

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Поволожский государственный технологический университет»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет»

На правах рукописи

Белогусев Владимир Николаевич

**РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Егоров А. В.

Томск - Йошкар - Ола – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Анализ существующих методов контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей и средств на их основе	10
1.1 Методы и средства непосредственного контроля вращающего момента асинхронных электрических двигателей	11
1.2 Методы и средства расчетно-экспериментального контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей	20
1.3 Методы и средства контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей	22
Глава 2 Разработка динамического метода контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей	30
2.1 Разработка метода контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь.....	33
2.2 Разработка динамического метода контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей	45
Глава 3 Разработка аппаратно-программного комплекса для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей	48
3.1 Описание аппаратно-программного комплекса для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей	48
3.2 Разработка методики проведения контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей	52
Глава 4 Сравнение результатов разработанного динамического метода контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей с существующими методами контроля.....	63
4.1 Условия проведения эксперимента	63
4.2 Анализ точности измерений.....	67
4.3 Определение момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей методом крутильных колебаний.....	71

4.4 Определение приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя динамическим методом с учетом потерь.....	75
4.5 Определение вращающего момента асинхронного электрического двигателя динамическим методом и с помощью датчика вращающего момента..	82
Список литературы	101
Приложение 1	111
Приложение 2	112
Приложение 3	113
Приложение 4	114
Приложение 5	115
Приложение 6	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Контроль асинхронных электрических двигателей необходимо проводить на всех стадиях эксплуатации.

При проектировании асинхронных электрических двигателей (далее двигатели) подвергаются контролю только макетные и опытные образцы для проверки соответствия выходных параметров требованиям технического задания. При изготовлении испытываются отдельные узлы двигателей после завершения определенных технологических операций. После сборки асинхронных электрических двигателей испытания проводятся для проверки соответствия ее выходных параметров требованиям технических условий (ГОСТ) [20-32]. После ремонта асинхронного электрического двигателя также должно быть проведено его испытание.

Кроме того, в процессе доводки опытных образцов или при подготовке к проектированию новых серий асинхронных электрических двигателей необходимо проводить исследовательские испытания [19].

При испытании асинхронных электрических двигателей необходима измерительная аппаратура двух типов:

- 1) для измерения электрических величин (тока, напряжения, мощности);
- 2) для измерения неэлектрических величин (механических параметров).

Аппаратура первого типа (электроизмерительные приборы) отработана достаточно хорошо. Она стандартизована, подвергается метрологическому контролю и выпускается специализированными предприятиями.

С аппаратурой для измерения неэлектрических величин дело обстоит значительно хуже. Номенклатура приборов, выпускаемых централизованно, невелика. Аппаратура не всегда стандартизована и порой не подвергается квалифицированному метрологическому контролю [72,77,83].

Сегодня из-за ограниченных возможностей существующих методов и средств контроля механических параметров существует проблема создания энергоэффективных асинхронных электрических двигателей в широком диапазоне быстроменяющихся скоростных, нагрузочных и переходных режимов работы. Наличие обозначенной проблемы объясняется недостатками применяемых сегодня тормозных методов, которые не позволяют с высокой точностью получать информацию о механических параметрах асинхронных электрических двигателей.

Таким образом, на настоящий момент сформировалось противоречие. С одной стороны, необходимо обеспечивать максимальную энергетическую эффективность асинхронных электрических двигателей на всех возможных режимах работы, с другой стороны, существующие методы и средства измерения не позволяют с высокой точностью проводить контроль механических параметров асинхронных электрических двигателей.

Поэтому необходима разработка метода и средства контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей на быстроменяющихся режимах работы.

Свободным от вышеперечисленных проблем, является динамический метод контроля механических параметров [36-43,70]. Он позволяет определять механический коэффициент полезного действия, механическую мощность и момент на валу, приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс с учетом потерь асинхронного электрического двигателя в широком диапазоне быстроменяющихся скоростных, нагрузочных и переходных режимов работы.

Степень разработанности темы. Основными механическими параметрами асинхронных электрических двигателей являются: механический коэффициент полезного действия, механическая мощность и вращающий момент на валу двигателя, частота вращения вала и приведенный к оси вращения ротора двигателя момент инерции вращающихся масс с учетом потерь. В процессе эксплуатации, а так же в послеремонтный период работы асинхронных электрических двигателей некоторые из механических параметров могут

изменяться под воздействием внешней среды (температура, давление, влажность, запыленность), а также параметров питающей сети.

Вопросами разработки методов контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей занимались: Л. В. Акимов, О. Д. Гольдберг, Н. Ф. Котельнец, Ю. Г. Борозяк, А. Д. Колесник, О. Л. Литвинов и др.

Анализ литературы показал, что существующие методы контроля механических параметров основываются или на больших допущениях и усреднениях (тормозные методы), или же на множестве косвенных параметров (например, по входным и выходным электрическим параметрам).

В диссертационной работе для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей разработан динамический метод контроля. Применение этого метода позволит контролировать механические параметры асинхронных электрических двигателей в режиме реального времени с высокой частотой регистрации измеряемых параметров во всем диапазоне возможных режимов работы в реальных рабочих условиях.

Объект исследования – асинхронные электрические двигатели.

Предмет исследований – механические параметры асинхронного электрического двигателя (мощность и момент на валу двигателя, приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс с учетом потерь, механический коэффициент полезного действия).

Цель работы - разработка метода и средства контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей, их теоретическое и экспериментальное обоснование.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие научно-технические задачи:

1. Анализ существующих методов контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей и средств на их основе.
2. Разработка динамического метода и средства контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

3. Сравнение результатов измерений, полученных с помощью разработанного динамического метода контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей и с помощью существующих методов контроля.

Методы исследования. При выполнении работы использованы методы теоретического и экспериментального исследования: анализ, синтез, сравнение, математическое и физическое моделирование. Метод контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей разработан на основе теории электрических машин, кинематики и динамики вращательного движения.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Обеспечена использованием при решении поставленных задач корректных математических методов, строгостью выполненных математических преобразований. Обоснованность и достоверность теоретических положений, выводов и рекомендаций подтверждается проведенными расчетами и сопоставлением с известными и опубликованными в научно-технической литературе результатами исследований.

Защищаемые научные положения.

1. Динамический метод контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс с учетом коэффициента, характеризующего механические и добавочные потери, в асинхронных электрических двигателях;

2. Динамический метод и средство контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей;

3. Произведения приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя и коэффициента, характеризующего потери в асинхронном электрическом двигателе с разложением их по составляющим.

Научная новизна результатов диссертационного исследования состоит в следующем.

1. Предложен динамический метод контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического

двигателя с учетом коэффициента, характеризующего механические и добавочные потери.

2. Разработаны метод и методика динамического контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

3. Разработан аппаратно-программный комплекс, реализующий динамический метод контроля.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Разработан динамический метод контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей. На базе этого метода создан аппаратно-программный комплекс, который позволяет:

1. повысить надежность выпускаемых асинхронных электрических двигателей за счет повышения качества приемо-сдаточных испытаний;

2. проводить послеремонтные или плановые испытания асинхронных электрических двигателей без демонтажа на рабочем месте при рабочих параметрах внешней среды двигателя (запыленность, влажность, температура и т. д.);

3. снизить массогабаритные показатели испытательного оборудования до 1-15 килограмм;

4. сократить время контроля механических параметров асинхронного электрического двигателя от нескольких часов до 5-10 минут.

Метод, методика и аппаратно-программный комплекс внедрены в практику диагностирования и послеремонтных испытаний приводных асинхронных электрических двигателей и технологического оборудования на ООО «Поволжский центр неразрушающего контроля», ООО «Интеллектуальные технологии», ООО «Институт перспективных технологий». Теория динамического контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей внедрена в магистерскую программу «Технологии инерционного контроля машин и оборудования нефтегазового и энергомашиностроительного

комплексов» по направлению 150402 «Технологические машины и оборудование» (Приложения 1-4).

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах:

1) Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, МГТУ им. Баумана 2008 год;

2) XV международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА", » г. Москва, МЭИ 2009 год;

3) 3 Международной научной конференции «Автоматизация в промышленности» в Институте проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН » в г. Москва 2009 год;

4) XVIII Научно-техническая конференция ОАО НПЦ «Полюс» «Электронные и электромеханические системы и устройства» г. Томск 2010 год;

5) V международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» в Казанском государственном энергетическом университете г. Казань 2010 год.

6) II Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы машиностроения» г. Самара 2010 год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 34 научных работы, в том числе четыре статьи в изданиях рекомендованных ВАК, получен патент № 2425342 МПК G01M 1/00 от 27.07.2011.

Личный вклад автора. Автором разработан динамический метод контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей, проведены научные эксперименты, обработаны экспериментальные данные, подготовлены публикации и оформлены патенты.

Структура работы: диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии, приложений. Общий объем диссертации 158 страниц. Работа содержит 19 таблиц, 33 рисунка. Библиография включает 92 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СРЕДСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

Сегодня из-за ограниченных возможностей существующих методов и средств контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей (далее двигатели) существует проблема создания энергоэффективных двигателей в широком диапазоне быстроменяющихся скоростных, нагрузочных и переходных режимов работы. Наличие обозначенной проблемы, объясняется недостатками применяемых сегодня тормозных методов, которые не позволяют с высокой точностью и частотой измерений получать информацию о механических параметрах асинхронных электрических двигателей.

Таким образом, на настоящий момент имеет место противоречие. С одной стороны, необходимо обеспечить максимальную энергетическую эффективность асинхронных электрических двигателей на всех возможных режимах работы, с другой стороны, существующие методы и средства измерения не позволяют с высокой точностью вести контроль механических параметров двигателей.

Поэтому необходима разработка метода и средства контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей на быстроменяющихся динамических режимах работы.

Степень разработанности темы. Основными механическими параметрами асинхронных электрических двигателей являются: механический коэффициент полезного действия, механическая мощность и вращающий момент на валу двигателя, частота вращения вала и приведенный к оси вращения ротора двигателя момент инерции вращающихся масс с учетом потерь. В процессе эксплуатации, а также в послеремонтный период работы асинхронных электрических двигателей, некоторые из механических параметров могут изменяться под воздействием внешней среды (температура, давление, влажность, запыленность), а также параметров питающей сети.

Вопросами разработки методов контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей занимались: Л. В. Акимов, О. Д. Гольдберг, Н. Ф. Котельнец, Ю. Г. Борозяк, А. Д. Колесник, О. Л. Литвинов и другие.

Анализ литературы показал, что существующие методы контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей основываются или на больших допущениях и усреднениях (тормозные методы), или же на использовании косвенных параметров (например, по входным и выходным электрическим параметрам).

В диссертационной работе, для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей разработан динамический метод контроля. Применение этого метода позволит контролировать механические параметры асинхронных электрических двигателей в режиме реального времени с высокой частотой и на всем диапазоне возможных режимов работы в реальных рабочих условиях.

Одним из базовых механических параметров асинхронных электрических двигателей является вращающий момент на валу, на его основе строится контроль механической мощности на валу и механического коэффициента полезного действия. Контроль вращающего момента на валу асинхронного электрического двигателя может быть осуществлен методами, которые целесообразно разделить на три группы: непосредственные методы, расчетные и расчетно-экспериментальные методы.

1.1 Методы и средства непосредственного контроля вращающего момента асинхронных электрических двигателей

Процесс электромеханического преобразования энергии в асинхронных электрических двигателях описывается уравнением:

$$M = M_c + M_D = M_c + J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.1)$$

где M - вращающий момент двигателя, Н·м; M_c - момент сопротивления механизма, приводимого в движение, Н·м; M_D - динамический момент, Н·м; J – приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс, кг·м²; $\frac{d\omega}{dt}$ - ускорение приведенных к оси вращения ротора вращающихся масс, с⁻².

Из уравнения (1.1) следует, что вращающий момент двигателя можно контролировать:

статическим методом при $M_D=0$ и $M_c=\text{const}$;

методом суммарного момента ($M_c + M_D$), контролируя момент реакции статора испытуемого двигателя;

динамическим методом при разгоне двигателя при $M_c=0$;

квазистатическим методом при переменном тормозном моменте $M_c=v_{\text{вар}}$.

Статический метод самый «старый» и наиболее отработанный из методов контроля механических параметров. С помощью статического метода можно построить статическую механическую характеристику асинхронного электрического двигателя $M=f(n)$ по точкам, измеряя величину момента для нескольких значений частот n вращения. В период его разработки он удовлетворял существующим потребностям: небольшое количество исследуемых двигателей, не лимитируемые по времени сроки испытаний двигателей, применение, дискретного подхода к формированию характеристик. Доработка асинхронных электрических двигателей не производилась, если типовые испытания давали удовлетворительный результат.

К работам, посвященным исследованию и развитию средств контроля, основанных на статическом методе можно отнести монографии С. М. Каца [49], М. А. Панасенкова [68,69], С.С. Одинца Г. Е. Топилина [67] и многих других.

При статическом методе контроля вращающего момента большую популярность получили моментометры разных конструкций. Моментометры можно классифицировать следующим образом:

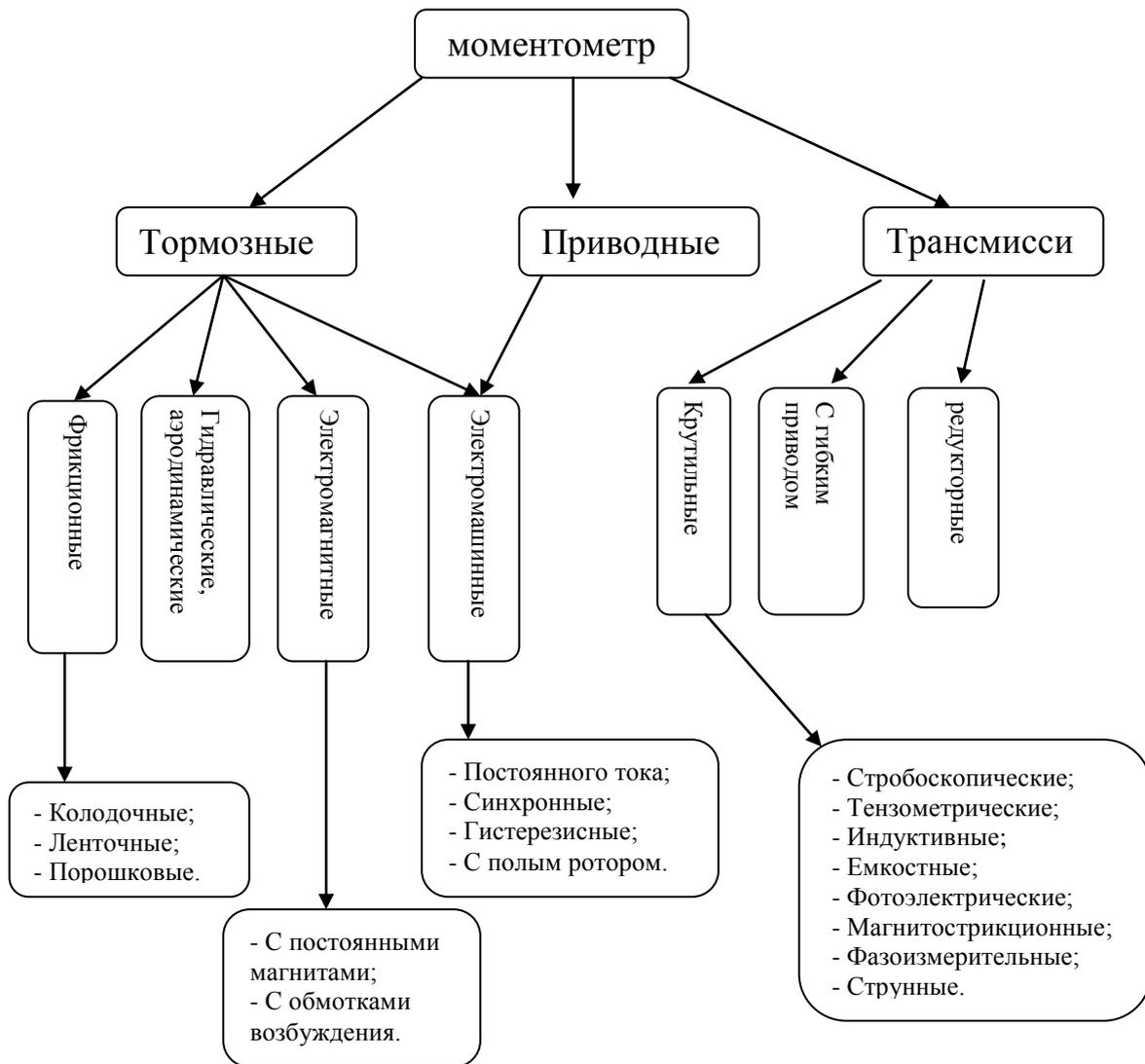


Рисунок 1.1 - Схема деления моментометров по видам.

Наиболее широкое применение среди моментометров асинхронных электрических двигателей получили тормозные устройства - электромашинные тормоза, асинхронные управляемые двигатели и синхронные генераторы, устройства с генераторами постоянного тока.

В [10] описано устройство для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей переменного тока, содержащее два механически сопряжённых валов электрических двигателя переменного тока, один из которых снабжен симметричным ротором, блоком подключения с клеммами для присоединения испытуемого двигателя к сети, преобразователем частоты с задающим генератором. При этом статорные обмотки электрических

двигателей соединены с блоком включения, вход преобразователя частоты - с сетью, а выход - с трёхфазным симметричным ротором. С целью повышения КПД, снижения стоимости и расширения функциональных возможностей описываемое устройство снабжено дополнительным преобразователем с непосредственной связью, который подключён к задающему генератору основного преобразователя частоты. Вход дополнительного преобразователя частоты включён в сеть, а второй двигатель выполнен асинхронным с фазным ротором, и его обмотка соединена с выходом дополнительного преобразователя частоты. Данное устройство может применяться для контрольных, типовых, ресурсных и исследовательских испытаний электрических двигателей переменного тока.

В [33] рассмотрена установка для проведения испытаний низковольтных асинхронных двигателей, предназначенная для проведения контроля механических параметров асинхронных двигателей на стендах с балансирными динамометрами, укомплектованными датчиками момента и частоты вращения. Эта система использует управляющий вычислительный комплекс типа СМ 1803.09, в состав которого дополнительно введено устройство сопряжения с объектом - модули ввода аналоговых и вывода дискретных сигналов, а также многорежимный таймер. В системе контролируются мгновенные значения токов, напряжений и т.д., а по ним затем вычисляются действующие значения искомых величин, то есть применяется косвенный вид измерений. Данная автоматизированная система обеспечивает проведение контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей (включая обработку информации и печать результатов) одним оператором за 15 минут. Дальнейшая разработка института ВШТИЭМ [62] на базе ЭВМ СМ 1810 позволяет при ограниченном числе измерений и эквивалентной схеме замещения асинхронного двигателя с двумя контурами на роторе контролировать рабочие и механические параметры двигателя. Характерным для [33,62] является использование диалогового режима работы, то есть в данном случае непременно необходимо

участие оператора в процессе контроля механических параметров асинхронного электрического двигателя.

