих электромагнитный момент, и уровнем его электропотребления.

4. Учитывая, что даже при высокой адекватности математического описания возможны отклонения между результатами вычислительных и натурных экспериментов, необходимо провести эксперименты на модели электропривода ГМ с программно задаваемой изменяющейся нагрузкой. В результате экспериментов требуется установить погрешность показателей энергоэффективности, полученных на компьютерной модели.

5. В рамках создания энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы будут разрабатываться алгоритмы нелинейного энергосберегающего управления с аналитическими беспоисковыми регуляторами.

Учитывая, что внедрение на реально существующей ГМ новой разработки без подтверждения ее эффективности невозможно, требуется провести вычислительные

эксперименты, позволяющие выполнить объективное сравнение энергопотребления электроприводом ГМ с существующими и разработанными средствами управления.

Исходя из указанных целей, определяется перечень факторов проведения экспериментов.

1. Математическое описание отдельных аспектов, влияющих на потери энергии:

– амплитуда и частота напряжения сети;

– частота модуляции ключей преобразователя частоты;

– мгновенные значения напряжения, подводимого к каждой фазе двигателя;

– нагрузка на валу двигателя.

2. Математическое описание протекания токов утечек в шахтных сетях, содержащих силовые полупроводниковые элементы:

– длина поводящей кабельной линии;

– емкость кабеля относительно земли;

– частота модуляции ключей преобразователя;

– ток нагрузки на выходе преобразователя частоты.

3. Взаимосвязь между характеристиками динамичности изменения переменных величин электропривода, определяющих электромагнитный момент, и уровнем его электропотребления, выявленная моделированием:

– величина и интенсивность изменения требуемой скорости движения исполнительного органа;

– величина и интенсивность изменения нагрузка на исполнительном органе;

– величина и интенсивность изменения задания электромагнитного момента;

– величина и интенсивность изменения задания потокосцепления.

4. Погрешность показателей энергоэффективности, полученных на компьютерной модели:

– величина и интенсивность изменения требуемой скорости движения исполнительного органа экспериментальной установки;

– величина и интенсивность изменения нагрузка на исполнительном органе экспериментальной установки;

– величина и интенсивность изменения задания электромагнитного момента двигателя экспериментальной установки;

– величина и интенсивность изменения задания потокосцепления двигателя экспериментальной установки.

5. Сравнение энергопотребления электроприводом ГМ с существующими и разработанными средствами управления:

– тахограмма движения исполнительного органа;

– диаграмма изменения нагрузки на исполнительном органе.

Параметры оптимизации экспериментов

Целью оптимизации проведения экспериментов является поиск условий его проведения, обеспечивающих минимальное количество опытов. Для достижения этой цели по каждому планируемому эксперименту должны быть заданы парамет-

ры, то есть признаки, по которым должен оптимизировать процесс. Параметры оптимизации экспериментов должны быть количественными и задаваться числом.

Исходя из целей проведения экспериментов и приведенного перечня факторов, определяются параметры оптимизации.

1. Математическое описание отдельных аспектов, влияющих на потери энергии:

– угловая скорость вала двигателя;
– электромагнитный момент;
– токи в каждой из фаз двигателя;
– потокосцепления двигателя;
– электрические и магнитные потери двигателя;
– механические потери двигателя;
– потери преобразователя частоты.

2. Математическое описание протекания токов утечек в шахтных сетях, содержащих силовые полупроводниковые элементы:

– спектральный состав тока утечки;
– действующее значение основной гармонической составляющей тока утечки.

3. Взаимосвязь между характеристиками динамичности изменения переменных величин электропривода, определяющих электромагнитный момент, и уровнем его электропотребления, выявленная моделированием:

– удельное изменение электрических и магнитных потерь двигателя;
– удельное изменение механических потерь двигателя;
– удельное изменение потерь преобразователя частоты.

4. Погрешность показателей энергоэффективности, полученных на компьютерной модели:

– погрешность моделирования угловой скорости вала двигателя;
– погрешность моделирования электромагнитного момента;
– погрешность моделирования токов в каждой из фаз двигателя;
– погрешность моделирования потокосцеплений двигателя;
– погрешность моделирования суммарных потерь двигателя;
– погрешность моделирования суммарных потерь электропривода.

5. Сравнение энергопотребления электроприводом ГМ с существующими и разработанными средствами управления:

– обеспечиваемая разница суммарных потерь двигателя;
– обеспечиваемая разница суммарных потерь электропривода.

Параметры оптимизации связаны с факторами проведения экспериментов функциями отклика, составляемыми в ходе экспериментов по табл. 3.

Таблица 3

Регламент поведения экспериментов

№ опыта	Фактор 1	Фактор 2	…	Фактор N	Отклик 1	Отклик 2	…	Отклик N

Анализируя полученные в ходе экспериментов функции отклика методами математической статистики, строится обобщенный отклик, по которому корректируется ход проведения экспериментов или принимается решение об их достаточности.

Временной регламент поведения экспериментов:

1. Математическое описание отдельных аспектов, влияющих на потери энергии – до 29.02.12.

2. Математическое описание протекания токов утечек в шахтных сетях, содержащих силовые полупроводниковые элементы – до 31.03.12.

3. Взаимосвязь между характеристиками динамичности изменения переменных величин электропривода, определяющих электромагнитный момент, и уровнем его электропотребления, выявленная моделированием – до 30.04.12.

4. Погрешность показателей энергоэффективности, полученных на компьютерной модели – до 30.08.12.

5. Сравнение энергопотребления электроприводом ГМ с существующими и разработанными средствами управления – до 31.05.13.

Таким образом, при помощи методов планирования экспериментов определены факторы и параметры оптимизации, позволяющие получить достоверные результаты экспериментов с минимальным количеством проведенных опытов в рамках заданного временного регламента.

Заключение

Научно-технический отчет представляет собой результат обоснования и выбора оптимального варианта разработки методов энергосберегающего управления электроприводами горных машин, работающих в динамических режимах и разработки программы вычислительных и натурных экспериментов.

По результатам обоснования и выбора оптимального варианта разработки методов энергосберегающего управления можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Подтверждается, что частотные способы управления позволяют сократить электрические потери даже на двигателях малой мощности, а при возрастании мощности наблюдается значительное повышение энергоэффективности.
2. Для электроприводов ГМ, управление которыми сводится к формированию процессов пуска и торможения, для повышения энергоэффективности достаточно применить преобразователи частоты с разомкнутым скалярным управлением.
3. Поскольку электропривод ГМ должен формировать динамическое состояние элементов трансмиссии, которое определяется изменением в них упругих сил и упругих моментов, и обеспечивать регулирование скорости движения исполнительного органа, его система управления должна обеспечивать регулирование электромагнитного момента с быстродействием достаточным для функционирования в условиях резкопеременных нагрузок.
4. При решении задач энергоэффективного динамичного регулирования электропривода могут использоваться системы прямого управления моментом, векторного управления или градиентного управления, с дополнением их аналитическими беспоисковыми регуляторами для оптимизации по энергетическим критериям.

В ходе планирования вычислительных и натурных экспериментов получены следующие основные результаты:

1. Конкретизированы цели выполнения экспериментов.
2. Определены влияющие факторы, которые будут исследоваться в ходе экспериментов.
3. Определен перечень откликов по каждому эксперименту, позволяющих минимизировать число проделываемых откликов.
4. Детализирован временной регламент поведения экспериментов.

Список использованных источников

1. Исследование режимов работы электропривода горных машин и механизмов: Отчет о НИР / п/я Р-6614, п/я А-7809. – Тема ГР 71035053, № Б 461876. – Донецк, 1975. – 145 с.

2. Исследование режимов работы электроприводов про-ходческих комплексов угольной промышленности: Отчет о НИР / п/я Р-6614, п/я А-7809. – Тема ГР 76056098, № Б 806750. – Донецк, 1979. – 119 с.

3. Проанализировать условия работы электроприво-дов добычных и проходческих комплексов: Отчет о НИР / КузНИУИ. – Тема ГР 77031668, № Б 629804. – Прокопьевск, 1977.

4. Исследовать режимы работы добычных комплексов на шахтах Кузбасса: Отчет о НИР / КузНИУИ. – Тема ГР 77031668, № Б 718072. – Прокопьевск, 1978. – 203 с.

5. Исследовать режим работы электроприводов добычных и проходческих комплексов на шахтах Кузнецкого бассейна: Отчет о НИР / КузНИУИ.- Тема ГР 77031668, № Б 873074. – Прокопьевск, 1980. – 60 с.

6. Исследование режимов работы электроприводов добычных и проходческих комплексов угольной промышленности (на шахтах Карагандинского угольного бассейна): Отчет о НИР / Караганд. политехн. ин-т. – Тема ГР 79062042, № В 818692. – Караганда, 1979. – 83 с.

7. Статистические характеристики нагрузок приводов горных машин: Отчет о НИР / Моск. горн. ин-т. – Тема ГР 73069401, № Б 468107. – Москва, 1975. – 41 с.

8. Исследование путей совершенствования взрывозащищенных асинхронных электродвигателей в реальных условиях эксплуатации с целью повышения их надежности: Отчет о НИР / Кузбас. политехн. ин-т.- Тема ГР 7903783, № 209-79.- Кемерово, 1984.-136 с.

9. Исследование влияния уровня нагрузок на техническое состояние экскаваторов в целях повышения их работоспособности: Отчет о НИР / Кузбас. политехн. ин-т. – Тема ГР 80074647, № 220-80. – Кемерово, 1981. – 114 с.

10. Динамика проходческих комбайнов/ В.А. Бреннер, А.А. Карлюс, П.П. Палев и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.

11. Волков Д.П. Динамика и прочность одноковшовых экскаваторов. – М.: Машиностроение, 1965. – 463 с.

12. Гаврилов П.Д. Исследование режимов работы выемочных комбайнов на шахтах Кузбасса: Автореф. дис… канд. техн. наук: 05.05.06 / Кузбас. политехн. ин-т. – Кемерово, 1969. – 30 с.

13. Гаврилов П.Д. Автоматизированный электропривод горных и транспортных машин / Кузбас. политехн. ин-т.- Кемерово, 1976. – 68 с.

14. Докукин А.В. Статистическая динамика горных машин / А.В. Докукин, Ю.Д. Красников, З.Я. Хургин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

15. Евсеев В.С. Применение проходческих комбайнов на шахтах / В.С. Евсеев, Г.Н. Архипов, Е.С. Розанцев. – М.: Недра, 1981. – 18 с.

16. Ещин Е.К. Теория предельных режимов работы горных машин. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1995. – 232 с.

17. Петушков И.С. Рабочие режимы и нагрузки электроприводов машин добычных комплексов / И.С. Петушков, Л.В. Гудимов, Р.З. Салтыков // Уголь. – 1980. – №6. – С. 38-43.

18. Петушков И.С. Режимы работы и нагрузки электродвигателей забойных машин на шахтах Кузбасса / И.С. Петушков, Л.В. Гудимов, Р.З. Салтыков // Взрывозащищенное и рудничное электрооборудование: Сб. науч. тр. / НИИ ПО «Кузбассэлектромотор». – Кемерово, 1985. – Вып. 11. – С. 81-91.

19. Стариков Б.Я. Асинхронный электропривод очистных комбайнов / Б.Я. Стариков, В.Л. Азарх, З.М. Рабинович. – М.: Недра, 1981. – 288 с.

20. Сурина Н.В. Исследование нагруженности и долговечности трансмиссий очистных комбайнов // Науч. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – 1985. – №237. – С. 81-87.

21. Топорков А.А. Динамика работы очистных комбайнов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1993. – №3. – С. 103-108.

22. Чугреев Л.И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом. – М.: Недра, 1976. – 160 с.

23. Ильинский Н. Ф. Энергосбережение в электроприводе /Н. Ф. Ильинский, Ю. В. Рожанковский, А. О. Горнов. – Энергосберегающая технология электроснабже-ния народного хозяйства: практ. пособие в 5 кн. – Кн. 2. – М.: Высш. шк. 1989. – 127 с.

24. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

25. Ключев, В. И. Теория электропривода: учеб. для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

26. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами / Л. П. Петров, В. А. Ладензон, М. П. Обуховский, Р. Г. Подзолов. – М.: Энергия, 1970. – 128 с.

27. Шубенко В.А. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением / В. А. Шубенко, И. Я. Браславский, Р. Т. Шрейнер. – М.: Энергия, 1967. – 96 с.

28. Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе / А. А. Поскробко, В. Б. Братолюбов. – М.: Энергия, 1978. – 192 с.

29. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учеб. для студ. вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.

30. Усынин, Ю. С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

31. Костенко М.П. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов // Электричество. – 1925. – №2. – С. 85-95.

32. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для вузов. – М.: Академия, 2006. – 272 с.

33. Козярук А. Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков. – СПб.: Санкт-Петербургская Электротехническая компания, 2004. – 127 с.

34. Козярук А. Е. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства: учеб. пособие для студ. вузов / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков. – СПб.: С.-Петерб. гос. ин-т им. Г. В. Плеханова, 2008. – 99 с.

35. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, 1999. – 66 с.

36. Усольцев А. А. Векторное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие. – СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2002. – 43 с.