Известен цифровой измерительный стенд для автоматического контроля параметров асинхронных электрических двигателей малой мощности, построенный Варшавским институтом электротехники [35]. Применяемые в контрольном стенде датчики момента вращения разделены на две группы. К первой группе относятся электрические динамометры, ко второй - торсионные валики - измерители момента. В электрических динамометрах контроль вращающего момента выполняется косвенным методом путём измерения реакции на подпорах тормоза или двигателя. В непосредственной системе при измерении вращающего момента в качестве нагрузки можно использовать маховую массу. Датчики скорости вращения, применяемые в описываемом измерительном стенде, можно разделить на две группы. Первую группу составляют тахометрические машинные генераторы постоянного и переменного тока, а вторую - импульсные датчики. При разработке цифрового стенда контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей был использован модульный принцип построения. С помощью вышеуказанного устройства можно контролировать нагрузочные механические параметры холостого хода, а также пусковые механические параметры двигателей малой мощности.

У всех вышеописанных устройств есть существенный недостаток - большой нагрев асинхронных электрических двигателей при контроле вращающего момента на валу вне рабочего диапазона механической характеристики двигателя, что удлиняет время испытаний, ведет к нестабильности измерений из-за неустановившегося теплового процесса, а при длительных измерениях может привести к недопустимому для нормальной работы изоляции нагреву обмоток асинхронного электрического двигателя [61].

Известны способы решения проблемы перегрева обмоток асинхронного электрического двигателя. При статическом методе механические параметры контролируются при пониженном напряжении сети. Строится кривая зависимости от коэффициента скольжения, учитывающего влияние насыщения стали на

вращающий момент на валу. Однако этот метод характеризуется длительным временем процедуры контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей [34].

Динамический метод контроля вращающего момента основан на теории вращательного движения, при котором осуществляется контроль углового ускорения ротора и приведенного к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момента инерции его вращающихся масс. При этом исследователи забывают об учете механических и добавочных потерь в роторе двигателя, измеряются ускорения ротора при разгоне от неподвижного состояния до номинальной частоты вращения. Эти механические и добавочные потери создают дополнительные усилия на валу, направленные в противоположную сторону от вращения вала двигателя, что приводит к созданию момента сопротивления с меняющимся значением от угловой скорости, что не учитывается и приводит к неточностям в ходе проведения контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

В динамическом режиме уравнение (1.1) имеет следующий вид:

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.2)$$

Для описания динамического метода использовалась упрощенная формула, без учета влияния механических и добавочных потерь, что является безусловным недостатком метода.

В научно-исследовательском институте «Электромаш» (г. Ереван) разработана автоматизированная установка для периодических испытаний асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором [8]. Блок измерения контролирует действующие значения тока, напряжения, активной мощности, активного сопротивления обмоток, угловой скорости и углового ускорения. Блок управления и обмена информацией управляет работой составных частей установки по командам, поступающим от ЭВМ. Установка имеет два

режима: ручной, когда все команды выполняются от пультов управления, и автоматический, когда управление происходит по заданной программе. Режимы работы устанавливаются по командам с пульта управления или от электрической пишущей машинки. Установка даёт возможность осуществлять контроль параметров асинхронных электрических двигателей в трёх режимах: короткое замыкание (к.з.), холостой ход (х.х.) и контроль механической характеристики (м.х.). В режиме к.з. и х.х. напряжение питания контролируемого асинхронного электрического двигателя устанавливается на 20% выше номинального ($1,2U_n$) и при уменьшении напряжения до $0,3U_n$ с шагом $0,1U_n$ на каждой ступени напряжения контролируются действующие значения тока, напряжения и мощности. Вращающий момент на валу асинхронного электрического двигателя определяют динамическим методом. В этой установке невозможно с наперёд заданной предельной погрешностью получить статическую механическую характеристику и определить кратности начального пускового и максимального моментов.

Винницким политехническим институтом разработана установка, предназначенная для контроля в автоматизированном режиме зависимости пускового момента в функции углового положения ротора электрических двигателей [71]. Установка состоит из трёх функционально-законченных блоков: испытательного стенда, блока контроля и микро ЭВМ. Разработанные технические средства и программное обеспечение автоматизированной метрологической аттестации и поверки системы осуществляется в двух режимах: статическом и динамическом. Технические параметры установки: диапазон контролируемого вращающего момента от 0,2 до 20 Нм; количество измеренных значений за один полный оборот ротора 260, 500; время измерения информативного параметра не более 5 с. В основу работы микропроцессорной системы контроля параметров асинхронных электрических двигателей в режиме холостого хода положен комплексный подход к проведению контролю параметров ненагруженных электрических двигателей в динамических режимах работы. Описываемая система разработана с целью обеспечения возможности

проведения контроля параметров при реверсе, пуске, переключении обмоток. Система не только контролирует выходные параметры двигателей, но и оказывает управляющие воздействия на него, благодаря чему имеется возможность реализации затянутого пуска двигателя. Система позволяет повышать разрешающую способность датчика угловой скорости до 1000 регистрируемых точек угловой скорости за один оборот вала, что приводит к контролю величины добавочных вращающих моментов двигателя. Величина вращающего момента определяется как произведение углового ускорения на момент инерции, значение которого определяется на начальном этапе испытаний.

Основная сложность вышеприведенных работ заключалась в невысоком быстродействии измерителей угловых ускорений тех лет и в отсутствии учета потери, и, как следствие, точность измерений была не высокая. Для решения этой задачи испытуемый двигатель нагружался добавочной инерционной массой для растягивания процесса пуска во времени и сглаживания колебаний.

На современном этапе развития датчиков угла поворота необходимость в добавочной инерционной массе отпадает, но остается еще один недостаток, связанный с учетом механических и добавочных потерь.

При использовании *метода суммарного момента* осуществляют контроль реактивных моментов, действующих на статор испытуемого двигателя.

В установках, созданных на основе метода суммарного момента, контролируется реактивный вращающий момент на валу, действующий на статор испытуемого двигателя. Контроль осуществляется как на установившихся режимах работы, так и на переходных. Контролируемый двигатель устанавливается на платформе, выполненной в балансирном исполнении или на специальных опорах, приспособленных для измерения реактивного момента. Из-за высокой сложности метода, его практически не использовали для контроля механических параметров двигателей, и имеется лишь незначительное количество упоминаний об этом методе в научной литературе.

Основным недостатком этого метода является необходимость крепления двигателя к измерительному механизму. Технологический разброс размеров

двигателя приводит к смещению его центра тяжести относительно оси поворота прибора, что может привести к значительным погрешностям при контроле параметров [61]. Именно поэтому данный метод применяется очень редко, и стенды на его основе давно не производятся.

В *квазистатическом методе* применяется переменный тормозной момент сопротивления $M_c = v_{\text{вар}}$. Создатели данного метода хотели совместить воедино преимущества статического и динамического методов контроля. При применении данного метода скорость изменения тормозного момента такова, что динамический момент практически равен нулю, а вращающий момент на валу асинхронного электрического двигателя примерно равен тормозному моменту. В квазистатических режимах переменный момент сопротивления изменяется с такой скоростью, что динамическая характеристика примерно совпадает со статической.

Этот метод активно разрабатывался в 80-х - 90-х годах XX века группой ученых Украинского политехнического института кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок» - Ю. Г. Борозяк, А. Д. Колесник, О. Л. Литвинов, И. И. Сосиницкий под руководством доктора технических наук Л. В. Акимов [30-35].

Ими было разработано автоматизированное устройство для проведения экспресс-динамометрических испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором до 10 кВт. В устройстве «Экспресс» испытуемый асинхронный электрический двигатель сочленен с нагрузочной машиной постоянного тока через индуктивное устройство контроля вращающего момента торсионного типа. В нагрузочную машину встроены тахогенератор. Система управления устройством «Экспресс» обеспечивает линейный закон изменения частоты вращения агрегата во времени независимо от величины контролируемого вращающего момента в пределах 0 – 100 Н м.

Заводом "Укрэлектромаш" (г. Харьков) предложено автоматизированное устройство для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей в статических и квазистатических режимах, которое предназначено

для исследования разрабатываемых двигателей с высотой оси вращения 56-180 мм и максимальным вращающим моментом 100 Н·м в диапазоне частот вращения 1,5 - 3000 об/мин [2-6,65]. Контроль механических параметров осуществляется путём сравнительного анализа механических характеристик головных образцов, изготовленных с варьируемыми конструктивными решениями и технологией производства. Высокая чувствительность и информативность контроля вращающего момента на валу достигнута автоматизацией управления и применением двух контрольных систем: специально изготовленного балансирного динамометра со встроенной нагрузочной машиной; торсионного устройства контроля вращающего момента на валу с набором сменных торсионов, рассчитанных на широкий диапазон контроля вращающего момента на валу, включая моменты механических и вентиляционных потерь. Для обнаружения проявлений паразитных моментов любого вида в механических параметрах асинхронных электрических двигателей устройство реализует квазистатический метод динамометрического контроля, при котором частота вращения двигателя плавно изменяется нагрузочной машиной с постоянным ускорением.

К недостаткам квазистатического метода можно отнести необходимость крепления контролируемого двигателя к нагрузочному механизму. Технологический разброс размеров двигателя приводит к смещению его центра тяжести относительно оси поворота прибора, что дает высокую погрешность при контроле.

1.2 Методы и средства расчетно-экспериментального контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей

Расчетно-экспериментальные методы можно разделить на два направления.

К первому направлению относятся методы [12,14,76,48,84-86,90], в которых контроль механических параметров осуществляется с изменением схемы включения или (и) использования тестовых сигналов. Это направление не

получило широкого распространения, из-за, невозможности осуществления контроль во время работы двигателей и необходимости применения дополнительного оборудования.

Ко второму направлению относятся методы контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей, с помощью которых измеряются токи и напряжение в статорной обмотке, активное сопротивление статорных обмоток, а также иногда частота вращения. По этим данным с помощью уравнений динамики асинхронного электрического двигателя контролируются механические параметры.

Известны работы [7,11,13-14,44-45,86-89] в которых контроль механических параметров двигателей основывается на вычислительных алгоритмах через наименьшие квадраты, при этом измеряются токи и напряжения в статорной обмотке, а так же частота вращения ротора на холостом ходу.

Расчетно-экспериментальный метод контроля активно разрабатывается группой ученых из ГОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет» Каширским В. Г., Нестеровским А. В., Алешиным Д. А под руководством доктора технических наук, профессора Ещина Е. К. [15,44-45,52-60]. Этой группой ученых был разработан комплекс для экспресс-испытаний асинхронных электрических двигателей. Комплекс экспресс-испытаний контролирует все параметры двигателей, только с помощью токов, напряжений в статорной обмотке и даже таких механических параметров, как частота вращения и приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс.

К недостаткам расчетно-экспериментального метода можно отнести невозможность контроля игольчатых провалов вращающего момента на стадии пуска, наличие электромагнитных процессов, возникающих на переходных режимах работы, и использование множества допущений, которые приводят к неточностям при контроле механических параметров двигателей в динамических режимах.

Выводы: Из всех вышеперечисленных методов контроля вращающего момента асинхронного электрического двигателя наибольшее предпочтение отдается динамическому методу, поскольку он обладает достаточно высокой точностью измерений при динамических режимах работы и требует минимальное количество дополнительного оборудования. Однако в процессе его практической реализации необходимо принимать во внимание механические и добавочные потери. Также необходимо с высокой точностью определять приведенный к оси вращения ротора момент инерции всех вращающихся масс двигателя с учетом потерь, что зачастую игнорируется, и с высокой точностью проводить контроль угловых ускорений ротора асинхронного электрического двигателя, что возможно реализовать с помощью современных устройств.

1.3 Методы и средства контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей

Значения моментов инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей приводятся в паспортных данных. При изготовлении конкретных двигателей значения моментов инерции могут отличаться друг от друга в силу вариации технологических условий изготовления и сборки двигателей, при этом определение точного значения приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс конкретного двигателя не представляется возможным.

Существующие методы контроля момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей регламентируются ГОСТ 11828 – 86:

Метод крутильных колебаний. Метод крутильных колебаний применяется для контроля момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей мощностью до 100 кВт. Вращающуюся массу подвешивают на металлической струне или на струне из иного высокопрочного материала с

изотропной структурой согласно схеме, представленной на рисунке 1.2. Диаметр и длину струны выбирают так, чтобы период крутильных колебаний T составлял не менее 1 с. Механическая прочность струны должна соответствовать массе вращающейся масс. Точка подвеса должна находиться точно на оси вращения.



Рисунок 1.2 - Схема подвеса вращающейся массы асинхронного электрического двигателя или эталонного тела, на металлической струне

Вращающуюся массу следует подвергнуть крутильным колебаниям и определить их период T . При этом одностороннее угловое отклонение должно составлять не более 25° .

Таким же образом и на той же струне следует определить период крутильных колебаний $T_{\text{э}}$ эталонного тела, момент инерции которого определяется расчетным путем. Момент инерции исследуемой вращающейся массы J , кг м², определяется:

$$J = J_{\text{э}} \left(\frac{T}{T_{\text{э}}} \right)^2, \quad (1.3)$$

где $J_{\text{э}}$ - момент инерции эталонного тела, кг м²; T - период колебаний исследуемой вращающейся массы, с; $T_{\text{э}}$ – период колебаний эталонного тела, с.

К недостаткам метода следует отнести: необходимость демонтажа двигателя; ограниченность применения по мощности; не учет потерь и моментов инерции подшипников и вентилятора.

Метод вспомогательного маятника. Метод вспомогательного маятника может применяться для контроля момента инерции вращающихся масс электрического двигателя мощностью от 10 до 1000 кВт.

Вращающуюся массу следует установить на подшипниках балансирующего станка. Вращающиеся массы с подшипниками качения могут быть установлены также на собственных подшипниках. В случае двигателей с фазным ротором в коллекторных двигателях следует поднять щетки.

Для контроля момента инерции методом вспомогательного маятника к валу исследуемой вращающейся массы прикрепляют дополнительную массу $m_{дон}$ посредством рычага, как показано на рисунке 1.3. Эту массу следует выбирать таким образом, чтобы масса рычага была пренебрежимо мала по сравнению с дополнительной массой $m_{дон}$. Вспомогательный маятник должен быть рассчитан таким образом, чтобы период колебаний T составлял от 3 до 8 с.

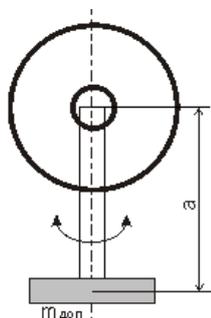


Рисунок 1.3 - Схема крепления дополнительной массы к вращающейся массе исследуемого двигателя посредством рычага.

Вращающуюся массу совместно с прикрепленным к ней вспомогательным маятником приводят в колебание. При этом одностороннее угловое отклонение не должно быть более 15° .

Период колебаний T следует определить как средний из нескольких колебаний. Для обеспечения точности измерения периода колебаний его следует проводить между моментами прохождения маятника через положение статического равновесия.

Момент инерции испытуемой вращающейся массы определяют:

$$J = m_{\text{дон}} \cdot a \left(\frac{T^2 \cdot g}{4 \cdot \pi^2} - a \right), \quad (1.4)$$

где $m_{\text{дон}}$ - масса вспомогательного маятника, кг; a – расстояние от центра тяжести вспомогательного маятника до оси вала вращающейся массы, м; T – период колебаний маятника, с;

К недостаткам метода нужно отнести в некоторых случаях необходимость демонтажа двигателя; ограниченность применения по мощности; низкая точность измерений.

Метод самоторможения. Метод самоторможения может применяться для контроля момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей мощностью свыше 100 кВт. Согласно этому методу двигатель с контролируемой вращающейся массой приводят во вращение с частотой n , которая выше номинальной, при номинальном возбуждении или без него и затем отключают от источника питания. Для двигателей с фазным ротором и коллекторных двигателей контроль осуществляют с минимальным необходимым количеством щеток, а остальные щетки поднимают. После отключения определяют кривую самоторможения $n = f(t)$ в диапазоне частот вращения от $1,2n_{\text{ном}}$ до $0,8n_{\text{ном}}$. Для достижения максимально возможной точности при определении этой кривой снижение частоты вращения следует осциллографировать.

Момент инерции $J, \text{кг} \cdot \text{м}^2$, исследуемой вращающейся массы для невозбужденного двигателя определяют в соответствии с рисунком 1.4.

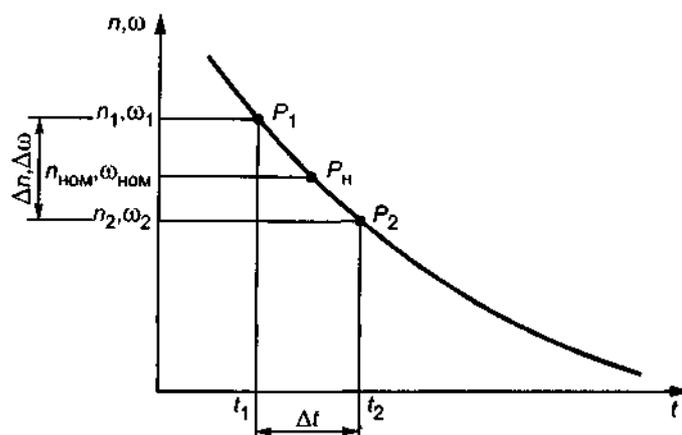


Рисунок 1.4 - График зависимости угловой скорости (частоты вращения) вращающейся массы асинхронного электрического двигателя от времени при самоторможении (кривая самоторможения).

При этом момент инерции определяется следующим образом:

$$J = \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \frac{P_{max} \cdot \Delta t}{n_{ном} \cdot \Delta n} = \frac{P_{max} \cdot \Delta t}{\omega_{ном} \cdot \Delta \omega}. \quad (1.5)$$

Для возбужденного двигателя выражения для момента инерции принимает вид:

$$J = \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \frac{(P_{max} - P_{ст}) \cdot \Delta t}{n_{ном} \cdot \Delta n} = \frac{(P_{max} - P_{ст}) \cdot \Delta t}{\omega_{ном} \cdot \Delta \omega}, \quad (1.6)$$

где P_{max} - механические потери при номинальной частоте вращения, Вт;

$P_{ст}$ - потери в стали при номинальной частоте вращения, Вт;

$n_{ном}$ - номинальная частота вращения, мин⁻¹;

Δn - разность между верхним и нижним значениями частоты вращения в опыте, мин⁻¹;

Δt - время, в течение которого частота вращения двигателя изменяется на Δn , с;

$\omega_{ном}$ - номинальная угловая частота вращения, с⁻¹;

$\Delta\omega$ - разность между верхним и нижним значениями угловой частоты вращения, с^{-1} ;

За верхнюю точку частоты вращения принимают наивысшую возможную точку в опыте, но не менее $1,1n_{ном}$. Нижняя точка должна отличаться от номинальной на такую же величину частоты вращения.