37. Blaschke F. The principle of field orientation as applied to the new trans-vector closed-loop control system for rotating-field machines // Siemens Rev. – May 1972. – Vol. 39. – № 3. – P. 217-220.

38. Scibcl B. J. Field Oriented Control of an Induction Machine with DC Link and Load Disturbance Rejection / B. J. Scibcl, T. M. Rowan, R. J. Kerkman. – Rockwell Automation, Allen-Bradley Standard Drives Business. – 7 p.

39. Burrows Linda M. Field oriented control of induction motor / Linda M. Burrows, Don S. Zinger, Mary Ellen Roth. – NASA Technical Memorandum 103154. – Reno, Nevada, 1990. – 8 p.

40. Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motor. – Texas Instruments Europe. – February 1998. – 14 p.

41. Bellini A. Adaptive control with parameter estimation for induction motor drives / A. Bellini, G. Figalli. // Control eng. Practice, 1995. – vol. 3. – no. 2. – P. 181-188.

42. Каширских В. Г. Динамическая идентификация параметров ротора асинхронного электродвигателя с помощью искусственной нейронной сети / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ. – 2004. – №4. – С. 50-51.

43. Каширских В. Г. Определение параметров и пере-менных состояния асинхронных электродвигателей в процессе их работы на основе поискового алгоритма оценивания / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Вестн. КузГТУ. – 2006. – № 5. – С. 76-79.

44. Barambones O. A Sensorless Robust Vector Control of Induction Motor / O. Barambones, A.J. Garrido, F.J. Maseda. – Universidad Del Paíís Vasco. In Press. – 6 p.

45. Фрадков, А. Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.

46. Мирошник И.В. Нелинейное адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков – Спб.: Наука, 2000. – 549 с.

47. Завьялов В. М. Градиентное управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 71-72.

48. Семыкина И. Ю. Снижение динамических нагрузок в электроприводах карьерных экскаваторов: Диссертация на соискание учен. степени канд. техн. наук. – Кемерово, 2007.

49. Завьялов В.М. Снижение динамических нагрузок в трансмиссиях горных машин. – Кемерово: КузГТУ, 2008. – 172 с.

50. Завьялов В.М. Управление динамическим состоянием асинхронных электроприводов горных машин: Диссертация на соискание учен. степени доктора техн. наук. – Кемерово, 2009.

51. Малафеев С. И. Исследование потерь в асинхронном двигателе с частотным регулированием при переходных процессах / С. И. Малафеев, А. В. Захаров // Электр-техника. – 2008. – № 7. – С. 2-5.

52. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер Ю.А. , Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.

53. Kusko A. Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives / A. Kusko, D. Galler // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1983. – Vol. 1A-19. – № 4. – P. 561-570.

54. Кривенков М.В. Нечеткий регулятор скорости в частотно-управляемом асинхронном электроприводе / М.В. Кривенков, А.Н. Пахомов, В.И. Иванчура // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2007. – № 3. – С. 100-103.

55. Субботин С. А. Особенности технической реализации скалярного градиентного управления / С. А. Субботин, В.М. Завьялов, И.Ю. Семыкина // Современные техника и технологии: сборник трудов XV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых, 4-8 мая 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 482-484.

56. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1998. – 172 с.

57. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.

58. Денисов В.Н. Преобразование координат и анализ параметрических свойств электрических машин / В.Н. Денисов, СП. Курилин // Электричество. – 2007. – №6. – С. 45-49.

59. Нос О.В. Уравнения баланса мощности в математических моделях асинхронного двигателя в различных линейных пространствах // Электричество. – 2007. – №8. – С. 43-47.

60. Нос О.В. Математическая модель асинхронного двигателя в линейных ространствах, связанных со статором и ротором // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – №2. – С. 14-20.

61. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, 1999. – 66 с.

62. Христов В.И. Математическая модель асинхронных машин в фазных осях статора // Электротехника. – 2004. – № 7. – С. 24-31.

63. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург, Уральское отделение РАН, 2000. – 654 с.

64. Хэнкок Н. Матричный анализ электрических машин. – М.: Энергия, 1967. – 225 с.

65. Takahashi I. A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor / I. Takahashi, T. Noguchi // IEEE Trans. Ind. Applicat. – Sept., Oct. 1986. – Vol. 22. – P. 820-827.

66. Браславский И.Я. Синтез нейронного наблюдателя для асинхронного привода с прямым управлением моментом / И.Я. Браславский, А.М. Зюзев, З.Ш. Ишматов, М.А. Аверьянов, Е.И. Барац, А.В. Костылев // Электротехника. – 2001. – № 12. – С. 31-34.

67. Buja G.S. Direct Torque Control of PWM Inverter-Fed AC Motors – A Survey / G.S. Buja, M.P. Kazmierkowski // IEEE Trans. Ind. Electron. – Aug., 2004. – Vol. 51. – № 4. – P. 744-757.

68. Habetler T.G. Direct torque control of induction machines using space vector modulation / T.G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli, L.M. Tolbert // IEEE Trans. Ind. Applicat. – Sept., Oct., 1992. – Vol. 28. – P. 1045-1053.

69. Casadei D. Implementation of a direct torque control algorithm for induction motors based on discrete space vector modulation / D. Casadei, G. Serra, A. Tani // IEEE Trans. Power Electron. – July, 2000. – Vol. 15. – P. 769-777.

70. Idris N. Direct Torque Control of Induction Machines With Constant Switching Frequency and Reduced Torque Ripple / N. Idris, A. Yatim // IEEE Trans. Ind. Electron. – Aug., 2004. – Vol. 51. – № 4. – P. 758-767.

71. Lascu C. A modified direct torque control for induction motor sensorless drive / C. Lascu, I. Boldea, F. Blaabjerg // IEEE Trans. Ind. Applicat. – Jan., Feb., 2000. – Vol. 36. – P. 122-130.

72. Lascu C. A Sensorless Hybrid DTC Drive for High-Volume Low-Cost Applications / C. Lascu, A.M. Trzynadlowski // IEEE Trans. Ind. Electron. – Oct., 2004. – Vol. 51. – № 5. – P. 1048-1055.

73. Naassani A.A. Synthesis of Direct Torque and Rotor Flux Control Algorithms by Means of Sliding-Mode Theory / A.A. Naassani, E. Monmasson, J.-P. Louis // IEEE Trans. Ind. Electron. – June, 2005. – Vol. 52. – № 3. – P. 785-799.

74. Завьялов В.М. Многокритериальное управление асинхронным электроприводом / В.М. Завьялов, А.А. Неверов, И.Ю. Семыкина // Вестн. КузГТУ. – 2005. – №1 – С.81-84.

75. Завьялов В.М. Энергооптимальное управление скоростью асинхронного электропривода / В.М. Завьялов, И.Ю. Семыкина // Вестн. КузГТУ. – 2005. – №4-2 – С.21-23.

76. Стародуб А.В. Реализация системы регулирования угловой скорости асинхронного электродвигателя на основе метода скоростного градиента / А.В. Стародуб, И.Ю. Семыкина // Вестн.КузГТУ. – 2005. – №6. – С. 69-72.

77. Завьялов В.М. Использование метода скоростного градиента в задаче синтеза систем управления асинхронными электроприводами / В.М. Завьялов, И.Ю. Семыкина // Электротехнические преобразователи энергии: материалы международной научно- технической конференции, 20-22 октября 2005. – Томск: ТПУ, 2005. – С. 233-236.

78. Завьялов В.М. Безынерционный источник момента на базе асинхронного электропривода / В.М. Завьялов, И.Ю. Семыкина // Автоматизированный электро-

привод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: труды третьей всероссийской научно-практической конференции, 16-18 мая 2006. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006 г. – С. 121-124.

79. Семыкина И.Ю. Градиентное управление многодвигательным асинхронным электроприводом / И.Ю. Семыкина, В.М. Завьялов, М.А. Глазко // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 65-69.

80. Семыкина И.Ю. Энергооптимальное градиентное управление электроприводом // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в образовании, науке и производстве: труды IV Всероссийской научно – практической конференции, 12-15 октября 2010. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – С. 148-151.

81. Ещин Е.К. Общая задача управления асинхронным электродвигателем / Е.К. Ещин, А.В. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – №1. – С.39-43.

82. А.В. Григорьев. Управление моментом и потоком электрической машины переменного тока // Вестн. КузГТУ. – 2008. – №2. – С.64-67.

83. А.В. Григорьев. Оптимальное управление координатами асинхронного электродвигателя // Вестн. КузГТУ. – 2008. – №6. – С.29-32.

84. Ещин Е.К. Оптимизация управления состоянием асинхронного электродвигателя / Е.К. Ещин, А.В. Григорьев // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании ’2008: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, 15-25 декабря 2008. – Одесса: Черноморье, 2008. – Т. 6. – С.48-50.

85. Григорьев А.В. Решение задачи оптимального управления машиной двойного питания // Современные направления теоретических и прикладных исследований ’2009: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, 16-27 марта 2009. – Одесса: Черноморье, 2009. – Т. 5. – С.21-22.

86. Григорьев А.В. Максимальный момент асинхронного электродвигателя // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов II-ой всероссийской научно-технической конференции, 19-20 марта 2009. – Уфа: УГНТУ, 2009. – Т. 1. – С.207-210.

87. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.

88. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

Приложение

Описание программного продукта для сравнения типовых систем управления асинхронным электроприводом

Программный продукт для сравнения типовых систем управления асинхронным электроприводом создан в среде разработки Delphi. Интерфейс взаимодействия с пользователем представлен на рис. П.1 и рис. П.2.

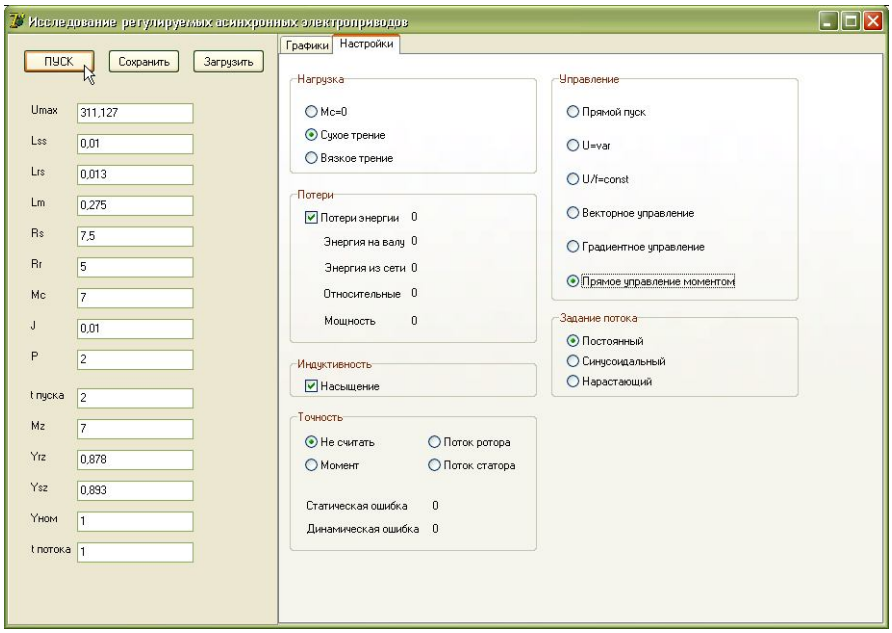

Рис. П.1. Окно указания настроек

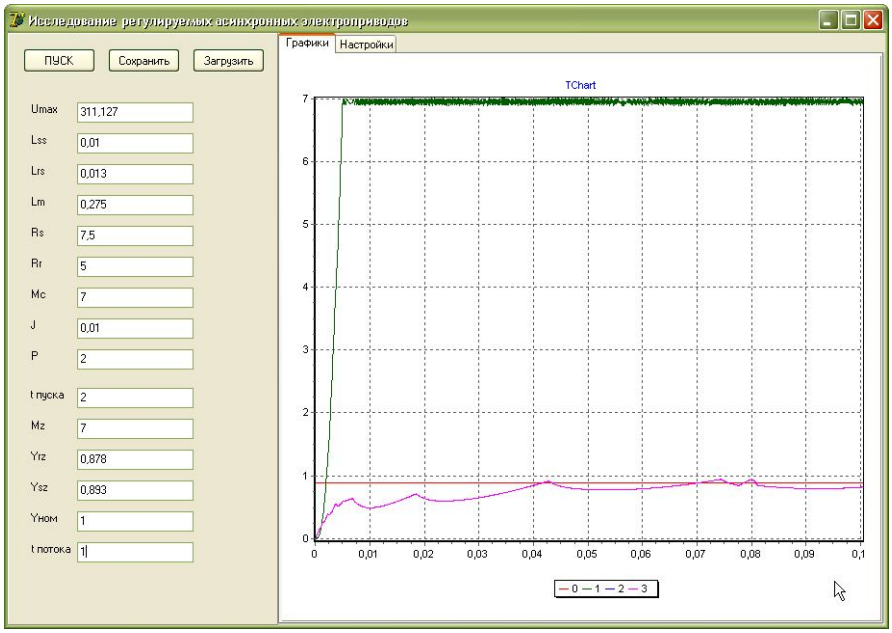

Рис. П.2. Окно визуализации информации

Разработанный программный продукт позволяет исследовать АД в различных режимах, анализировать различные законы регулирования, визуально отображать информацию об объекте исследования и сохранять её в виде графиков в файлы формата *.emf. Дополнительно он имеет возможность загружать служебные файлы *.ini, содержащие информацию о параметрах двигателя. Ниже приведен листинг программного кода.