В случае невозможности повышения частоты вращения сверх номинального значения вместо номинальной частоты вращения принимают частоту вращения, лежащую на участке от 0,9 до 0,8 номинальной частоты вращения.

Если для повышения частоты вращения двигатель должен быть соединен с приводным двигателем, который невозможно отсоединить на ходу, то в формуле (1.5) и (1.6) под потерями следует понимать потери всего агрегата. Из полученного таким образом момента инерции J следует вычислить момент инерции вращающихся масс приводного двигателя и соединительной муфты, подлежащей отдельному определению.

К недостаткам метода следует отнести ограниченность применения по мощности, невозможность выделить механические потери и как следствие, не высокая точность.

Известны ряд методов, отличных от ГОСТ, для контроля момента инерции вращающихся масс:

На устройстве «Экспресс» моменты инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя определяются измерениями вращающихся моментов при разгоне и замедлении ротора асинхронного электрического двигателя.

$$J_p = \frac{-M_1 + M_2}{2\varepsilon}, \quad (1.7)$$

где M_1, M_2 - текущие значения вращающихся моментов при разгоне и замедлении ротора двигателя, соответственно, Н·м.

Недостаток данного метода состоит в определении вращающихся моментов квазистатическим методом. О недостатке данного метода говорилось выше.

В расчетном методе асинхронных электрических двигателей [44], также используется метод определения момента инерции вращающихся масс. Исходное значение момента инерции вращающихся масс считается известным или задаваемым приближенно. Истинное значение момента инерции вращающихся масс уточняется посредством измерения значения установившихся угловых скоростей вращения ротора. Основным недостатком метода является определение угловых ускорений косвенным способом, что приводит к большой неточности.

Выводы по первой главе

1. Из всех вышперечисленных методов контроля вращающего момента асинхронного электрического двигателя наибольшее предпочтение отдается динамическому методу, поскольку он обладает достаточно высокой точностью измерений при динамических режимах работы и требует минимальное количество дополнительного оборудования. Однако в процессе его практической реализации необходимо принимать во внимание механические и добавочные потери. Также необходимо с высокой точностью определять приведенный к оси вращения ротора момент инерции всех вращающихся масс двигателя с учетом потерь, что зачастую игнорируется, и с высокой точностью проводить контроль угловых ускорений ротора асинхронного электрического двигателя, что возможно реализовать с помощью современных устройств.

2. Существующие методы контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь не позволяют определять его с необходимой точностью и без демонтажа двигателя.

3. Анализ существующего уровня развития техники показывает, что применяемые в настоящее время методы контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей не позволяют с необходимой точностью контролировать механические параметры асинхронных электрических двигателей

в переходных режимах работы вследствие косвенности измерений, а также характеризуются низкой частотой регистрации измеряемых параметров. Поэтому исследования, направленные на разработку методов контроля, расширяющих возможности существующих методов и средств, являются актуальными.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На основе проведенного анализа первоисточников в первой главе выявлена необходимость создания динамического метода и средства контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей. Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод контроля приведенного к оси вращения ротора асинхронных электрических двигателей момента инерции вращающихся масс с учетом потерь.

2. Разработать метод контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей на основе динамического метода.

Для понимания разработанного метода рассмотрим энергетическую диаграмму асинхронного электрического двигателя, из которой видно, что часть подводимой к двигателю электрической мощности $P_1 = m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos\varphi_1$ (где m_1 - число фаз в обмотке двигателя, U_1 и I_1 - напряжение и токи в обмотках статора соответственно, φ_1 - сдвиг фаз между U_1 и I_1) затрачивается в статоре на магнитные $P_{эм1}$, вызванные потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи в сердечнике при его перемагничивании. Величина магнитных потерь пропорциональна частоте перемагничивания $P_M = f^\beta$, где $\beta = 1,3 \div 1,5$. Частота перемагничивания сердечника статора f_1 равна частоте тока в сети ($f = f_1$), а частота перемагничивания сердечника ротора $f = f_2 = f_{1s}$. Электрические потери $P_{э1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1$ (вызванные нагревом обмоток статора проходящими по ним

токами, r_1 - активное сопротивление обмоток статора, в перерасчете на рабочую температуру).

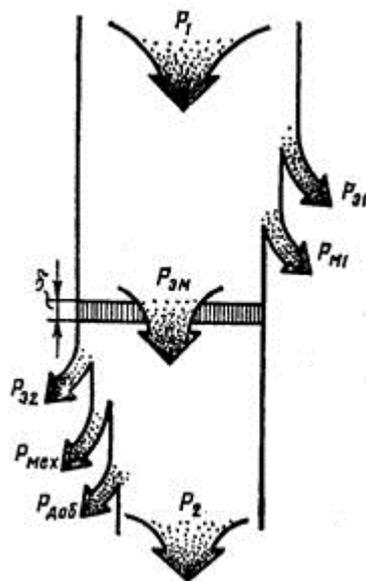


Рисунок 2.1. Энергетическая диаграмма асинхронного электрического двигателя

Оставшаяся электромагнитная мощность $P_{эм}$ передается на ротор, где частично расходуется на электромагнитные потери в роторе P_{M2} и электрические потери $P_{э2}$ ($P_{э2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2$, где m_2 - число фаз в обмотке ротора, I_2 - токи в обмотках ротора), затем преобразуется в полную механическую мощность. Часть мощности идет на покрытие механических $P_{Mех}$ (потери на трение в подшипниках и на вентиляцию) и добавочных потерь $P_{доб}$ (добавочные потери включают в себя все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами), а оставшаяся часть этой мощности P_2 составляет полезную мощность двигателя [50-51].

В соответствии с энергетической диаграммой, для идентичного подвода энергии к валу ротора асинхронного электрического двигателя при разных запусках необходимо соблюдать следующие условия:

- стабильность напряжения питающей сети, для идентичного подвода энергии к асинхронному электрическому двигателю;

- стабильность сопротивления (температура) обмоток, для идентичных электрических потерь в обмотках статора асинхронного электрического двигателя;
- стабильность частоты питающей сети, для идентичных электромагнитных потерь в обмотках статора асинхронного электрического двигателя.

2.1 Разработка метода контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь

Реализацию метода поясним на примере асинхронного электрического двигателя, вал которого соединен с потребителем через предохранительную муфту (рисунок 2.2).

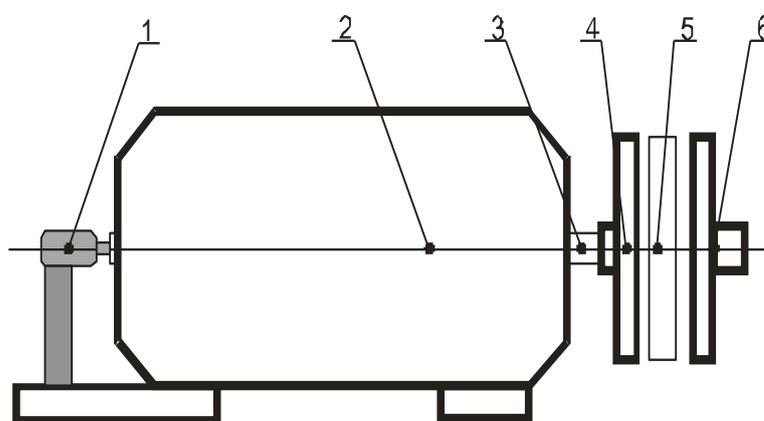


Рисунок 2.2 - Асинхронный электрический двигатель: 1- энкодер; 2 – асинхронный электрический двигатель; 3 – вал асинхронного электрического двигателя; 4 - первая полумуфта, 5 – диск с известным моментом инерции (эталонный диск); 6 - вторая полумуфта.

Определение приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь происходит следующим образом: из муфты вынимаются скрепляющие устройства и удаляется диск с эталонным моментом инерции 5. Запускается двигатель 2 с полумуфтой 4, и определяется среднее значение углового ускорения вала двигателя на выбранном скоростном диапазоне, который может находиться в пределах от нуля до номинального значения угловой скорости. Выбор скоростного диапазона зависит от поставленной задачи и средств измерения угловой скорости. Минимальное значение скоростного диапазона зависит от

средств измерения, максимальное значение может быть равно номинальному значению угловой скорости.

$$\varepsilon_1 = \frac{d\omega}{dt_1}, \quad (2.1)$$

где $d\omega$ – изменение угловой скорости на выбранном диапазоне, рад/с, dt_1 – время за которое произошло изменение угловой скорости $d\omega$ на выбранном скоростном диапазоне при первом запуске, с.

Если необходимо определить средние значения углового ускорения при разгоне вала двигателя в диапазоне от нуля до номинального значения угловой скорости выражение (2.1) принимает вид:

$$\varepsilon_1 = \frac{\omega_{НОМ}}{t_1}, \quad (2.2)$$

где $\omega_{НОМ}$ – номинальная угловая скорость вала двигателя, рад/с, t_1 – время разгона вала двигателя в диапазоне от нуля до номинального значения угловой скорости при первом запуске, с.

Определение углового ускорения ротора двигателя осуществляется с помощью инкрементального энкодера, при этом среднее значение вращающего момента M , который развивает система вращающихся масс «момент инерции вращающихся масс двигателя 2, полумуфта 4» определяется как:

$$M = (k_{НОМ} \cdot J_{в.м.д} + J_{муф}) \cdot \varepsilon_1, \quad (2.3)$$

где $k_{НОМ}$ – коэффициент характеризующий механические и добавочные потери в роторе двигателя, $J_{в.м.д}$ – приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя, кг м², $J_{муф}$ – приведенный к оси вращения ротора двигателя момент инерции полумуфты 4, кг м².

Далее двигатель 2 останавливается. Затем на полумуфте 4 ротора двигателя 2 с помощью скрепляющих элементов закрепляется диск с эталонным моментом инерции 5 J_5 . Двигатель 2 запускается и определяется среднее значение угловой скорости системы вращающихся масс «момент инерции вращающихся масс двигателя 2, полумуфта 4 и диск с эталонным моментом инерции 5», на выбранном скоростном диапазоне:

$$\varepsilon_2 = \frac{d\omega}{dt_2}. \quad (2.4)$$

Если необходимо определить средние значения углового ускорения при разгоне ротора двигателя 2 от нуля до номинального значений выражение (2.4) принимает вид:

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_{НОМ}}{t_2}, \quad (2.5)$$

где t_2 – время разгона ротора двигателя от нуля до номинального значения угловой скорости при втором запуске, с.

Среднее значение вращающего момента M , который развивает система вращающихся масс «момент инерции вращающихся масс двигателя 2, полумуфта 4 и диск с эталонным моментом инерции 5», определяется как:

$$M = (k_{ном} \cdot J_{в.м.д.} + J_{муфт} + J_5) \cdot \varepsilon_2. \quad (2.6)$$

Поскольку при первом и втором запуске потери в статоре и роторе двигателя остаются неизменными (так как не меняется напряжение, частота питающей сети и температура двигателя (сопротивление обмоток статора)), следовательно, по энергетической диаграмме двигателя, рис 2.1, механическая характеристика двигателя 2 не меняется. Поэтому правые части выражения (2.3) и (2.6) приравниваются и определяется приведенный к оси вращения ротора момент

инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь:

$$k_{nom} \cdot J_{в.м.д} = J_{\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - J_{муф}, \quad (2.7)$$

Если брать промежуток разгона для двух запусков от нуля до номинального значения, то $d\omega_1 = d\omega_2 = \omega_{ном}$ и $dt = t$, то можно выразить формулу (2.7) через:

$$\begin{aligned} k_{nom} \cdot J_{в.м.д} &= J_{\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - J_{муф} = \\ &= J_{\varepsilon} \cdot \frac{\frac{d\omega_2}{dt_2}}{\frac{d\omega_1}{dt_1} - \frac{d\omega_2}{dt_2}} - J_{муф} = J_{\varepsilon} \cdot \frac{t_1}{t_2 - t_1} - J_{муф} \end{aligned}, \quad (2.8)$$

где t_1 - время, в течение которого произошло изменение угловой скорости $d\omega_1$, с, а t_2 - время, в течение которого произошло изменение угловой скорости $d\omega_2$, с.

Таким образом, зная значения приведенных к оси вращения ротора моментов инерций вращающихся масс эталонного диска 5 и полумуфты 4 (вычисляются расчётным способом или определяются методом крутильных колебаний), можем, контролируя всего один параметр, а именно время разгона до номинальной угловой скорости при первом и втором запуске, определять приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя.

В отличие от традиционного динамического метода, ввели коэффициент, характеризующий потери в роторе двигателя, который включает в себя:

$$k_{nom} = (1 + k_1 + k_2), \quad (2.9)$$

где k_1 - коэффициент, характеризующий механические потери, k_2 – коэффициент, характеризующий добавочные потери в роторе. В том случае если механические и добавочные потери равны нулю, коэффициент, характеризующий потери, равен единице.

Приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя состоит из:

$$J_{в.м.д.} = J_{рот} + J_{под} + J_{вент}, \quad (2.10)$$

где $J_{рот}$ - приведенный к оси вращения ротора момент инерции ротора асинхронного электрического двигателя (может быть определен методом крутильных колебаний или взят из паспорта двигателя), кг м², $J_{под}$ - приведенный к оси вращения ротора момент инерции 2-х внутренних колец опорных подшипников и их тел качения (методика расчета приведена ниже), кг м², $J_{вент}$ - приведенный к оси вращения ротора момент инерции вентилятора (может быть определен методом крутильных колебаний), кг м².

$J_{рот}$, $J_{вент}$ - можно найти расчетным путем, в случае, если можно найти точные данные объема и плотности для каждой бесконечно малой единицы вращающихся масс, что практически невозможно, однако, их можно достаточно точно определить опытным путем - при разборе методом крутильных колебаний (ГОСТ 11828 – 86 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний).

Определим $J_{под}$. Для этого рассмотрим радиальный подшипник качения [17,21-26,46,64,73,78,79,82]. Пусть внешнее кольцо подшипника закреплено

неподвижно, внутреннее кольцо вращается вместе с валом с такой же угловой скоростью (рисунок 2.3.).

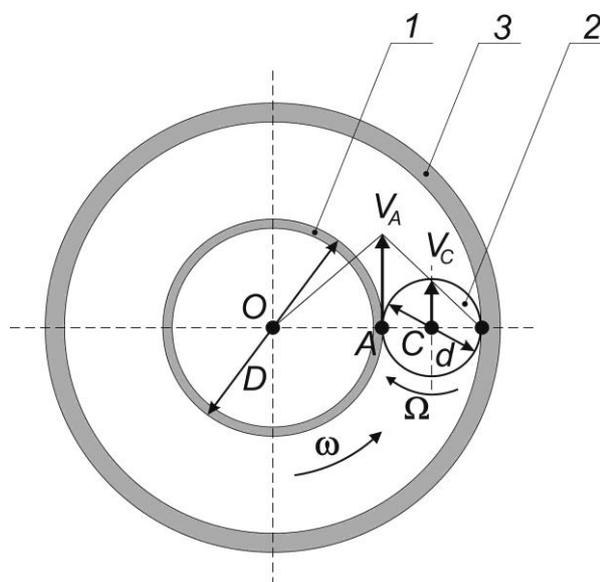


Рисунок 2.3 - Схема радиального подшипника качения: 1 – внутреннее подвижное кольцо; 2 – тело качения; 3 – наружное неподвижное кольцо.

Определим кинетическую энергию подшипникового узла, рассмотрев его как механическую систему:

$$E = E_{\text{в}} + nE_{\text{тк}}, \quad (2.11)$$

где $E_{\text{в}}$ – кинетическая энергия внутреннего кольца, Дж; n – число тел качения; $E_{\text{тк}}$ – кинетическая энергия одного тела качения, Дж.

Определим кинетическую энергию отдельных элементов системы. Внутреннее кольцо подшипника совершает вращательное движение с заданной угловой скоростью ω . Его кинетическая энергия определяется зависимостью:

$$E_{\text{в}} = \frac{J_{\text{вк}} \omega^2}{2}, \quad (2.12)$$

где $J_{вк}$ - приведенный к оси вращения ротора двигателя момент инерции внутреннего кольца подшипника, кг м².

Каждое из тел качения совершает плоскопараллельное движение. Для определения его кинетической энергии воспользуемся зависимостью:

$$E_{mk} = \frac{m_{mk} V_c^2}{2} + \frac{J_{mk} \Omega^2}{2}, \quad (2.13)$$

где m_{mk} – масса тела качения, кг; V_c – скорость поступательного движения центра масс тела качения, м/с; J_{mk} - момент инерции тела качения относительно центральной оси тела качения, кг м²; Ω – угловая скорость вращательной части плоскопараллельного движения, рад/с.

Для упрощения дальнейших расчетов предположим, что при движении подшипникового узла между телами качения и кольцами подшипника отсутствует проскальзывание. Тогда мгновенный центр скоростей тела качения находится в точке его соприкосновения с внутренней поверхностью неподвижного внешнего кольца подшипника. Соответствующий этому план скоростей показан на рисунке 2.3. Определим кинематические соотношения:

$$V_C = \frac{V_A}{2}; \quad \Omega = \frac{V_A}{d}; \quad V_A = \frac{\omega D}{2}, \quad (2.14)$$

где d – диаметр тела качения подшипника, м; D – диаметр внутреннего кольца подшипника, м.

Подставим соотношения (2.14) в равенство (2.13), получим:

$$E_{mk} = \left(\frac{1}{32} m_{mk} D^2 + \frac{1}{8} J_{mk} \frac{D^2}{d^2} \right) \omega^2. \quad (2.15)$$

Подставив в формулу (2.11) равенства (2.12) и (2.15), определим кинетическую энергию подшипника, выраженную через угловую скорость вращения ротора асинхронного электрического двигателя:

$$E = \frac{1}{2} \left[J_{вк} + n \left(\frac{1}{16} m_{mk} D^2 + \frac{1}{4} J_{mk} \frac{D^2}{d^2} \right) \right] \omega^2, \quad (2.16)$$

Сравнивая равенство (2.16) с зависимостью для определения кинетической энергии тела при вращательном движении, заметим, что выражение в квадратных скобках можно трактовать как момент инерции подшипника, приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя:

$$J_{под} = J_{вк} + n \left(\frac{1}{16} m_{mk} D^2 + \frac{1}{4} J_{mk} \frac{D^2}{d^2} \right) \quad (2.17)$$

В качестве тел качения могут применяться шарики либо ролики, моменты инерции которых определяются соответствующими зависимостями:

Для тела имеющего форму шара:

$$J_{mk} = \frac{2}{5} m_{mk} r^2 = \frac{1}{10} m_{mk} d^2 \quad (2.18)$$

Для тела имеющего форму цилиндра:

$$J_{mk} = \frac{1}{2} m_{mk} r^2 = \frac{1}{8} m_{mk} d^2 \quad (2.19)$$

Тогда с учетом (2.18, 2.19) приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции подшипникового узла определяется следующими равенствами:

Для шарикового подшипника:

$$J_{под} = J_{вк} + J_{тк} = J_{вк} + \frac{7}{80} m_{тк} D^2 n . \quad (2.20)$$

Для роликового подшипника:

$$J_{под} = J_{вк} + J_{тк} = J_{вк} + \frac{3}{32} m_{тк} D^2 n , \quad (2.21)$$

где $m_{тк}$ и $J_{вк}$ определяются расчетным путем.