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart,IniFiles,
  XPMan, Math, ComCtrls, BubbleCh;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Panel1: TPanel;
    SaveDialog1: TSaveDialog;
    OpenDialog1: TOpenDialog;
    Button1: TButton;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    Edit6: TEdit;
    Edit7: TEdit;
    Edit8: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Edit9: TEdit;
    XPManifest1: TXPManifest;
```

```
PageControl1: TPageControl;
TabSheet1: TTabSheet;
Chart1: TChart;
Label11: TLabel;
Edit10: TEdit;
Label9: TLabel;
Edit11: TEdit;
Label12: TLabel;
Edit12: TEdit;
Label13: TLabel;
Edit13: TEdit;
Label14: TLabel;
Edit14: TEdit;
Button2: TButton;
Button3: TButton;
TabSheet2: TTabSheet;
GroupBox1: TGroupBox;
RadioButton1: TRadioButton;
RadioButton2: TRadioButton;
RadioButton3: TRadioButton;
GroupBox3: TGroupBox;
RadioButton4: TRadioButton;
RadioButton5: TRadioButton;
RadioButton6: TRadioButton;
RadioButton8: TRadioButton;
RadioButton7: TRadioButton;
GroupBox2: TGroupBox;
Label15: TLabel;
GroupBox4: TGroupBox;
Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
RadioButton10: TRadioButton;
RadioButton11: TRadioButton;
RadioButton12: TRadioButton;
GroupBox5: TGroupBox;
GroupBox6: TGroupBox;
RadioButton14: TRadioButton;
RadioButton15: TRadioButton;
Label22: TLabel;
```

```
    Edit15: TEdit;
    CheckBox1: TCheckBox;
    CheckBox2: TCheckBox;
    RadioButton9: TRadioButton;
    Series4: TFastLineSeries;
    Label23: TLabel;
    Label24: TLabel;
    RadioButton13: TRadioButton;
    Label25: TLabel;
    Label26: TLabel;
    Label27: TLabel;
    Label28: TLabel;
    Label29: TLabel;
    Label30: TLabel;
    RadioButton16: TRadioButton;
    Series1: TFastLineSeries;
    Series2: TFastLineSeries;
    Series3: TFastLineSeries;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button3Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
    procedure Uravnenie(x:extended);
    procedure RungeKutta(t:extended);
    procedure Control;
    procedure PWM;
  end;

Const
  N=4;

var
  Form1: TForm1;
  F{функции},Y{текущие значения},Y0{начальные значения}:Array [0..N] of Extended;
  //Переменные
  Ysa, Ysb, Yra, Yrb, W,
  Isa, Isb, Ira, Irb, Im,
  M, Mc, Usa, Usb, Era, Erb,
```

```
  Umax, Uza, Uzb, UzC, fi, FiA, FiB, FiC, frequency,
  dP, dW, Pout, Wout, Pmiddle, Pin, Win:Extended;
  //Постоянные величины
  Unom,Mcn,LmN,Lm,Lss,Lrs,Rr,Rs,J,p,L1,L2,
  time, Fmod, Tmod:Extended;
  t:Extended; //Время
  h:Extended; //Шаг

//Переменные для векторного и градиентного управления
  Isaz,Isbz,Iscz,{заданные токи статора}
  Isdz,Isqz,{проекции заданного тока статора на оси dq}
  Wz,{заданная скорость}
  Mz, Mz_i{заданный момент},Yrz,YrzN{заданное потокосцепление ротора},
  gamma{угол между ab и dq},
  Yr, Ys, Yn,Ysz,YszN{потокосцепление статора},
  Ualz,Ubtz{закон градиентного управления}:Extended;

//Переменные для прямого управления моментом
  dM, dY : Integer;

//Переменные для определения ошибок регулирования
  StaticE, Ystat, Ymin, Ymax, DinamicE, Xdin, Nol,
  Kim,Kfm,TYz:Extended;

//Счетчики
  o,d: integer;

implementation

{$R *.dfm}

//Векторная широтно-импульсная модуляция
procedure TForm1.PWM;
                                  //(Ua  , Ub  , Uc)
Const Vector: Array [0..6, 1..3] of Extended =((0   , 0   , 0),
                                  (2/3 , -1/3, -1/3),
                                  (1/3 , 1/3 , -2/3),
                                  (-1/3, 2/3 , -1/3),
                                  (-2/3, 1/3 , 1/3),
                                  (-1/3, -1/3, 2/3),
                                  (1/3 , -2/3, 1/3));
```

```
Var Angle, Module, T1, T2: Extended;
   Sector,i: integer;
Begin
//Определение длительности относительно периода ШИМ
If (Tmod < (1/Fmod)) Then BEgin

//Определяем сектор
  Module:=Sqrt(Sqr(Uza)+Sqr(Uzb));

  If (Uzb > 0) then Angle:=arcTan2(Uzb,Uza)
            Else Angle:=arcTan2(Uzb,Uza)+pi*2;

  Sector:=Floor(Angle / (pi/3)) + 1;

//Определяем длительность
 T1:=(Sqrt(3)*Module / (1.35*Unom*Fmod)) * sin((pi/3)*Sector - Angle);
 T2:=(Sqrt(3)*Module / (1.35*Unom*Fmod)) * sin(Angle - (pi/3)*(Sector-1));

//Определяем подаваемое напряжение
  If (Tmod < T1) Then Begin
    Usa:=(Vector[Sector,1]-(Vector[Sector,2]+Vector[Sector,3])/2)*Unom*1.35*Sqrt(2/3);
    Usb:=sqrt(3)*(Vector[Sector,2]-Vector[Sector,3])/2*Unom*1.35*Sqrt(2/3);

  End else If (Tmod < (T1+T2)) Then Begin
    If (Sector = 6) Then Begin
      Usa:=(Vector[1,1]-(Vector[1,2]+Vector[1,3])/2)*Unom*1.35*Sqrt(2/3);
      Usb:=sqrt(3)*(Vector[1,2]-Vector[1,3])/2*Unom*1.35*Sqrt(2/3);
    end else Begin
      Usa:=(Vector[(Sector+1),1]-
(Vector[(Sector+1),2]+Vector[(Sector+1),3])/2)*Unom*1.35*Sqrt(2/3);
      Usb:=sqrt(3)*(Vector[(Sector+1),2]-Vector[(Sector+1),3])/2*Unom*1.35*Sqrt(2/3);
    end;
  End else Begin
       Usa:=0;
       Usb:=0;
       End;

//Обнуление счетчика длительности относительно периода ШИМ
  Tmod:=Tmod+h;
ENd else Tmod:=0;
```

```
End;

procedure TForm1.Uravnenie(x:extended);
Var
i:integer;
begin
//Смысловые переменные
Ysa:=y[0];  Ysb:=y[1]; Yra:=y[2]; Yrb:=y[3]; W:=y[4];
//Задаем кривую намагниченности
  if CheckBox2.Checked then begin
    Kim:=2*pi*50*LmN/Unom;
    Kfm:=Kim/LmN;
    Lm:=-0.0465*power(Im*Kim,4)/Kfm+0.3859*power(Im*Kim,3)/Kfm-
1.1592*power(Im*Kim,2)/Kfm+1.745*Im*Kim/Kfm+0.0004/Kfm;
  end
  else Lm:=LmN;
  L1:=Lss+Lm;
  L2:=Lrs+Lm;

  Isa:=(L2*Ysa - Lm*Yra) / (L1*L2-Lm*Lm);
  Isb:=(L2*Ysb - Lm*Yrb) / (L1*L2-Lm*Lm);
  Ira:=(L1*Yra - Lm*Ysa) / (L1*L2-Lm*Lm);
  Irb:=(L1*Yrb - Lm*Ysb) / (L1*L2-Lm*Lm);

  Im:=sqrt(sqr(Isa+Irb)+sqr(Isa+Irb));
  M:=p*Lm*(Ira*Isb-Isa*Irb);

//без нагрузки
    if RadioButton1.Checked then Mc:=0;
//вязкое трение
    if RadioButton3.Checked then Mc:=Mcn*W/(314/p);
//Сухое трение
    if RadioButton2.Checked then begin
      if W<>0 then Mc:=Mcn*Sign(W)
      else If M>Mcn then Mc:=Mcn else Mc:=M;
    end;

  Era:=-p*W*Yrb;
  Erb:=p*W*Yra;

      //Правые части дифференциальных уравнений
```

```
  F[0]:=Usa-Rs*Isa; //Потокосцепление статора (Ysa)
  F[1]:=Usb-Rs*Isb; //Потокосцепление статора (Ysb)
  F[2]:=Era-Rr*Ira; //Потокосцепление ротора (Yra)
  F[3]:=Erb-Rr*Irb; //Потокосцепление ротора (Yrb)
  F[4]:=(M-Mc)/J;   //Скорость вращения ротора (W)
end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
Var
   i:integer;
begin

//Начальные условия
  For i:=0 to N do Y[i]:=0;
  Y0:=Y;
  t:=0;
  h:=1e-6; //Шаг расчета
  o:=0;
  d:=0;

  Umax:=0; //Амплитуда напряжения
  fi:=0; //Угол
  FiA:=0;
  FiB:=-2*pi/3;
  FiC:=2*pi/3;

  frequency:=0; //Частота
  Fmod:=5000;
  Tmod:=0;

  Usa:=0;
  Usb:=0;

  Ualz:=0.1;
  Ubtz:=0.1;

  Uza:=0;
  Uzb:=0;
  Uzc:=0;

  dM:=0;
```

```
  dY:=-1;

  dW:=0;
  Wout:=0;
  Win:=0;
  Pmiddle:=0;

  StaticE:=0;
  DinamicE:=0;

  Ymax:=0;
  Ymin:=100;

  Nol:=0;

  Yrz:=0;
  Ysz:=0;
  Yr:=0;
  Ys:=0;
  Mz_i:=0;

  Lm:=1e-5;

  for i:=0 to 3 do Chart1.Series[i].Clear; //Очистить график

//Задаем известные параметры
  Unom:=strtoFloat(Edit1.Text);
  Lss:=strtoFloat(Edit2.Text);
  Lrs:=strtoFloat(Edit3.Text);
  LmN:=strtoFloat(Edit4.Text);
  Rs:=strtoFloat(Edit5.Text);
  Rr:=strtoFloat(Edit6.Text);
  Mcn:=strtoFloat(edit7.Text);
  J:=strtoFloat(Edit8.Text);
  p:=strtoFloat(Edit9.Text);
  time:=strtoFloat(Edit10.Text);
  YrzN:=strtoFloat(Edit11.Text);
  Mz:=strtoFloat(Edit12.Text);
  YszN:=strtoFloat(Edit13.Text);
  Yn:=strtoFloat(Edit14.Text);
  TYz:=strtoFloat(Edit15.Text);
```

```
//Начало цикла
  While t<5 do begin
    Control;
    Rungekutta(t);

    dP:=Rr*(sqr(Ira)+sqr(Irb))+Rs*(sqr(Isa)+sqr(Isb));
    dW:=dP*h+dW;

    Pout:=M*W;
    Wout:=Pout*h + Wout;

    Pin:=Usa*Isa+Usb*Isb;
    Win:=Win + Pin*h;

    Y0:=Y;
    t:=t+h;

//Счетчик вывода графиков на экран
    o:=o+1;
    If o=50 Then begin
    //Chart1.Series[0].AddXY(t,Yr);
    //Chart1.Series[1].AddXY(t,Yrz);
    //Chart1.Series[2].AddXY(t,Mzz);

{     oshibka1:=(oshibka2*0.1+Usa*h)/(h+0.1);
      oshibka2:=oshibka1;
      Chart1.Series[0].AddXY(t,oshibka1);   }

//    Chart1.Series[0].AddXY(t,W);
    Chart1.Series[1].AddXY(t,M);
    Chart1.Series[2].AddXY(t,Mz);
//    Chart1.Series[1].AddXY(t,Isaz);
//    Chart1.Series[2].AddXY(t,Isa);
    Chart1.Series[0].AddXY(t,Ysz);
//    Chart1.Series[2].AddXY(t,sqrt(Sqr(Yra)+Sqr(Yrb)));
    Chart1.Series[3].AddXY(t,sqrt(Sqr(Ysa)+Sqr(Ysb)));
//    Chart1.Series[3].AddXY(t,arcTan2(Uzb,Uza));
//    Chart1.Series[2].AddXY(t,sqrt(Sqr(Uza)+Sqr(Uzb)));
//    Chart1.Series[2].AddXY(t,Usa);
//    Chart1.Series[3].AddXY(t,Usb);
```

```
   o:=0;
   End;

   application.ProcessMessages; //Опрос процессов
  end;
end;

procedure TForm1.Control;
Const Index: Array [0..3, 1..6] of Integer =
            {sector}
{dY=1}  ((2 ,3 ,4 ,5 ,6 ,1 ),  {dM=1}
        (6 ,1 ,2 ,3 ,4 ,5 ),  {dM=-1}