Если необходимо определить составляющие коэффициента, характеризующего потери в роторе двигателя по отдельности: k_1 – коэффициент, характеризующий механические потери и k_2 – коэффициент, характеризующий добавочные потери, необходимо отключить испытуемый двигатель от электрической сети, и размагнитить его обмотки, что позволит исключить добавочные потери из общего коэффициента, характеризующего потери $k_{пот} = (1 + k_1)$. Разогнав испытуемый двигатель до номинального значения угловой скорости, не подключая к сети, можно определить k_1 коэффициент, характеризующий механические потери. Что бы разгон от нуля до номинального значения угловой скорости испытуемого двигателя был максимально приближен к собственному разгону, разгонять его необходимо идентичным двигателем, назовем его «двигатель2». Схема соединения двух идентичных двигателей иллюстрирует рисунок 2.4, на котором испытуемый асинхронный электрический двигатель используется как тело, обладающее эталонным моментом инерции.

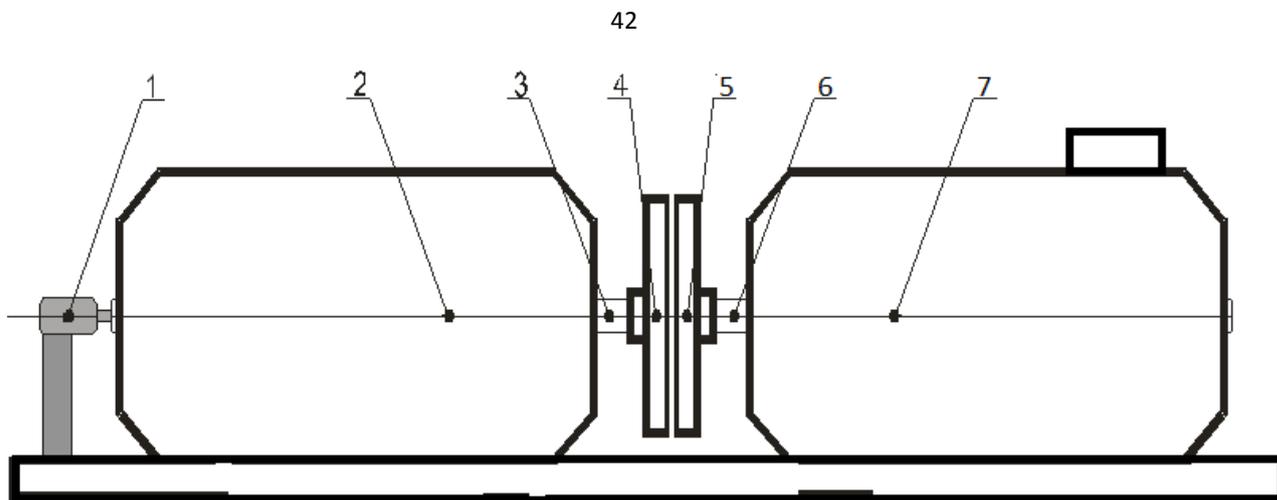


Рисунок 2.4 - Схема соединения испытуемого и идентичного («двигатель2») двигателя. 1 – энкодер; 2 – идентичный асинхронный электрический двигатель («двигатель2»); 3 – вал идентичного асинхронного электрического двигателя; 4 – первая полумуфта; 5 – вторая полумуфта; 6 – вал испытуемого асинхронного электрического двигателя, 7 - испытуемый асинхронный электрический двигатель.

Так как испытуемый асинхронный электрический двигатель используется в качестве эталонного диска, в котором отсутствуют добавочные потери то можно записать:

$$J_{\text{э}} = J_{\text{в.м.д}} \cdot (1 + k_1), \quad (2.22)$$

С помощью представленного выше динамического метода, определим через «двигатель2» приведенный к оси вращения ротора момент инерции испытуемого двигателя без учета добавочных потерь. Для этого проведем два экспериментальных запуска:

- первый запуск - запустим «двигатель2» и определим среднее значение углового ускорения ε_3 вала ротора «двигателя 2» на выбранном скоростном диапазоне с помощью энкодера, при этом среднее значение вращающего момента M , который развивает «двигатель2», определяется как:

$$M = (k_{\text{ном}} \cdot J_{\text{в.м.д}} + J_{\text{муфт}}) \cdot \varepsilon_3, \quad \text{где } \varepsilon_3 = \varepsilon_1 \quad (2.23)$$

- второй запуск – запустим «двигатель2» жестко скрепленный с испытуемым двигателем и определяем среднее значение углового ускорения ε_4 вала ротора «двигателя2», при этом среднее значение вращающего момента M , который развивает «двигатель2», определяется как:

$$M = (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + 2 \cdot J_{муф} + J_{\varepsilon}) \cdot \varepsilon_4. \quad (2.24)$$

Выражение (2.24) с учетом выражения (2.22) принимает следующий вид:

$$M = (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + 2 \cdot J_{муф} + J_{в.м.д} \cdot (1 + k_1)) \cdot \varepsilon_4. \quad (2.25)$$

Поскольку электромагнитная мощность, подводимая к ротору асинхронного электрического двигателя2 при обоих запусках остается неизменной, то мы можем приравнять правые части выражений (2.22) и (2.25) и определить k_1 -коэффициент, характеризующий механические потери:

$$\begin{aligned} (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + J_{муф}) \cdot \varepsilon_3 &= (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + 2 \cdot J_{муф} + J_{в.м.д} \cdot (1 + k_1)) \cdot \varepsilon_4 \\ \frac{(k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + J_{муф}) \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_4} - k_{nom} \cdot J_{в.м.д} - 2 \cdot J_{муф} &= J_{в.м.д} \cdot (1 + k_1) \\ \frac{(k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + J_{муф}) \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_4 \cdot J_{в.м.д}} - k_{nom} - 2 \cdot \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}} - 1 &= k_1 \\ k_1 &= \frac{k_{nom} \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_4} + \frac{J_{муф} \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_4 \cdot J_{в.м.д}} - k_{nom} - 2 \cdot \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}} - 1 \\ k_1 &= k_{nom} \cdot \left(\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4} - 1\right) + \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4} - 2\right) - 1 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Зная значения k_{nom} , $J_{в.м.д}$, методики определения которых показаны выше, определим $J_{муф}$ определяется методом крутильных колебаний или расчетным путем, по формуле (2.26) определяем недостающий элемент – k_I :

Тогда с учетом (2.9) и (2.26) получим k_2 - коэффициент, характеризующий добавочные потери:

$$\begin{aligned}
 k_2 &= k_{nom} - 1 - (k_{nom} \cdot \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4} - 1) + \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}} \cdot (\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4} - 2) - 1 = \\
 &= k_{nom} - k_{nom} \cdot \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4} - 1 + \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}} \cdot (\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4} - 2) = \\
 &= k_{nom} \cdot (2 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4}) - \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}} \cdot (\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4} - 2) = \\
 &= k_{nom} \cdot (2 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4}) + \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}} \cdot (2 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4}) = (k_{nom} + \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}}) \cdot (2 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4}) \\
 k_2 &= (k_{nom} + \frac{J_{муф}}{J_{в.м.д}}) \cdot (2 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_4}) \tag{2.27}
 \end{aligned}$$

На представленный выше метод определения приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь получен патент на изобретение РФ [70].

2.2 Разработка динамического метода контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей

Вращающий момент асинхронного электрического двигателя M определяется по формулам (2.3) или (2.6), и в общем случае равен:

$$M = (k_{\text{пот}} \cdot J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon. \quad (2.28)$$

Механическая мощность асинхронного электрического двигателя P определяется:

$$P = M \cdot \omega = (k_{\text{пот}} \cdot J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon \cdot \omega. \quad (2.29)$$

Физический смысл понятия вращающего момента асинхронного электрического двигателя, заключается в том, что он возникает на валу двигателя до начала вращения ротора и после преодоления момента механических и добавочных потерь преобразуется во вращающий (механический) момент на валу асинхронного электрического двигателя M_2 :

$$M_2 = (J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon = (J_{\text{рот}} + J_{\text{под}} + J_{\text{вент}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon, \quad (2.30)$$

где M_2 - вращающий момент на валу ротора асинхронного электрического двигателя, Н м.

В таком случае механическая мощность на валу асинхронного электрического двигателя P_2 от угловой скорости ротора:

$$\begin{aligned}
 P_2 &= M_2 \cdot \omega = (J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon \cdot \omega = \\
 &= (J_{\text{рот}} + J_{\text{под}} + J_{\text{вент}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon \cdot \omega.
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

Коэффициент полезного действия вращательной энергии в асинхронном электрическом двигателе:

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{вращ}} &= \frac{P_2}{P} = \frac{(J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon \cdot \omega}{(k_{\text{пот}} \cdot J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon \cdot \omega} = \\
 &= \frac{J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}}{k_{\text{пот}} \cdot J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}}.
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Механический коэффициент полезного действия асинхронного электрического двигателя:

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{мех}} &= \frac{P_2}{P_3} = \frac{(J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon \cdot \omega}{((1 + k_1) \cdot J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}) \cdot \varepsilon \cdot \omega} = \\
 &= \frac{J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}}{(1 + k_1) \cdot J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муф}}}
 \end{aligned}
 \tag{2.33}$$

где P_3 – это сумма механической мощности на валу двигателя P_2 и мощности механических потерь в роторе.

Если необходимо определить КПД всего асинхронного электрического двигателя, то определяются подводимая к двигателю электрическая мощность из сети $P_1 = m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1$.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(J_{\text{рот}} + J_{\text{под}} + J_{\text{вент}}) \cdot \frac{d\omega}{dt}}{m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1}
 \tag{2.34}$$

Выводы по второй главе:

1. Разработан динамический метод определения приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь.
2. Разработан динамический метод контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей в широком диапазоне частот вращения без демонтажа двигателя.
3. Впервые определена доля каждого вида потерь (механических, добавочных) в системе вращающихся масс асинхронного электрического двигателя, выраженная величиной приведенного к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момента инерции вращающихся масс с учетом потерь.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1 Описание аппаратно-программного комплекса для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей

Для контроля механических параметров асинхронного электрического двигателя, разработан аппаратно-программный комплекс (далее АПК), представленный на рисунке 3.1. АПК предназначен для контроля параметров асинхронных электрических двигателей переменного тока (одно- и трехфазных) мощностью до 90 кВт при напряжениях питающей сети до 400 В.



Рисунок 3.1 - АПК для динамического контроля асинхронных электрических двигателей.

Комплексом производится контроль механического коэффициента полезного действия, полной электрической мощности (активной и реактивной) и механической мощности, вращающего момента на валу асинхронного электрического двигателя, приведенного к оси вращения ротора момента инерции

вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь, а так же угловой скорости и угловых ускорений на валу двигателя.

АПК имеет три аналоговых (напряжение в трех фазах) и четыре цифровых (токи в трех фазах и энкодер) измерительных канала (рисунок 3.2). При вращении вала в энкодере формируется цифровой сигнал. Энкодер генерирует 5000 импульсов за один оборот вала двигателя. Применение энкодера с таким количеством импульсов на один оборот дает точность высших порядков и подробную характеристику разгона со всеми колебаниями угловой скорости, которые возникают от переходных процессов при разгоне асинхронного электрического двигателя.

В АПК применен инкрементальный энкодер компании Autonics, датчики тока компании Honeywell на основе эффекта Холла, которые формируют цифровой сигнал, допустимый диапазон токов составляет ± 1000 А. К главным достоинствам датчиков на основе эффекта Холла можно отнести отсутствие вносимых в систему потерь мощности и, как следствие, выделение теплоты, хорошую электрическую изоляцию, широкий диапазон частот и возможность измерения постоянных токов. Датчики напряжения выполнены в виде резисторов высоких сопротивлений. В зависимости от величины напряжения резисторы подают на вход аналогово-цифрового преобразователя напряжение, не превышающее 5 В.

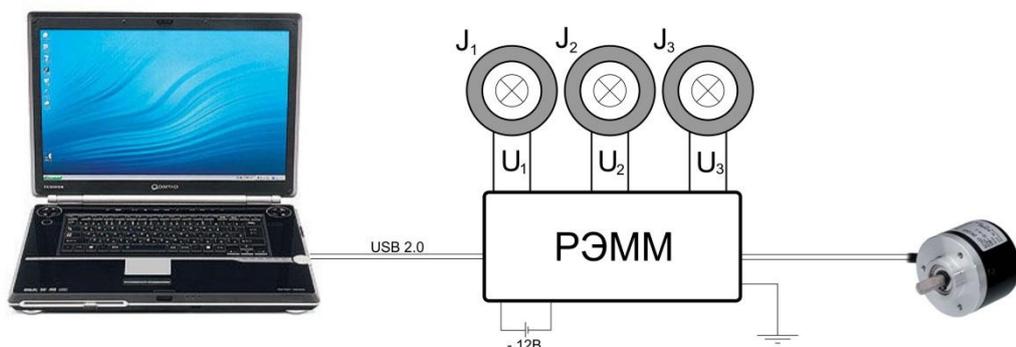


Рисунок 3.2 - Структура АПК для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

Цифровой сигнал с датчиков поступает на вход блока регистрации, в котором через гальваническую развязку сигналов и фильтр попадает в измерительный микроконтроллер Atmega 640 с тактовой частотой 16 МГц (рисунок 3.3). Система гальванической развязки состоит из двух блоков - блок развязки питания и блок развязки сигнальной линии. Цифровой сигнал из микроконтроллера поступает на Flash-память до конца измерения. После окончания измерения данные из Flash-памяти поступают в персональный компьютер (ПК) и обрабатываются терминальной программой, установленной на жестком диске ПК.

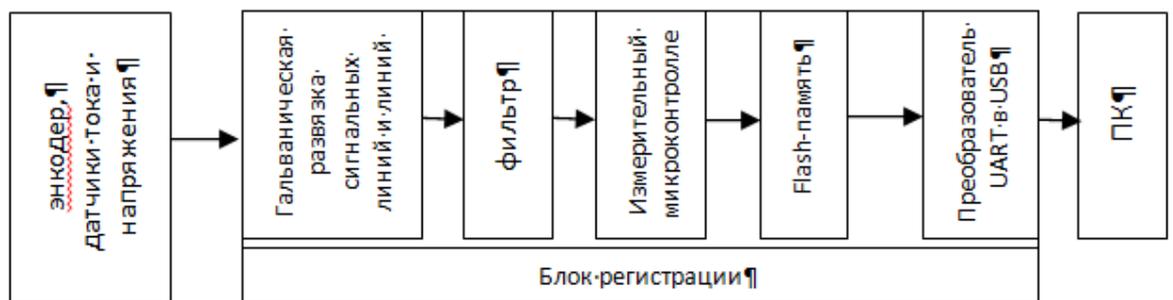


Рисунок 3.3 - Структура блока регистрации АПК для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

В терминальной программе на ПК осуществляется математическая обработка массива данных, вычисление угловых скоростей, ускорений вала асинхронного электрического двигателя, полной электрической мощности и производится расчет механических параметров, по методике, приведенной во второй главе. По данным угловых ускорений, полученных при разгоне двигателя с диском с известным моментом инерции и без него, вычисляется приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс электрического двигателя с учетом потерь, механическая мощность, и вращающий момент на валу двигателя и электрическая мощность двигателя. Полученные результаты представляются графически. Терминальная программа имеет встроенные часы реального времени, что позволяет сохранять время и дату проведения контроля параметров. Комплекс выполнен в экранированном алюминиевом корпусе.

Технические характеристики комплекса:

Потребляемая мощность - 500 мВт.

Питание комплекса осуществляется от источника постоянного тока напряжением 12В. Питание персонального компьютера производится от сети переменного тока напряжением 220 В с пределами допустимого отклонения от минус 15% до плюс 10% частотой (50±1) Гц с коэффициентом нелинейных искажений не более 5%. Заземление прибора осуществляется через клемму на наружной боковой части прибора.

Количество измерительных каналов – 7.

Тип входного сигнала – биполярный.

Диапазон входного напряжения – ±400 В.

Диапазон входного тока – ±1000 А.

Входное сопротивление измерительного канала – 40 кОм.

Количество входных импульсов за 1 оборот ротора энкодера – 5000 имп.

Нижний предел измеряемой частоты оборотов – 0 об/мин.

Верхний предел измеряемой частоты оборотов – 3000 об/мин.

Дискретность измерения длительности входных импульсов – 62,5 нс.

Тактовая частота измерительного контроллера – 16 МГц.

Скорость накопления регистрируемых данных, макс. – 1,37 МБ/мин.

Точность измерения числа оборотов в минуту - Младший разряд.

Погрешность измерения углового ускорения – Младший разряд.

Печать протокола отчета о проведенных испытаниях.

Сохранение и загрузка записанных данных.

Отображение рассчитанных параметров в графическом виде.

Вес прибора - не более 10 кг.

Габаритные размеры - 300*200*100.

Цифровой интерфейс — USB 2.0.

Скорость передачи данных USB 2.0 — 256000 б/с.

Объем встроенной памяти – 2 Гб.

АПК состоит из элементов, приведенных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Комплект поставки АПК.

Наименование	Кол	Примечание
АПК	1	
Программа регистрации и анализа цифрового сигнала	1	Поставляется на диске
Руководство по эксплуатации	1	
Кабель USB	1	
Энкодер	1	
Эталонный диск	1	
Упаковка	1	

Разработаны методика контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей динамическим методом и руководство по эксплуатации АПК, которые приведены в приложении 5.

Код программ для динамического контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей описан в приложении 6.

3.2 Разработка методики проведения контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей

Если необходимо определить приведённый к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс без учета потерь, тогда выбранные двигатели сначала разбираются, определяются приведённые к оси вращения ротора моменты инерции вращающихся масс $J_{рот} + J_{вк} + J_{вент}$ методом крутильных колебаний без учета потерь по ГОСТ 11828-86 (методика была описана в первой главе).

Далее выбранные двигатели собираются и проходят контроль механических параметров, разработанным динамическим методом.

Выполняются следующие действия:

- разместить и смонтировать АПК, согласно требованиям безопасности.
- подключить USB кабель к ПК и АПК.
- Подключить питание ПК.

- запустить терминальную программу комплекса на ПК (рисунок 3.4).

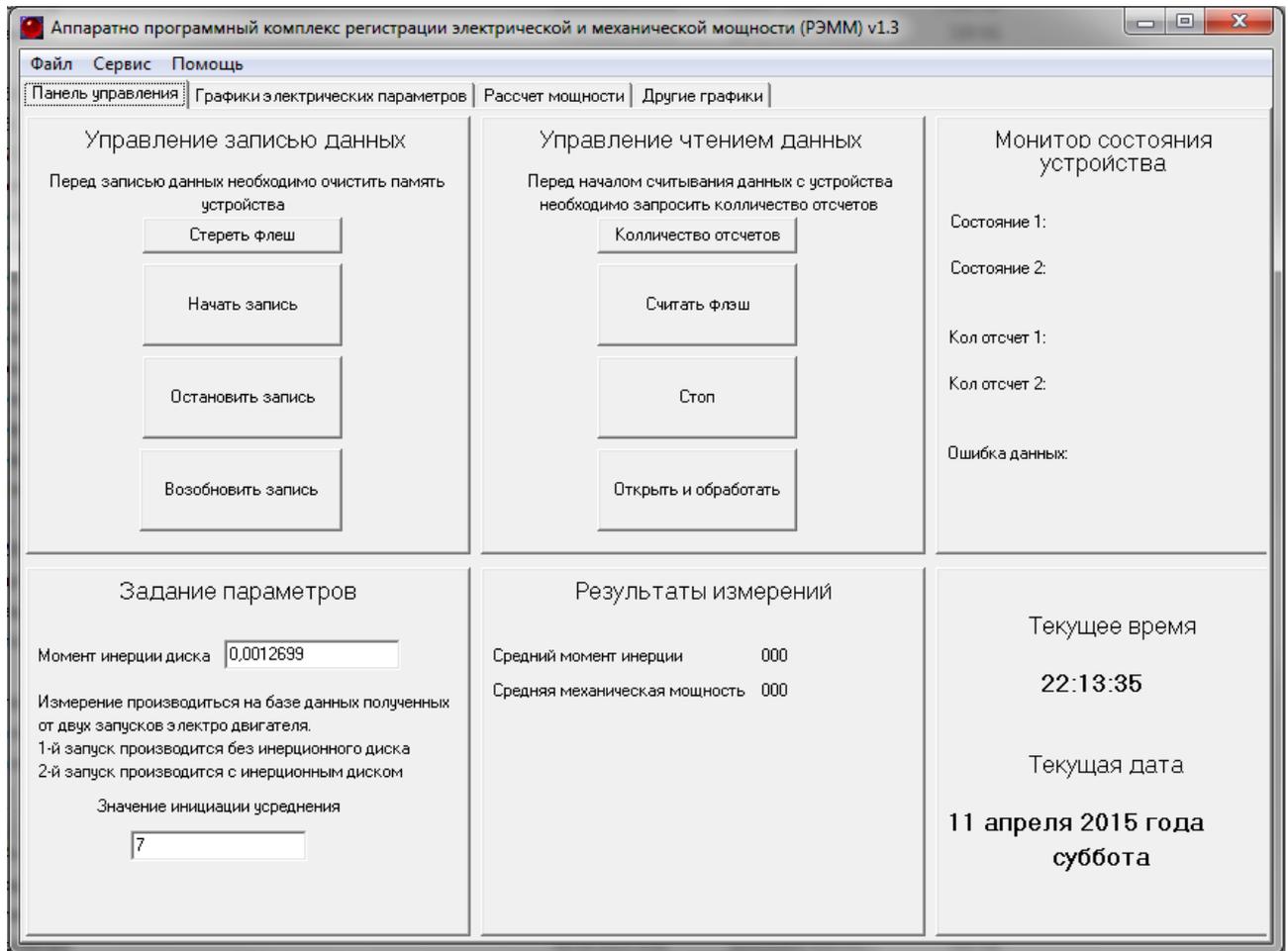


Рисунок 3.4 - Терминальная программа АПК для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

- соединить энкодер с ротором испытуемого асинхронного электрического двигателя.
- соединить клеммы питающих проводов со входными клеммами на комплексе.
- соединить выходные клеммы посредством силового кабеля с испытуемым асинхронным электрическим двигателем.
- запустить двигатель, проверить направление вращения вала, правильное направление вращения - против часовой стрелки.

Подготовка терминальной программы комплекса (рисунок 3.4.).

- перейти на вкладку "настройка порта" основного окна программы.
- задать номер порта, к которому подключено устройство,
- проверить соответствие параметров обмена данными.
- нажать кнопку "Применить", в правой части интерфейса программы отобразится состояние соединения.
- если команды не выполняются: необходимо проверить правильность соединения устройства с компьютером, соответствие заданного номера порта с используемым, переустановить драйвер USB устройства, перезагрузить систему.
- если соединение установлено, нужно перейти на вкладку "Настройка фильтра данных", параметр "количество отсчетов ФСС" должен быть равен количеству импульсов, выдаваемых энкодером.
- перейти на вкладку "Определение момента инерции" программы.
- перед началом измерений, нужно задать значение момент инерции эталонного диска. При необходимости можно производить измерения без фильтрации полученных данных, для этого нажмите на кнопку "Фильтр включен", фильтр будет отключен.
- в правой части интерфейса программы заполнить графы "Данные оператора" и "Модель и номер двигателя". Сначала программа производит измерение угловых ускорений при разгоне без эталонного диска, затем с ним. Программа по заданным формулам высчитывает приведённый к оси вращения вала ротора момент инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь.
- нажать кнопку "Стереть флеш" для очистки предыдущей информации с Flash-памяти.
- нажать кнопку "Начать запись".
- запустить асинхронный электрический двигатель.
- когда вал ротора асинхронного электрического двигателя достигнет номинальной угловой скорости, нажать кнопку "Остановить запись".

Далее устанавливается эталонный диск.

- нажать кнопку "Возобновить запись".
- запустить асинхронный электрический двигатель.
- когда вал ротора асинхронного электрического двигателя достигнет номинальной угловой скорости нажать кнопку "Остановить запись".
- нажать кнопку "количество отчетов".
- нажать кнопку "Считать флеш", откроется диалоговое окно с указанием «места» куда сохранять на ПК первый рабочий файл (можно задать название файла), после выбора места нажать "сохранить", далее ожидаем пока красные сигнальные светодиоды около USB шлейфа на АПК перестанут мигать.
- После того, как, красные сигнальные светодиоды около USB шлейфа на АПК перестали мигать, нажимаем кнопку "Стоп". Откроется диалоговое окно с указанием «места» куда сохранять на ПК, второй рабочий файл, после выбора места жмем "сохранить", как правило, рядом с первым файлом.
- Нажать кнопку "Открыть и обработать". Откроется диалоговое окно с указанием «места», где были сохранены рабочие файлы на ПК. Выберите второй рабочий файл, нажмите "открыть", затем снова откроется диалоговое окно с указанием «места» где были сохранены рабочие файлы на ПК теперь выберете первый рабочий файл и нажмите "открыть".
- На рисунке 3.5 изображен результат двух измерений зависимости угловых ускорений от частоты вращения ротора асинхронного электрического двигателя А71В2 в однофазном режиме с эталонным диском и без него.
- На вкладке "Определение момента инерции двигателя" будут выведены средние измеренные значения по заданным отсчетам. Внизу вкладки также будут выведены значения параметров, определенные из всего массива измерений.

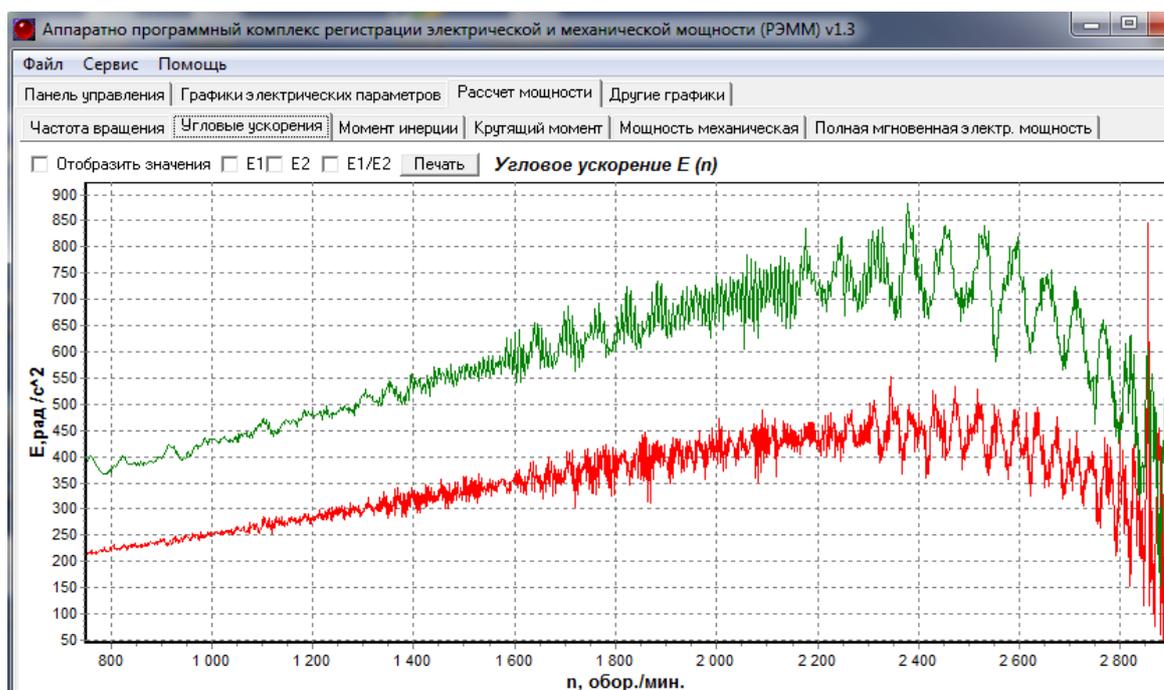


Рисунок 3.5 - Терминальная программа АПК с результатом двух измерений зависимости угловых ускорений от частоты вращения ротора асинхронного электрического двигателя А71В2 в однофазном режиме с эталонным диском и без него.

На рисунке 3.6 изображен результат измерений зависимости от угловой скорости приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя А71В2 с учетом потерь в однофазном режиме.

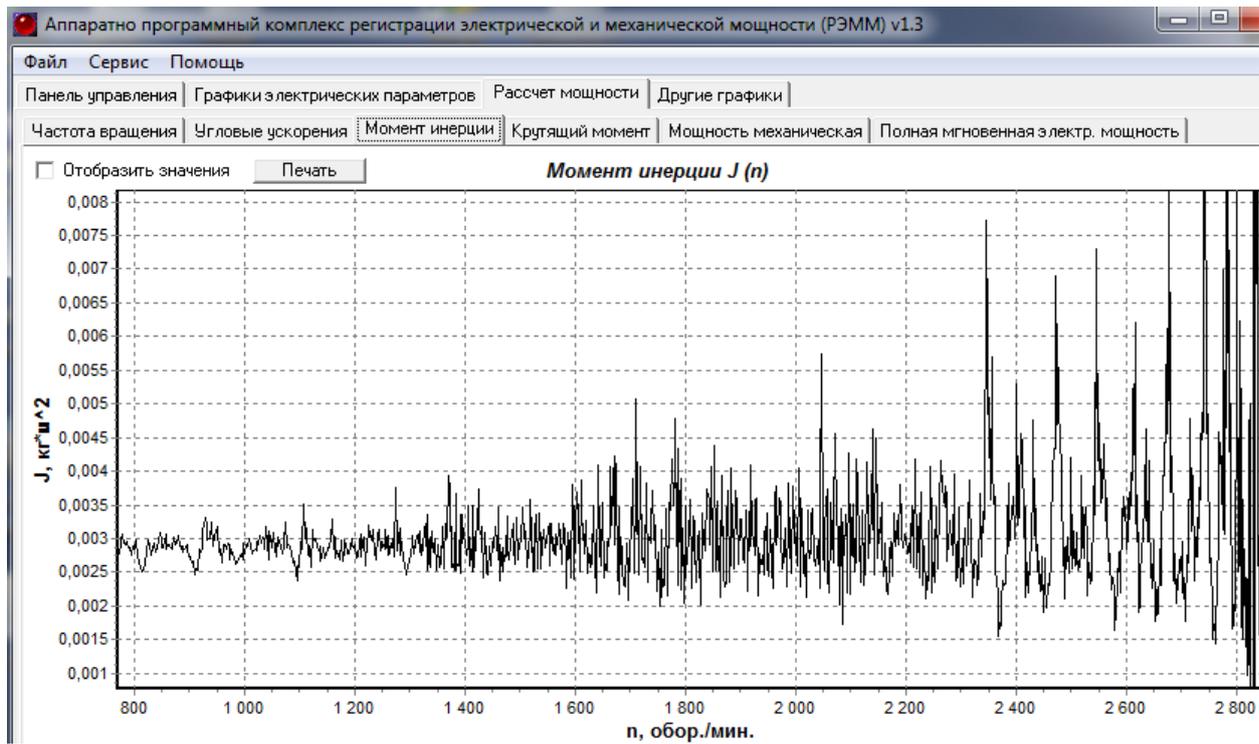


Рисунок 3.6 - Результат измерений зависимости от угловой скорости приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя А71В2, с учетом потерь, в однофазном режиме.

На вкладке "Графики зависимостей" программы вы можете визуально просмотреть и распечатать необходимые вам графики. При установке галочки в поле "отобразить значения" на график будут выведены все измеренные значения в точках. Запишите данные полученного сигнала используя интерфейс программы на ПК.

На рисунке 3.7 изображен результат измерений зависимости от угловой скорости вращающегося момента асинхронного электрического двигателя А71В2 в однофазном режиме.

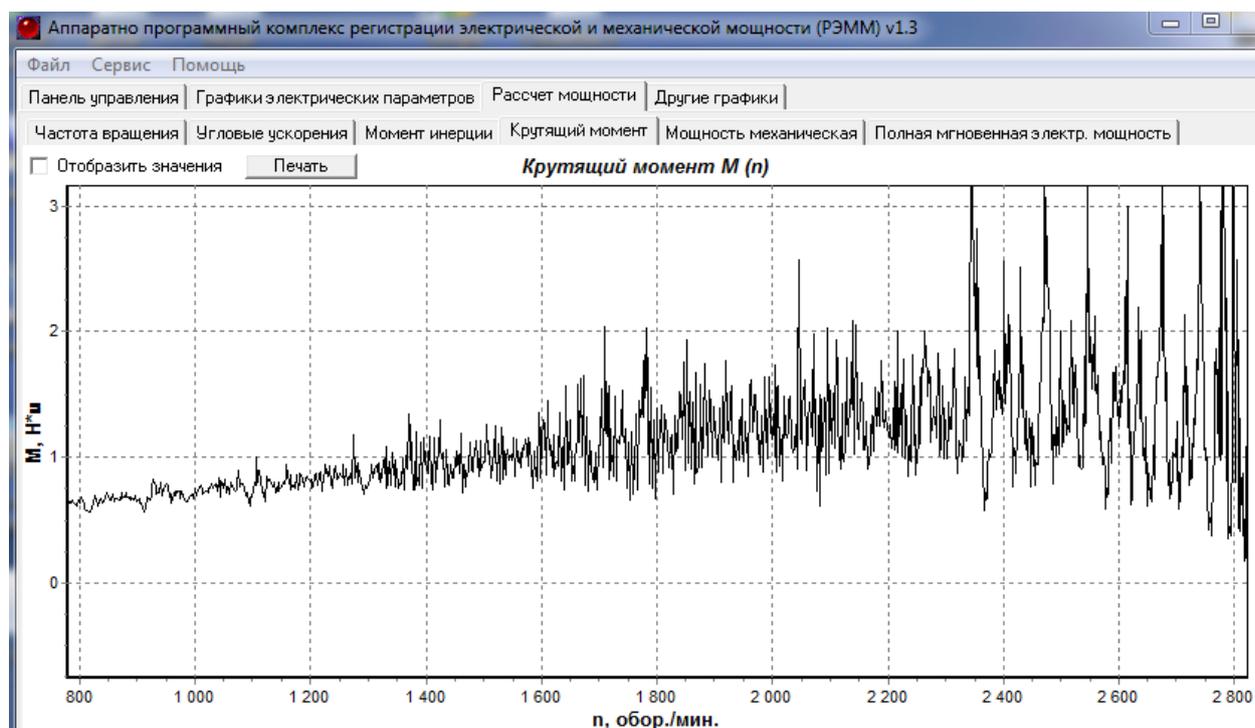


Рисунок 3.7 - Результат измерений зависимости от угловой скорости вращающего момента асинхронного электрического двигателя А71В2, работающего в однофазном режиме.

Во вкладках «Графики электрических параметров» можно проверить данные сети, идентичны они или нет, а во вкладке «Расчет мощности» можно ознакомиться с мощностью на валу и на входе электрического двигателя.

На рисунке 3.8 представлен результат измерений зависимости от угловой скорости механической мощности на валу асинхронного электрического двигателя А71В2, работающего в однофазном режиме.