{dY=-1}  (3 ,4 ,5 ,6 ,1 ,2 ),  {dM=1}
        (5 ,6 ,1 ,2 ,3 ,4 )); {dM=-1}

     U: Array [0..1, 1..6] of Extended =
{Ua} ((1  ,1/2      ,-1/2     ,-1  ,-1/2      ,1/2       ),
{Ub}  (0  ,0.866025 ,0.866025 ,0   ,-0.866025 ,-0.866025 )); //sqrt(3)/2 = 0.866025

var alpha, Tcontrol, Angle: Extended;
   k, Sector: integer;
Begin
//Прямой пуск
  if RadioButton4.Checked then begin
   Usa:=Unom*cos(2*pi*50*t);
   Usb:=Unom*sin(2*pi*50*t);

   Rr:=StrtoFloat(Edit6.Text) * ( 1 + exp(-W*p*4/314) );
   Lrs:=StrtoFloat(Edit3.Text) * ( 1 + exp(-W*p*4/314) );
  end;

//Плавное увеличение напряжения
  if RadioButton5.Checked then  begin
   If t<time then Umax:=Unom/time*t
   else Umax:=Unom;

   alpha:=2*arccos(Umax/Unom);

   Uza:=Unom*sin(2*pi*50*t)*sqrt(2/3);
```

```
    Uzb:=Unom*sin(2*pi*50*t-2*pi/3)*sqrt(2/3);
    Uzc:=Unom*sin(2*pi*50*t+2*pi/3)*sqrt(2/3);

    If Abs(Uza)<0.5 Then FiA:=0;
    If Abs(Uzb)<0.5 Then FiB:=0;
    If Abs(Uzc)<0.5 Then FiC:=0;

    FiA:=FiA+2*pi*50*h;
    FiB:=FiB+2*pi*50*h;
    FiC:=FiC+2*pi*50*h;

    If fiA<alpha then Uza:=0;
    If fiB<alpha then Uzb:=0;
    If fiC<alpha then Uzc:=0;

    Usa:=sqrt(2/3)*(Uza-(Uzb+Uzc)/2);
    Usb:=sqrt(2)*(Uzb-Uzc)/2;
  end;

//Плавный разгон U/f=const
  if RadioButton6.Checked then begin
    if t<time then frequency:=50/time*t
      else frequency:=50;
    Umax:=Unom*frequency/50;

    fi:=fi+2*pi*frequency*h;

    Uza:=Umax*cos(fi);
    Uzb:=Umax*sin(fi);

    PWM;
  end;

//Задание потока

  //Поток ротора синусоидальный
  if RadioButton14.Checked then Begin
    Yrz:=YrzN*sin(2*pi*t)+Yn;
    Ysz:=YszN*sin(2*pi*t)+Yn;
  End;
```

```
  //Поток ротора нарастающий
  if RadioButton15.Checked then begin
    if t<TYz then Begin
      Yrz:=YrzN*t/TYz+1e-5;
      Ysz:=YszN*t/TYz+1e-5;
    end else Begin
      Yrz:=YrzN;
      Ysz:=YszN;
    end;
  end;

  //Поток ротора постоянный
  if (RadioButton15.Checked=false) and (RadioButton14.Checked=false) then
    Begin
    Yrz:=YrzN;
    Ysz:=YszN;
    End;

//Задание момента
    If t<time then Wz:=2*pi*50/p/time*t
    else Wz:=2*pi*50/p;

    Tcontrol:=7.4/100*2*pi*50/p/7*J;
  //Используется только для настройки на симметричый оптимум
  //Mz_i:=Mz_i + J/(2*sqr(Tcontrol))*(Wz-W)*h;
//    Mz:={Mz_i} + J/Tcontrol*(Wz-W);

//Векторное управление
  if RadioButton7.Checked then begin
    if Yrz<0.1 then Yrz:=0.1;
    Isdz:=Yrz/Lm;
    Isqz:=Mz*(Lrs+Lm)/(Yrz*p*Lm);

    Yr:=sqrt(Sqr(Yra)+Sqr(Yrb));

    If (Yrb > 0) then gamma:=arcTan2(Yrb,Yra)
              Else gamma:=arcTan2(Yrb,Yra)+pi*2;

    Isaz:=Isdz*cos(gamma)-Isqz*sin(gamma);
    Isbz:=Isdz*sin(gamma)+Isqz*cos(gamma);
```

```
    Ualz:=Ualz + 50*Rs*(Isaz-Isa)*h;
    Ubtz:=Ubtz + 50*Rs*(Isbz-Isb)*h;

    Uza:=Ualz + 500*(Lss+Lm)*(Isaz-Isa);
    Uzb:=Ubtz + 500*(Lss+Lm)*(Isbz-Isb);

    If Abs(Uza)>Unom Then Uza:=Unom*Sign(Uza);
    If Abs(Uzb)>Unom Then Uzb:=Unom*Sign(Uzb);

//    Usa:=Uza;
//    Usb:=Uzb;
    PWM;

  end;

//Градиентное управление
  if RadioButton8.Checked then begin
    Ys:=sqrt(sqr(Ysa)+sqr(Ysb));

    Ualz:=Ualz - 50*Unom*(-Ysb*(M-Mz)/7 + Ysa*(sqr(Ys)-sqr(Ysz))/1)*h;
    Ubtz:=Ubtz - 50*Unom*(Ysa*(M-Mz)/7 + Ysb*(sqr(Ys)-sqr(Ysz))/1)*h;

    Uza:=Ualz - 2*Unom*(-Ysb*(M-Mz)/7 + Ysa*(sqr(Ys)-sqr(Ysz))/1);
    Uzb:=Ubtz - 2*Unom*(Ysa*(M-Mz)/7 + Ysb*(sqr(Ys)-sqr(Ysz))/1);

    If Abs(Uza)>Unom Then Uza:=Unom*Sign(Uza);
    If Abs(Uzb)>Unom Then Uzb:=Unom*Sign(Uzb);

//    Usa:=Uza;
//    Usb:=Uzb;
    PWM;
  end;

//Прямое управление моментом
  if RadioButton13.Checked then begin

    //Угловое положение вектора потокосцепления
    If (Ysb > 0) then Angle:=arcTan2(Ysb,Ysa)
              Else Angle:=arcTan2(Ysb,Ysa)+pi*2;

    Sector:=Floor( (Angle + pi/6) / (pi/3)) + 1;
```

```
    If Sector=7 then Sector:=1;