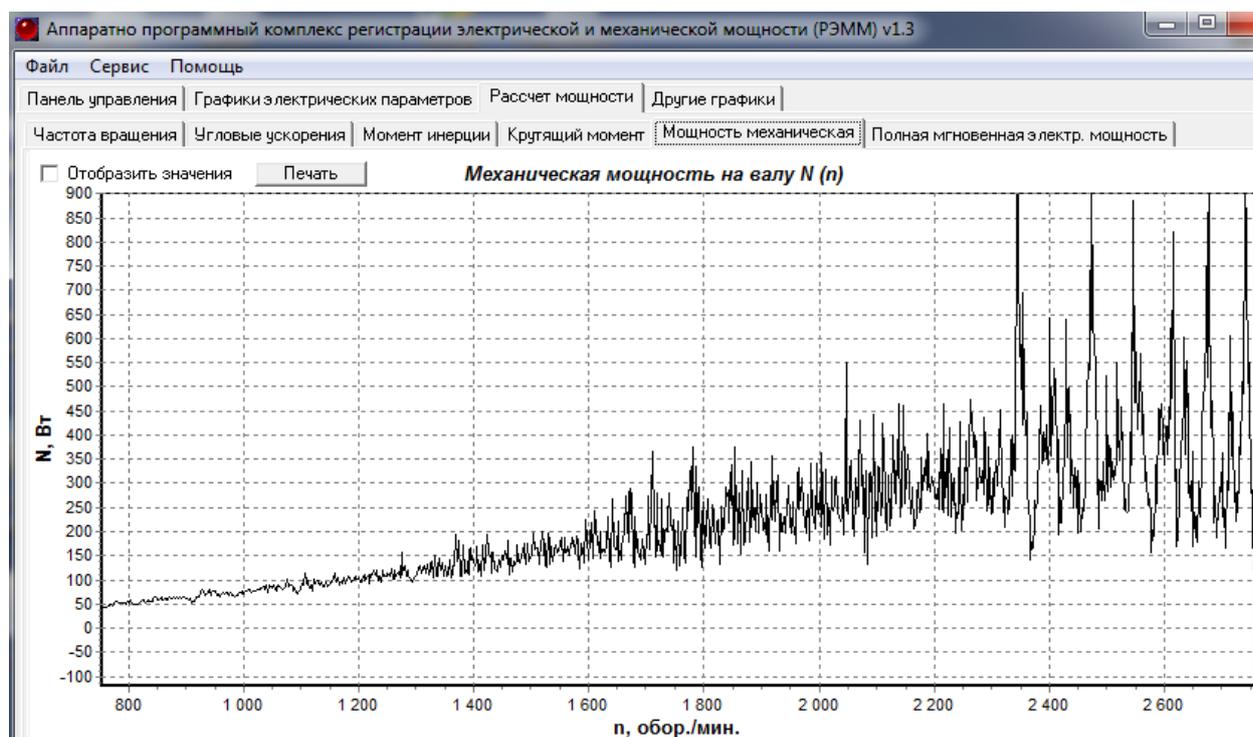


Рисунок 3.8 - Результат измерений зависимости от угловой скорости механической мощности на валу асинхронного электрического двигателя А71В2, работающего в однофазном режиме

На рисунке 3.9 представлена блок-схема программы испытаний, реализуемая разработанным АПК.

Для проверки точности вычислений добавляем «паразитный» момент инерции в систему вращающихся масс электрического двигателя. «Паразитный» момент инерции представляет собой диск с заранее рассчитанным или определенным моментом инерции. Затем проводится вся выше перечисленная процедура по определению момента инерции системы вращающихся масс «электрический двигатель + паразитный момент инерции». Вычитаем из полученного результата момент инерции электрического двигателя и сравниваем полученный результат с заранее рассчитанным моментом инерции «паразитного» момента инерции.

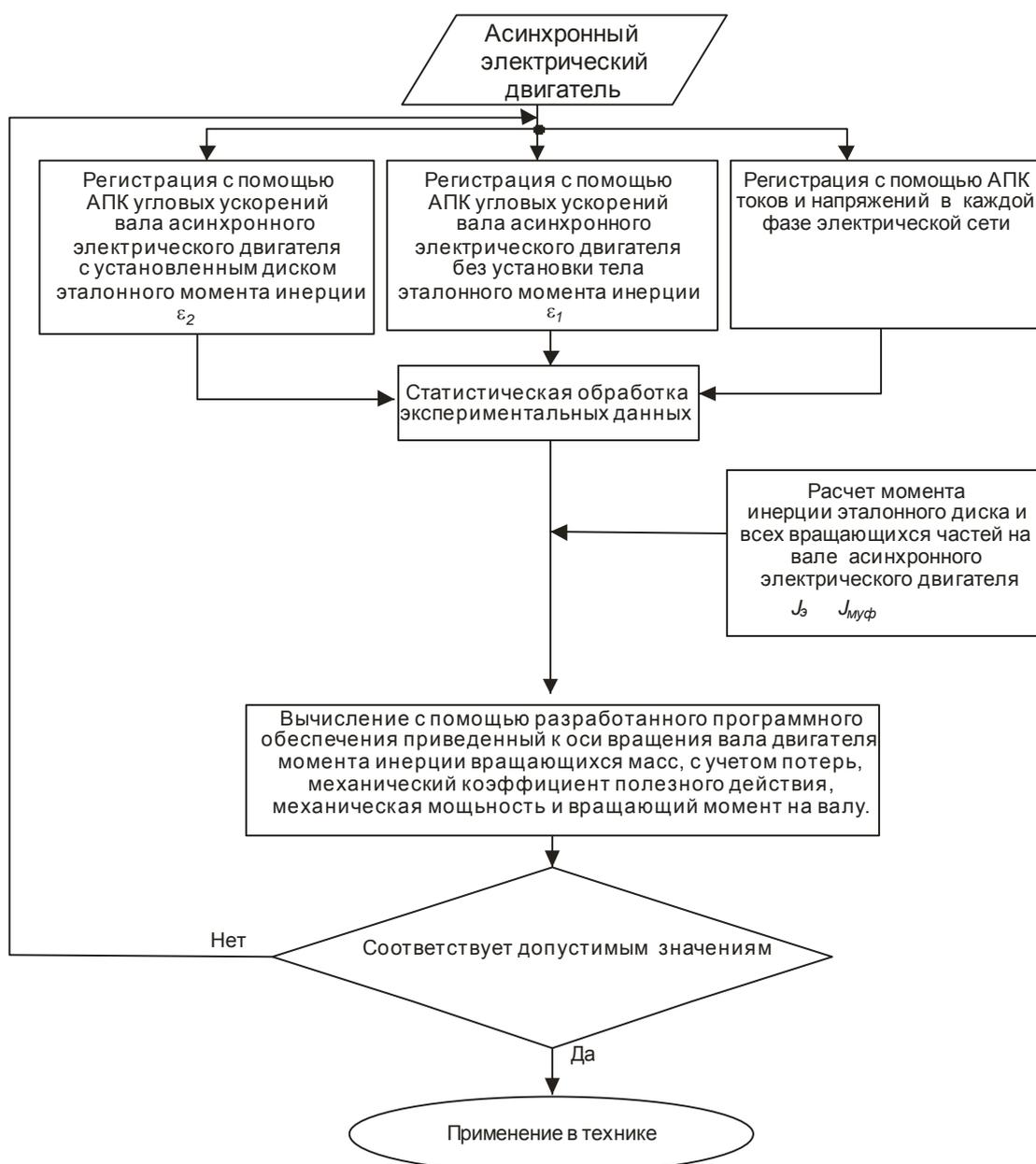


Рисунок 3.9 - Блок-схема 1. Динамический метод контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

Далее, если необходимо разложить потери по составляющим, определяем коэффициент, характеризующий механические потери k_1 . Для этого отключаем испытуемый двигатель от сети и соединяем с другим таким же идентичным двигателем². Соединение происходит на ровной, отшлифованной плите с помощью соединительных муфт. С помощью разработанного динамического метода определим через «двигатель 2» момент инерции испытуемого двигателя без учета добавочных потерь. Запустим «двигатель 2» и определим угловое

ускорение вала двигателя с помощью энкодера. Запустим второй раз «двигатель 2» жестко скрепленный с испытуемым двигателем, и еще раз определим угловое ускорения вала ротора с помощью энкодера. Приравниваем правые части выражения определяем коэффициент, характеризующий механические потери в асинхронном электрическом двигателе.

Зная общее значение приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя, с учетом всех потерь, расчетным путем определяем последнюю недостающую переменную – коэффициент, характеризующий добавочные потери (Рисунок 3.10).

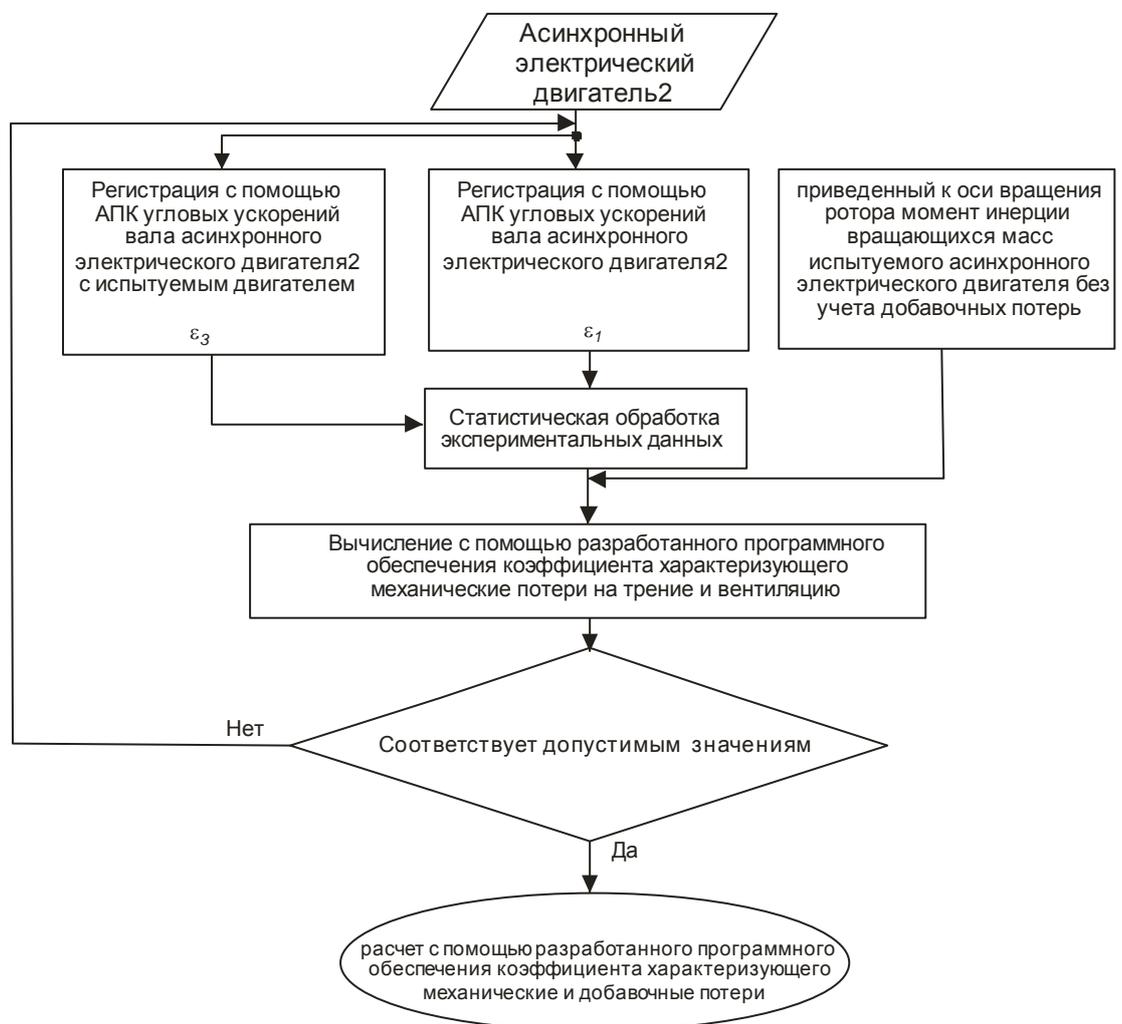


Рисунок 3.10 - Блок-схема 2. Динамический метод контроля механических и добавочных потерь в роторе асинхронных электрических двигателей.

Выводы по третьей главе: Разработано средство и методика динамического контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей, которые позволяют определять его механические параметры в широком диапазоне частот вращения без демонтажа двигателя.

ГЛАВА 4 СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗРАБОТАННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

4.1 Условия проведения эксперимента

Для реализации разработанного динамического метода необходимо провести как минимум два запуска асинхронного электрического двигателя. Главным условием при этих запусках является: повод одинакового количества энергии к вращающимся массам асинхронного электрического двигателя (идентичность вращающего момента). Для этого необходимо, чтобы соблюдалась следующее условие: сумма магнитных и электрических потерь в статоре электрического двигателя при обоих запусках должна быть одинакова $P_M = f\beta$ и $P_\Sigma = m \cdot U^2 / r$. Как видно из представленных зависимостей определения потерь, подвод напряжения в каждой фазе и частоты питающей сети должен быть одинаковыми, и необходимо поддержание на постоянном уровне сопротивления (температуры) обмоток статора.

Для обеспечения идентичности входных параметров по напряжению и частоте питающей сети подача электрической энергии к испытуемым электрическим двигателям в процессе экспериментов осуществлялся через стабилизатор напряжения LIDER PS 7500SQ-E (диапазон отклонения от номинальных значений напряжения - 0,5 %, частоты - 0,1 %). Перед каждым запуском контролировалось сопротивление обмоток статора испытуемых асинхронных электрических двигателей с помощью профессионального мультиметра АМ-1152 с допустимой абсолютной погрешностью 1,2 %.

Опыт первых экспериментальных запусков испытуемых асинхронных электрических двигателей в трехфазном режиме показал, что определение

приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс с учетом потерь является сложной задачей. Параметры питающей сети постоянно и очень стремительно меняются настолько, что даже самые быстродействующие стабилизаторы не успевали компенсировать отклонения от номинальных значений напряжения и частоты, возникал перекося фаз, вследствие чего постоянно образовывалась разная намагниченность обмоток ротора двигателя.

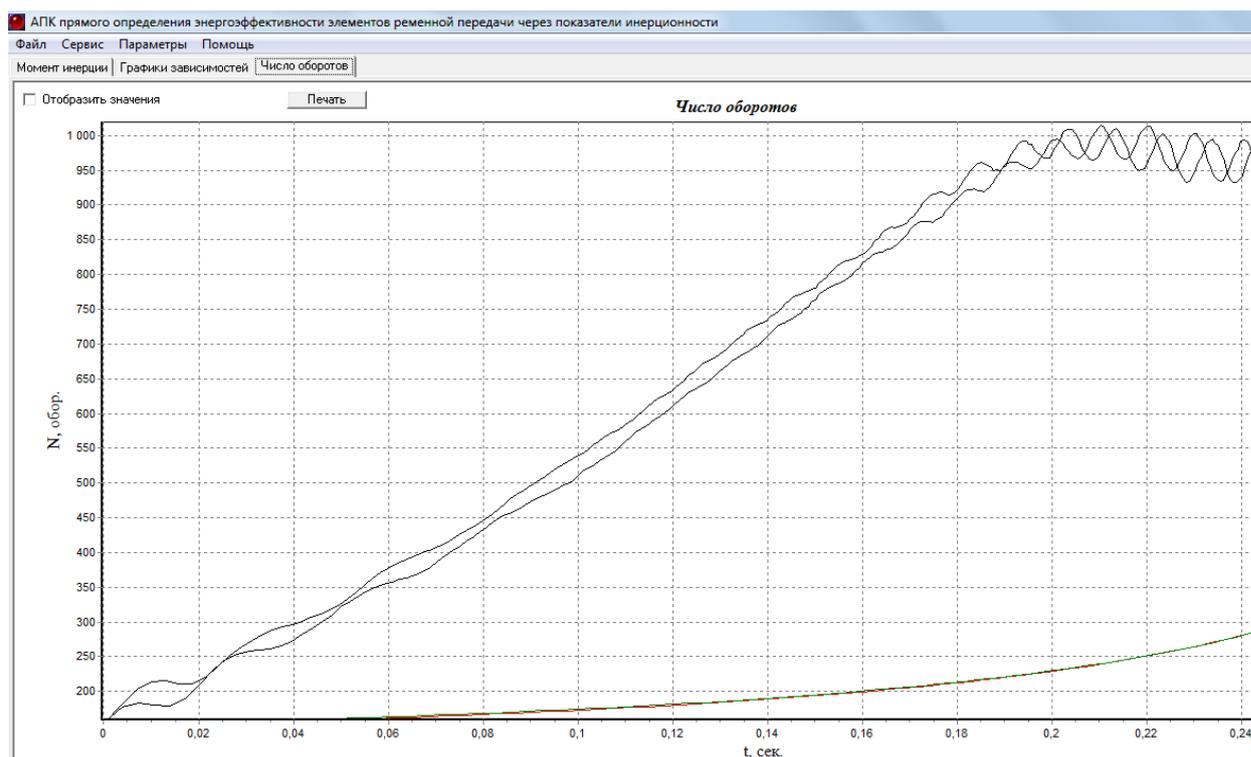


Рисунок 4.1 - Два запуска при идентичных условиях (нагрузках) двигателя А80А6 в трех фазном режиме.

По этим причинам в идентичных условиях при одинаковой нагрузке со стороны потребителя механической мощности на валу двигателя один и тот же испытуемый асинхронный электрический двигатель при запусках с разницей в несколько секунд демонстрировал различные кривые разгона (рисунке 4.1), то есть не создавались необходимые условия для реализации разработанного динамического метода.

Реализовать необходимые условия для разработанного метода позволил перевод трехфазного асинхронного электрического двигателя в однофазный режим работы. В однофазном режиме всего одна питающая фаза, что в три раза

сокращает отрицательное влияние сети и помогает избавиться от перекоса фаз. Развиваемый асинхронным электрическим двигателем в однофазном режиме вращающий момент меньше, чем в трехфазном, что является положительным фактором с точки зрения нагруженности двигателя инерционной массой, необходимой для реализации разработанного метода.

Контролю механических параметров подверглись три типа асинхронных электрических двигателя производства ОАО «Элдин» (Таблица 4.1), поскольку с этой компанией был заключен договор на апробацию разработанного метода:

Таблица 4.1 - Паспортные данные асинхронных электрических двигателей

Тип	Мощность, кВт	Частота Вращения, Об/мин	КПД при нагрузке %			Коэффициент мощности при нагрузке, $\cos \phi$		Ток, А при 380 В	Момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$
			100	75	50	100	75		
A71B2	1,1	2820	79,6	79,6	77,5	0,86	0,78	2,4	0,0008
A71A4	0,55	1410	71,0	71,0	68,1	0,78	0,65	1,5	0,0010
A80A6	0,75	930	71,0	71,6	68,3	0,70	0,61	2,3	0,0035

Воспользуемся схемой перевода двигателей в однофазный режим работы, которая не меняет схему соединения обмоток, представленной на рисунке 4.2.

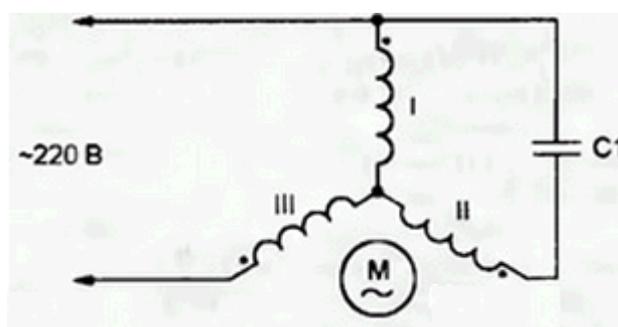


Рисунок 4.2 - Схема перевода трехфазного двигателя в однофазный режим работы: где C_1 - рабочий конденсатор, I, II, III – обмотки двигателя.

Необходимая емкость рабочих конденсаторов для работы трехфазного двигателя в однофазной сети определяется по зависимости:

$$C_p = 66 \cdot P_{ном} \quad (4.1)$$

Таблица 4.2 - Значения емкости рабочих конденсаторов для разных типов двигателей.

Тип	Мощность, кВт	Емкость рабочих конденсаторов, <i>мкФ</i>
A71B2	1,1	72,6≈75
A71A4	0,55	36,3≈40
A80A6	0,75	49,5≈50

В идентичных условиях при одинаковой нагрузке со стороны потребителя механической мощности на валу один и тот же двигатель при запусках с разницей в несколько секунд демонстрировал идентичность процессов разгона. Графики разгона представлены на рисунке 4.3.

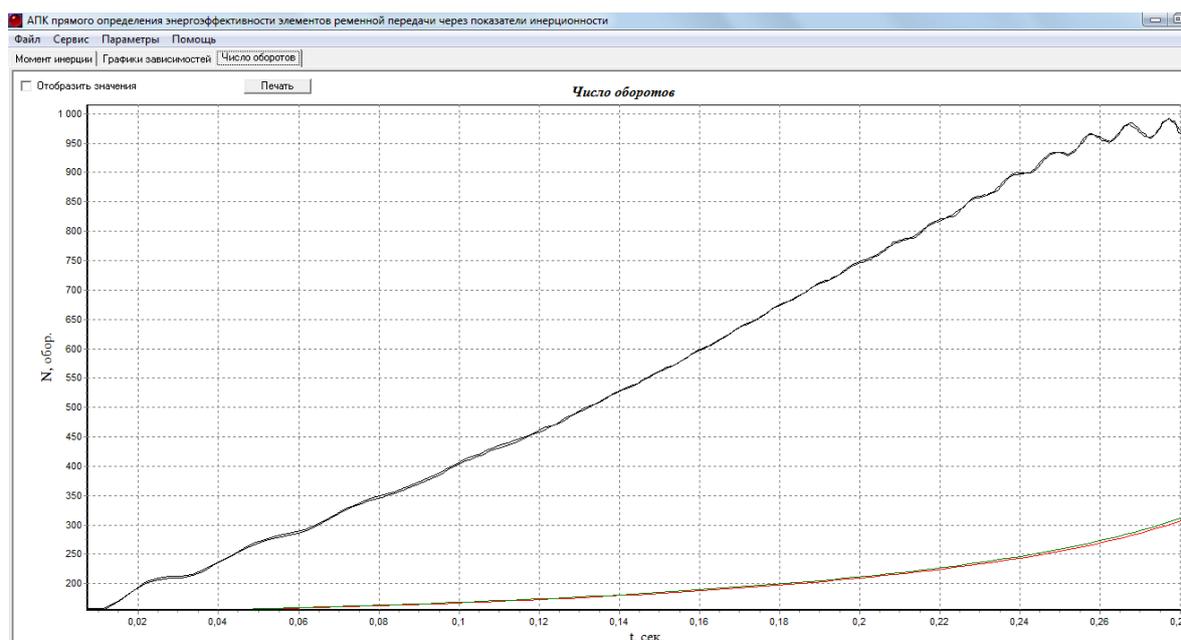


Рисунок 4.3 - Два запуска при идентичных условиях двигателя A80A6 в однофазном режиме.

Таким образом, при отсутствии эталонного источника электрической энергии перевод питания с трехфазного на однофазный режим работы является необходимым условием для реализации метода контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь. Дальнейший контроль механических параметров осуществляется с использованием массива значений приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс с учетом потерь, при подаче электрической энергии от однофазного или трехфазного источника питания, в зависимости от условий эксплуатации асинхронных электрических двигателей.

4.2 Анализ точности измерений

В рамках разработанного метода основным контролируемым параметром является приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь.

Угловые ускорения определяются с помощью инкрементального энкодера компании Autonics, который выдает 5000 импульсов за оборот. Принцип работы оптического энкодера основан на пересечении луча оптопары (светодиоды и фототранзисторы) с размеченным диском, установленным на валу (рисунок 4.4). В зависимости от частоты разметки диска определяется разрешающая способность датчика и, как следствие, точность измерения угла поворота. Существует несколько разновидностей энкодеров, наибольшее применение нашел инкрементальный (импульсный) энкодер, где происходит последовательный счет меток перемещения и абсолютный, когда для каждого положения вала существует индивидуальный бинарный код. Инкрементальный энкодер предназначен для формирования импульсов, которые считываются вторичным устройством, позволяющим определить направление движения или углового смещения наблюдаемого механизма. Обычно инкрементальные энкодеры производятся с

тремя импульсными выходами. Два из которых определяют скорость и направление движения.

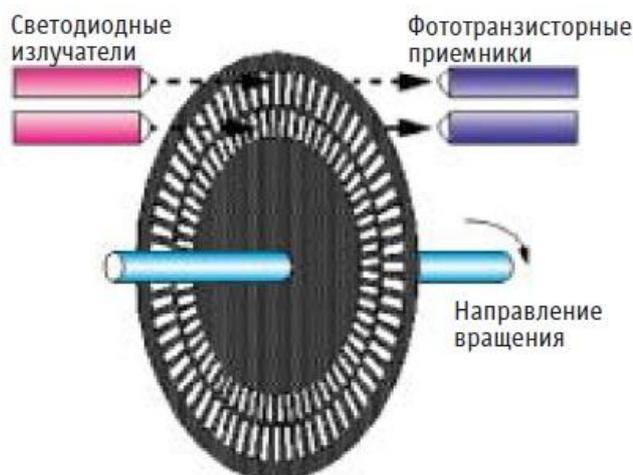


Рисунок 4.4 - Принцип работы оптического энкодера инкрементального типа.

Последовательности импульсов этих выходов сдвинуты друг относительно друга на $1/4$ периода, что реализовано сдвигом оптического диска и расположением оптических пар «излучатель-приемник». Третья последовательность импульсов служит для определения позиции. Этот канал формирует импульс нулевой отметки на один оборот, что позволяет корректировать ошибки в пределах каждого оборота. Подсчетом импульсов за один оборот от нулевой точки можно определять текущее абсолютное положение вращаемого вала. Для нанесения меток на диск используется лазер со специальным алгоритмом калибровки, что позволяет наносить метки с точностью до $0,1$ мкм. В производстве энкодеров южнокорейской компании Autonics используется специальный материал диска DREXON, который устойчив к воздействию воды и сухого пара, а его полимерная основа является гарантом долговечности диска энкодера. Его исключительным оптическим качеством является прозрачность, которая не зависит от времени эксплуатации и мало чувствительна к окружающим условиям [1,16,47,66,91].

Как следует из устройства энкодера, определяемой величиной является время прохождения от одной метки до другой. В АПК используется процессор с

16 МГц частотой, который постоянно опрашивает 7 датчиков. То есть АПК с частотой 2285714 Гц запрашивает положение энкодера. Наш энкодер выдает 5000 импульсов за один оборот. Время прохождения от одной метки до другой отличается и зависит от угловой скорости вращения ротора двигателя. Асинхронный электрический двигатель промышленного исполнения, подключенный к промышленной электрической сети номинальным напряжением 380 В способен развить в асинхронном режиме работы угловую скорость не превышающую 3000 об/мин – 50 об/с (50 Гц). То есть за одну секунду при таких условиях мы получим 250 000 импульсов. Разделим частоту опроса энкодера АПК на количество импульсов $2285714/250000 = 9,14$. Таким образом 9,14 импульса процессора приходится на прохождение одной метки энкодера при угловой скорости ротора электрического двигателя, равной 3000 об/мин.

Угол между соседними метками энкодера, выдающего 5000 импульсов на один оборот (360°), составляет 0,072 градуса. А на один импульс АПК приходится 0,001125 градуса. Согласно паспортным данным радиус нанесения меток на оптический диск энкодера составляет 0,015 м. Длина окружности оптического диска, на которой нанесены метки энкодера составляет 0,094 м. Линейное расстояние между соседними метками составляет 18,8 мкм.

Согласно паспортным данным точность нанесения одной метки 0,1 мкм. Так как при прохождении от одной метки до другой при угловой скорости 3000 об/мин, процессор АПК посылает на энкодер 9,14 импульса, то погрешность изготовления меток оптического диска, выраженная в импульсах процессора АПК, составляет 0,097 импульса.

Таким образом, точность определения времени поворота оптического диска между двумя соседними метками при угловой скорости ротора электрического двигателя 3000 об/мин будет стремиться к 100 %.

Момент инерции диска:

$$J_{\text{э}} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot h}{2} \cdot (R^4 - r^4), \quad (4.2)$$

где ρ, V, R, r, m - плотность, объем, внешний и внутренний радиус, масса диска соответственно.

Определим относительную погрешность результата косвенных измерений \mathcal{E}_{J_3} , функция $J_3(h, R, r)$ является переменной трех значений h, R, r [8,18,75,81,63].

$$\mathcal{E}_{J_3} = \mathcal{E}_h + \mathcal{E}_{(R^4 - r^4)} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta R^4 + \Delta r^4}{R^4 - r^4}. \quad (4.3)$$

Абсолютная погрешность результата косвенных измерений ΔJ_3 равняется:

$$\begin{aligned} \Delta J_3 &= J_3 \cdot \mathcal{E}_{J_3} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot h}{2} \cdot (R^4 - r^4) \cdot \left(\frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta R^4 + \Delta r^4}{R^4 - r^4} \right) = \\ &= \frac{\rho \cdot \pi}{2} \cdot (\Delta h \cdot (R^4 + r^4) + h(\Delta R^4 + \Delta r^4)) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Диски изготавливаются на станках по 7-му качеству с погрешностью 0, 01 мм, поэтому $\Delta h = \Delta R = \Delta r = 10^{-5}$ м.

Погрешность определения полной электрической мощности $P_1 = m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1$ (где m_1 - число фаз в обмотке двигателя, U_1 и I_1 - напряжение и токи в обмотках статора соответственно, φ_1 - сдвиг фаз между U_1 и I_1)

Приборная погрешность определения тока $\Delta_{uI} = 0.5\%$ (используются датчики тока Honeywell CSNB131 ± 1000 А), приборная погрешность определения напряжения $\Delta_{uU} = 0.5\%$, φ_1 определяется с помощью программного обеспечения и его приборная погрешность стремится к нулю.

Определим относительную погрешность результата косвенных измерений - \mathcal{E}_{P_1} , функция $P_1(I_1, U_1, \varphi)$ является переменной трех значений.

$$\varepsilon_{P_1} = \frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{\Delta U_1}{U_1}. \quad (4.5)$$

Абсолютная погрешность результата косвенных измерений ΔP_1 равняется:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= P_1 \cdot \varepsilon_{P_1} = m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \left(\frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{\Delta U_1}{U_1} \right) = \\ &= m_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \Delta I_1 + m_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \Delta U_1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.3 Определение момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей методом крутильных колебаний

Определим моменты инерций вращающихся масс асинхронного электрического двигателя без учета потерь методом крутильных колебаний по ГОСТ 11828-86.

Подвесим вращающиеся массы асинхронного электрического двигателя на металлической струне диаметром 1 мм, и длиной 0,88 м (подбирали таким образом, что бы количество колебаний при угле 20 градусов было больше, чем необходимо). На горизонтальную проекцию центра крепления струны к валу электрического двигателя установим центр транспортира, а на вал установим стрелку, для определения угла отклонения вала от нулевого положения. Вал электрического двигателя крепится к струне с помощью двух зажимных болтов, которые установлены по бокам вала на встречу друг другу и зажимают струну в центре вала. Для более точного определения периода крутильных колебаний процесс колебания запечатлен на видео камеру.

Затем демонтируем со струны вращающиеся массы электрического двигателя и крепим диск эталонного момента инерции, равным $j_э = 0,006781 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. В центр диска устанавливается болт, в котором также

просверлено отверстие и установлены два зажимных болта, таким же образом, как и на валу асинхронного электрического двигателя.

Количество колебаний при угле отклонения 20 градусов, каждого испытуемого тела было около 100, чтобы выбрать нужное количество выборок, их следует определять статистическим путем, исходя из величины характерного для данного метода испытаний коэффициента вариации $V_{вар}$ и требуемой степени точности результата $V_{доп}$.

$$V_{вар} = \frac{\delta_{\bar{x}}}{\bar{x}}, \quad (4.7)$$

где $\delta_{\bar{x}}$ – среднее квадратичное отклонение; \bar{x} – средняя арифметическая ряда измерений.

Среднее квадратичное отклонение определяется выражением:

$$\delta_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4.8)$$

где x_i – результат i -го измерения; n – число измерений

Для установления необходимого числа опытов, нужно задаться величиной допустимого отклонения $V_{доп}$ в процентах. Зная значение коэффициента вариации $V_{вар}$ для данного метода испытаний, можно определить с надежностью 0,99 (суммарно по верхнему и нижнему пределам) требуемое число опытов по величине соотношения:

$$\frac{V_{доп}}{V_{вар}}. \quad (4.9)$$

Для этого в ходе выполнения данной работы были проведены предварительно 10 выборок для каждого двигателя и эталонного тела при угле отклонения 20 градусов. Результаты экспериментов приведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 - Периоды колебаний испытуемых тел методом крутильных колебаний при угле отклонения 20 градусов

№ опыта	Период колебания при угле отклонения 20 градусов, с			
	T_{A71B2}	T_{A71A4}	T_{A80A6}	T_3
1	0,99	2,98	5,18	7,01
2	1	2,98	5,18	7,01
3	1	2,98	5,18	7,01
4	1	2,98	5,18	7,01
5	1	2,98	5,18	7,01
6	1	2,98	5,18	7,01
7	1	2,98	5,18	7,01
8	1	2,98	5,18	7,01
9	1	2,98	5,18	7,01
10	1,01	2,99	5,18	7,01
x	1	2,981	5,18	7,01
σ_x	0,004714	0,003162	0	0
$v_{вар}$	0,471405	0,106081	0	0
$v_{доп}/v_{вар}$	135,1281	600,484	-	-

На основании данных таблицы 4.3 в табличном процессоре «Microsoft Excel» были вычислены следующие величины:

- средняя арифметическая погрешность ряда измерений \bar{x} ;
- среднее квадратичное отклонение σ_x ;
- коэффициент вариации.

С целью получения надежности экспериментальных результатов, равной 0,95, в соответствии с рекомендациями следует задать величину допустимого отклонения $v_{доп}=63,7\%$. Подставляя значения $v_{вар}$ и $v_{доп}$ в формулу (4,9), получаем число опытов, равное 1.

Методом крутильных колебаний были получены следующие результаты при угле отклонения 20 градусов период крутильных колебаний вращающихся масс электрических двигателей ($J_{рот} + J_{вент}$) составил $T_{A71B2} = 1$ с., $T_{A71A4} = 2,98$

с, $T_{A80A6} = 5,18$ с. Для диска эталонного момента инерции $J_{\text{э}} = 0,006781$ кг·м² при угле отклонения 20 градусов период крутильных колебаний составил $T_{\text{э}} = 7,01$ с.

$$J = J_{\text{э}} \left(\frac{T}{T_{\text{э}}} \right)^2. \quad (4.10)$$

Вычисляя по формуле (4.10) получаем, что момент инерции вращающихся масс двигателя равны: $(J_{\text{рот}} + J_{\text{вен}})_{A71B2} = 0,000134$ кг·м²,

$$(J_{\text{рот}} + J_{\text{вен}})_{A71A4} = 0,00122 \text{ кг·м}^2, \quad (J_{\text{рот}} + J_{\text{вен}})_{A80A6} = 0,00370 \text{ кг·м}^2$$

Добавим к этим значениям моменты инерции шариков подшипника:

В наших двигателях используются два вида подшипников в А71 - 6204 и в А80 - 6205, в каждом по 9 шариков. Разберем по одному подшипнику для эксперимента. Первый - 6205, диаметр шариков в нем 8 мм, каждый массой 1,89 гр., внешний диаметр кольца составляет 33 мм, внутренний - 25 мм, ширина 15 мм, масса 38 гр. Рассчитаем момент инерции подшипника по формуле (2.18).

$$J_{\text{под}} = J_{\text{вк}} + J_{\text{тк}} = J_{\text{вк}} + \frac{7}{80} m_{\text{тк}} D^2 n = 0,0000023$$

По этим данным ясно видно, что приведенный к оси вращения момент инерции шариков подшипника очень мал и его можно не учитывать $J_{\text{под}} = 0,0000023$ кг·м². Разберем подшипник 6204, пересчет шариков производить не будем, так как их приведенный к оси вращения момент инерции мал, внешний диаметр кольца подшипника составляет 28 мм, внутренний подшипника составляет 20 мм, ширина подшипника 14 мм, масса - 37 гр. Рассчитаем момент инерции подшипника по зависимости (2.18) $J_{\text{под}} = 0,0000018$ кг·м².

Добавим полученные приведенные к оси вращения ротора моменты инерции обоих опорных подшипников (в двигателе 2-а подшипника), к

полученному ранее приведенному моменту инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей, результаты сведем в Таблицу 4.4:

Таблица 4.4 - Приведенный к оси вращения момент инерции вращающихся масс для выбранных двигателей

Приведенный к оси вращения момент инерции $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	Тип двигателя		
	A71B2	A71A4	A80A6
$(J_{\text{рот}} + J_{\text{вен}})$	0,000134	0,00122	0,00370
$J_{\text{в.м.д.}} = (J_{\text{рот}} + J_{\text{вен}} + J_{\text{под}})$	0,000138	0,00123	0,00371

4.4 Определение приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя динамическим методом, с учетом потерь.

Определим среднее значение приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь по описанной выше методике. Среднее ускорение будем рассчитывать в диапазоне угловых скоростей ротора от нуля до номинального значения (Таблица 4.5).

Таблица 4.5 - Номинальная частота вращения для каждого двигателя

Предельный параметр движения	Тип двигателя		
	A71B2	A71A4	A80A6
<i>об/мин</i>	2820	1410	930
<i>об/сек</i>	47,5	23,5	15,5
<i>Рад/с</i>	295,31	147,65	97,39

Поскольку при испытании одного двигателя одинаковая конечная угловая скорость остается неизменной, то для определения приведенного к оси вращения

ротора момента инерции вращающихся масс двигателя с учетом потерь можем использовать время разгона от нуля до номинальной частоты вращения при разной инерционной нагрузке (зависимость 2.8):

$$k_{nom} \cdot J_{в.м.д} = J_{\varepsilon} \cdot \frac{t_1}{t_2 - t_1} - J_{муф},$$

где t_1 и t_2 - время разгона от нуля до номинальной угловой скорости при первом и втором запуске соответственно.