    //Ошибки регулирования момента
    // a=+/- 0,05 зона нечувствительности
    // b=0,2 зона неонозначности
    If dM = 0 Then
      dM:=sign(1 + sign(Mz-M-(0.05+0.1))) * sign(Mz-M)
    Else
      dM:=sign(1 + sign(Mz-M-0.05)) * sign(Mz-M);

    //Ошибки регулирования потока
    //c=+/- 0,05 зона неонозначности
    Ys:=sqrt(sqr(Ysa)+sqr(Ysb));
    dY:=sign(Ysz-sqrt(sqr(Ysa)+sqr(Ysb)) + 0.05*sign(dY));

    //Управляющее воздействие
    If dM = 0 Then Begin
      Usa:=0;
      Usb:=0;
    End Else Begin
       if dY=1 then if dM=1 then k:=0 else k:=1
              else if dM=1 then k:=2 else k:=3;

       Usa:=1.35*Unom * U[0,Index[k,Sector]];
       Usb:=1.35*Unom * U[1,Index[k,Sector]];
    End;

  end;

//считаем потери
  if CheckBox1.Checked then begin
    if t>4.99 then Begin
    Label15.Caption:=Floattostr(dW);
    Label24.Caption:=Floattostr(dW/Win*100);

    Label30.Caption:=Floattostr(Win);
    Label28.Caption:=Floattostr(Wout);

    d:=d+1;
    Pmiddle:=Pmiddle+Pout;
    Label26.Caption:=Floattostr(Pmiddle/d);
```

```
    end;
  end;

//Считаем ошибку по моменту
  if RadioButton10.Checked then begin
    // Статическая ошибка
    if t>4.5 then begin
      Ystat:=(M-Mz)/Mz*100;
      if Ystat>Ymax then Ymax:=Ystat;
      if Ystat<Ymin then Ymin:=Ystat;
      StaticE:=(Ymax+Ymin)/2;
      Label16.Caption:= Floattostr(StaticE);
    end;

    //Динамическая ошибка
    If (Nol<1) and ((M-Mz)>0) Then Nol:=1; //Наличие перерегулирования

    if {(Nol>0) and} ((t>0.2*time) and (t<2*time)) then begin
      Xdin:=(M-Mz)/Mz*100;
      if abs(Xdin)>abs(DinamicE) then DinamicE:=Xdin;
      Label21.Caption:= Floattostr(DinamicE);
    end;

  end;
//Считаем ошибку по потоку ротора
  if RadioButton11.Checked then begin
    // Статическая ошибка
    if t>4.5 then begin
      Ystat:=(Yr-Yrz)/Yrz*100;
      if Ystat>Ymax then Ymax:=Ystat;
      if Ystat<Ymin then Ymin:=Ystat;
      StaticE:=(Ymax+Ymin)/2;
      Label16.Caption:= Floattostr(StaticE);
    end;

    //Динамическая ошибка
    If (Nol<1) and ((M-Mz)>0) Then Nol:=1; //Наличие перерегулирования

    if (Nol>0) and ((t>0.5*TYz) and (t<1.5*TYz)) then begin
      Xdin:=(Yr-Yrz)/Yrz*100;
      if abs(Xdin)>abs(DinamicE) then DinamicE:=Xdin;
```

```
      Label21.Caption:= Floattostr(DinamicE);
    end;

  end;

//Считаем ошибку по потоку статора
  if RadioButton12.Checked then begin
    // Статическая ошибка
    if t>4.5 then begin
      Ystat:=(Ys-Ysz)/Ysz*100;
      if Ystat>Ymax then Ymax:=Ystat;
      if Ystat<Ymin then Ymin:=Ystat;
      StaticE:=(Ymax+Ymin)/2;
      Label16.Caption:= Floattostr(StaticE);
    end;

    //Динамическая ошибка
    If (Nol<1) and ((M-Mz)>0) Then Nol:=1; //Наличие перерегулирования

    if (Nol>0) and ((t>0.5*TYz) and (t<1.5*TYz)) then begin
      Xdin:=(Ys-Ysz)/Ysz*100;
      if abs(Xdin)>abs(DinamicE) then DinamicE:=Xdin;
      Label21.Caption:= Floattostr(DinamicE);
    end;

  end;
end;

procedure TForm1.Rungekutta(t:extended);
//рунгекутта
VAR
  x: extended;
  i: Byte;
  k1,k2,k3,k4: Array [0..N] Of extended;
BEGIN
  x:=t;
  FOR i:=0 TO N DO Y[i]:=Y0[i];

  Uravnenie(x);
  FOR i:=0 TO N DO k1[i]:=h * F[i];
  x:=t + h/2;
```

```
  FOR i:=0 TO N DO Y[i]:=Y0[i] + k1[i]/2;

  Uravnenie(x);
  FOR i:=0 TO N DO k2[i]:=h * F[i];
  FOR i:=0 TO N DO Y[i]:=Y0[i] + k2[i]/2;

  Uravnenie(x);
  FOR i:=0 TO N DO k3[i]:=h*f[i];
  x:=t + h;
  FOR i:=0 TO N DO Y[i]:=Y0[i] + k3[i];

  Uravnenie(x);
  FOR i:=0 TO N DO k4[i]:=h * f[i];
  FOR i:=0 TO N DO

  Y[i]:=Y0[i] + (k1[i] + 2*k2[i] + 2*k3[i] + k4[i])/6;
END;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  saveDialog1.DefaultExt:='wmf';   //Задаем расширение в окно диалога
//Здесь мы напишем как сохранять график
  SaveDialog1.Execute;// Вызываем окно диалога сохранения
  Chart1.SaveToMetafile(SaveDialog1.FileName);//сохраняем график в то имя кот ука-
зано в диалоге
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
var file23:TIniFile; //
begin
//Зугружаем данные
OpenDialog1.Execute; // Вызываем окно диалога открытия
file23:=TiniFile.create(OpenDialog1.FileName); //создали внутренний фаил и прирав-
няли к файлу кот был на жестком диске
Edit1.Text:=file23.ReadString('parametry','Umax','200'); //загружаем информацию из
файла на форму

Edit2.Text:=file23.ReadString('parametry','Lss','0,0001');

Edit3.Text:=file23.ReadString('parametry','Lrs','0,0001');
```

```
Edit4.Text:=file23.ReadString('parametry','Lm','0,05');

Edit5.Text:=file23.ReadString('parametry','Rs','0,5');

Edit6.Text:=file23.ReadString('parametry','Rr','0,05');

Edit7.Text:=file23.ReadString('parametry','Mc','20');

Edit8.Text:=file23.ReadString('parametry','J','0,6');

Edit9.Text:=file23.ReadString('parametry','p','2');

Edit10.Text:=file23.ReadString('parametry','t','1');

File23.Free; //отпускаем файл
end;

end.
```