Таблица 4.6 - Определение приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь

Величина	Тип двигателя		
	A71B2	A71A4	A80A6
J_{ε} , кг·м ²	0,0020479901	0,0020479901	0,003558
$J_{муф}$, кг·м ²	0,0010134381	0,0010134381	0,0011334512
$t_2, (J_{\varepsilon} + k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + J_{муф})$ с	0,7866	0,4974	0,2341
$t_1, (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + J_{муф})$ с	0,3777	0,2594	0,1374
$k_{nom} \cdot J_{в.м.д}$, кг·м ²	0,0008782	0,0012187	0,0039200

где $J_{муф}$ – приведенный к оси вращения ротора момент инерции полумуфты;

$t_2, (J_{\varepsilon} + k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + J_{муф})$ – время разгона системы вращающихся масс «асинхронный электрический двигатель + полумуфта + эталонный диск» от нуля до номинальной угловой скорости ротора;

$t_1, (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + J_{муф})$ - время разгона системы вращающихся масс «асинхронный электрический двигатель + полумуфта» от нуля до номинальной угловой скорости ротора.

Результаты определения приведенного к оси вращения момента инерции вращающихся масс асинхронного электрических двигателей с учетом потерь

$$k_{nom} \cdot J_{в.м.д}: \quad J_{A71B2} = 0,00087817 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad J_{A71A4} = 0,00131835 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \\ J_{A80A6} = 0,00391999 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Теперь определим добавочные потери $k_2 \cdot J_{в.м.д}$. Для этого соединяем, как показано выше (рисунок 2.4), два одинаковых двигателя. Биение валов друг относительно друга составляет 0,01 мм, таких показателей удастся добиться при изготовлении рамы (платформы) при помощи лазерной резки заготовки, отверстий под крепление двигателей и шлифовки платформы. Испытания проводим по описанной выше методике.

Как оказалось, $k_2 \cdot J_{в.м.д}$, как и $J_{под} + J_{вен}$ очень не существенны.

Таблица 4.7 - Значения потерь в двигателях

Значения	Тип двигателя		
	A71B2	A71A4	A80A6
$J_{муф}$, кг·м ²	0,001013438	0,001013438	0,001133451
$k_{nom} \cdot J_{в.м.д}$, кг·м ²	0,0008782	0,0012187	0,00392
$J_{рот} + J_{под} + J_{вен}$ кг·м ²	0,0008302	0,0011301	0,00361
$t_2 (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + k_{nom} \cdot J_{в.м.д} \cdot 2 + 2 \cdot J_{муф} - k_2 \cdot J_{в.м.д})$ с	0,7551	0,5185	0,2727
$t_1, (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} \cdot 2 + J_{муф})$ с	0,3777	0,2594	0,1374
$k_2 \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,00000104	0,00000225	0,00007501
$k_1 \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,00004696	0,00008635	0,00023499

где $t_2 (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} + k_{nom} \cdot J_{в.м.д} \cdot 2 + 2 \cdot J_{муф} - k_2 \cdot J_{в.м.д})$ – время разгоны системы вращающихся масс «асинхронный электрический двигатель+ асинхронный электрический двигатель2 +полумуфта + полумуфта» от нуля до номинальной угловой скорости;

$t_1, (k_{nom} \cdot J_{в.м.д} \cdot 2 + J_{муф})$ - время разгона системы вращающихся масс «асинхронный электрический двигатель2 +полумуфта» от нуля до номинальной угловой скорости;

Для наглядности разложим все потери по величине в суммарном приведенном к оси вращения ротора моменте инерции вращающихся масс, для

каждого из выбранных асинхронных электрических двигателей по отдельности.

Таблица 4.8 - Разложение зависимости $k_{пот} \cdot J_{в.м.д}$, двигателя А71В2 по составляющим от частоты вращения ротора в диапазоне от 750 до 900 об/мин

Значения А71В2	750	800	850	900
$k_{пот} \cdot J_{в.м.д}$, кг·м ²	0,0008782	0,0008782	0,0008782	0,0008782
$J_{рот} + J_{под} + J_{вен}$ кг·м ²	0,0008302	0,0008302	0,0008302	0,0008302
$k_2 \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,00000104	0,00000104	0,00000104	0,00000104
$k_1 \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,00004696	0,00004696	0,00004696	0,00004696

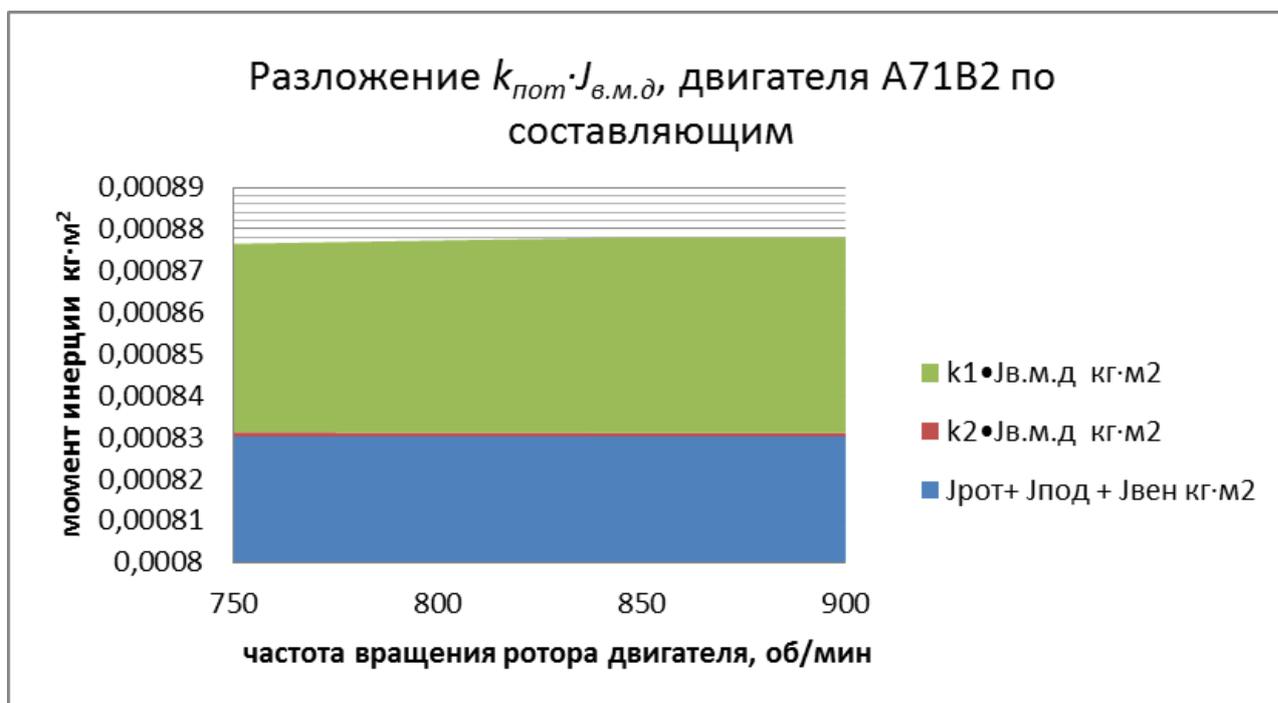


Рисунок 4.5 - Графики зависимости разложения $k_{пот} \cdot J_{в.м.д}$ двигателя А71В2 по составляющим от частоты вращения ротора в диапазоне от 750 до 900 об/мин.

Таблица 4.9 - Разложение зависимости $k_{пот} \cdot J_{в.м.д}$, двигателя А71А4 по составляющим от частоты вращения ротора в диапазоне от 750 до 900 об/мин.

Значения А71А4	750	800	850	900
$k_{пот} \cdot J_{в.м.д}$, кг·м ²	0,0012187	0,0012191	0,0012187	0,00121936
$J_{рот} + J_{под} + J_{вен}$ кг·м ²	0,0011301	0,0011301	0,0011301	0,0011301
$k_2 \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,00000205	0,00000255	0,00000225	0,00000245
$k_1 \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,00008655	0,00008645	0,00008635	0,00008681

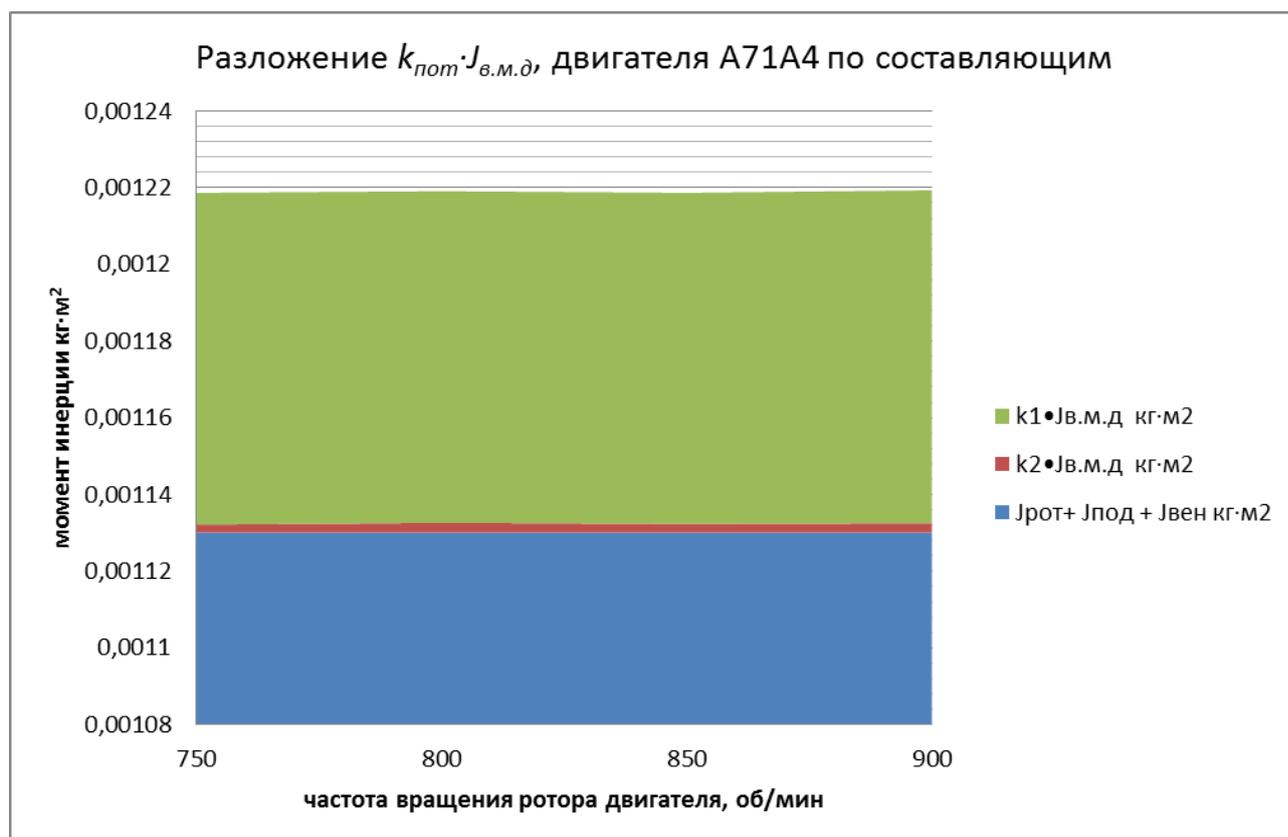


Рисунок 4.6 - Графики зависимости разложения $k_{пот} \cdot J_{в.м.д}$ двигателя А71А4 по составляющим от частоты вращения ротора в диапазоне от 750 до 900 об/мин.

Таблица 4.10 - Разложение зависимости $k_{ном} \cdot J_{в.м.д}$, двигателя А80А6 по составляющим от частоты вращения ротора в диапазоне от 750 до 900 об/мин.

Значения А80А6	750	800	850	900
$k_{ном} \cdot J_{в.м.д}$, кг·м ²	0,00392	0,00392018	0,00392007	0,00392052
$J_{рот} + J_{под} + J_{вен}$ кг·м ²	0,00361	0,00361	0,00361	0,00361
$k_2 \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,00007501	0,00007499	0,00007478	0,00007453
$k_1 \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,00023499	0,00023519	0,00023529	0,00023599

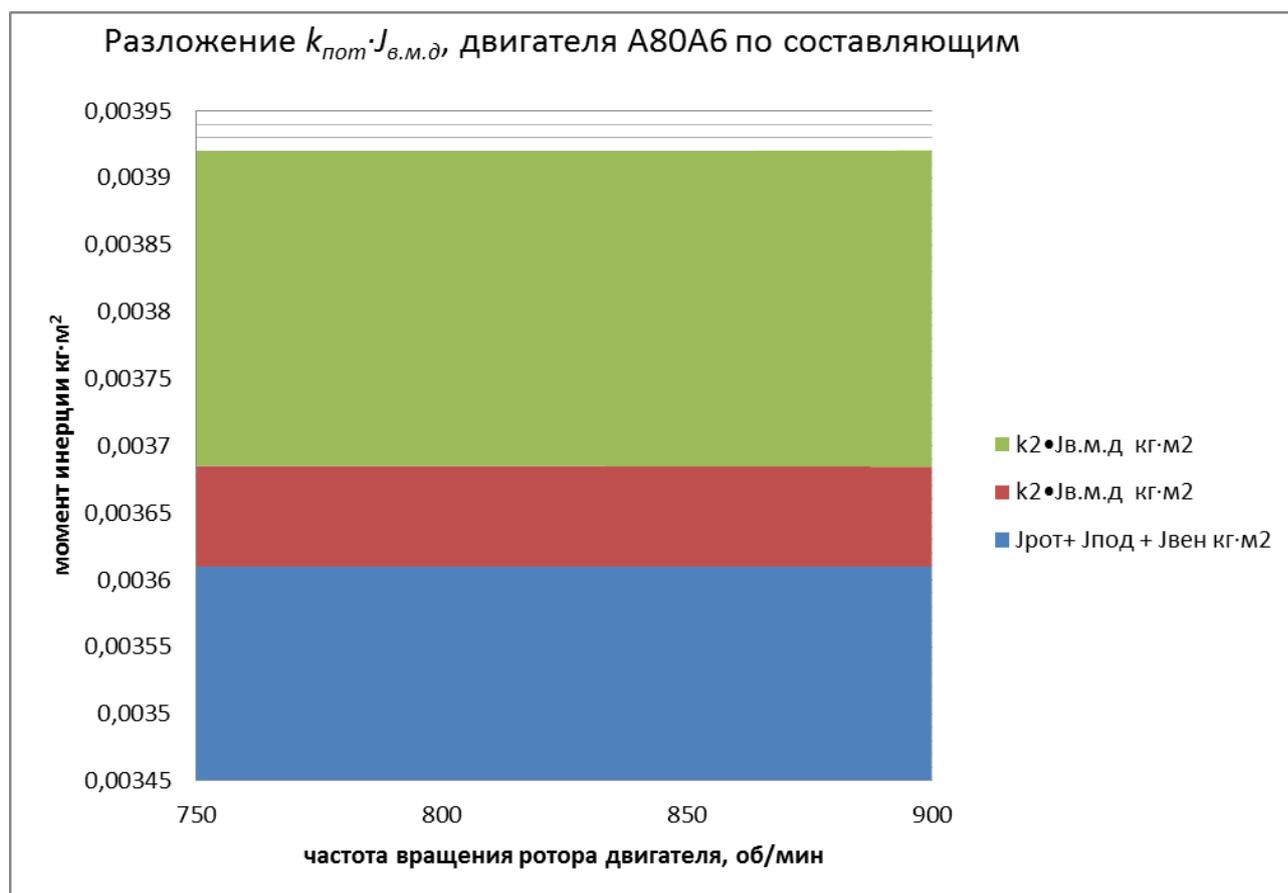


Рисунок 4.7 - Графики зависимости разложения $k_{ном} \cdot J_{в.м.д}$ двигателя А80А6 по составляющим от частоты вращения ротора в диапазоне от 750 до 900 об/мин.

Проверим АПК на достоверность полученных результатов. В систему вращающихся масс электрического двигателя добавлялся «паразитный» диск с эталонным моментом инерции $j_{н.д} = 0,002465$ кг·м², который крепился к полумуфте. Затем были проведены испытания описанным ранее методом. Из полученных средних значений приведенных к оси вращения ротора моментов

инерции систем вращающихся масс с учетом потерь «двигатель + паразитный диск» можно рассчитать среднее значение приведенного к оси вращения момента инерции «паразитного» диска и сравнить его с расчетным или экспериментальным (методом крутильных колебаний по ГОСТ 11828-86).

В таблице 4.11. приведены полученные средние значения приведенных к оси вращения ротора моментов инерции вращающихся масс с учетом потерь асинхронных электрических двигателей с паразитным диском.

Таблица 4.11 - Средние значения приведенных к оси вращения ротора двигателя момента инерции системы вращающихся масс «двигателя + паразитный диск»

Значения приведенных к оси вращения двигателя моментов инерций	Тип двигателя		
	A71B2	A71A4	A80A6
$J_{n.d.}$ кг·м ²	0,002465	0,002465	0,002465
$k_{ном} \cdot J_{в.м.д}$ кг·м ²	0,0008782	0,0012187	0,00392
$k_{ном} \cdot J_{в.м.д} + J_{n.d.}$ кг·м ²	0,0034157	0,003662	0,006341
Экспериментальное значение $J_{n.d.}$ кг·м ²	0,0025375	0,0024433	0,002421
Точность определения $J_{n.d.}$ %	0,970588235	0,991196755	0,982150101

Испытания на всех двигателях A71B2, A71A4, A80A6 показали, что общий приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся их вращающихся масс изменился на величину момента инерции включенного в систему «паразитного» диска, при этом погрешность измерения находится в пределах $\pm 3\%$, что говорит о высокой достоверности получаемых данных с помощью разработанного динамического метода и средства контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

Зная значения приведенных к оси вращения ротора моментов инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом механических потерь $(1+k_I) \cdot J_{в.м.д}$ и вращающихся масс двигателей

$(J_{рот} + J_{под} + J_{вент})$, можно определить механический КПД асинхронного электрического двигателя в соответствии с зависимостью (2.32). Результаты определения механического КПД приведены в Таблице 4.12

Таблица 4.12 - Механический КПД асинхронных электрических двигателей

Значения	Тип двигателя		
	A71B2	A71A4	A80A6
$(1+k_I) \cdot J_{в.м.д}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	0,0008782	0,0012187	0,00392
$J_{рот} + J_{под} + J_{вент} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	0,0008302	0,0011301	0,00361
$\eta_{мех}$	0,94	0,93	0,92

Из таблицы 4.12 видно, что механические КПД асинхронных электрических двигателей имеют высокие значения. Затраты энергии идут на потери при вентиляции и трение в подшипниках.

4.5 Определение вращающего момента асинхронного электрического двигателя динамическим методом и с помощью датчика вращающего момента

Для проверки достоверности результатов контроля вращающего момента, разработанным методом, проведем контроль вращающего момента с помощью датчика вращающего момента типа М40-10 (частота дискретизации 5 кГц) во время разгона асинхронного электрического двигателя А80А6, работающего в однофазном режиме. Подключаем датчик вращающего момента к асинхронному электрическому двигателю, как показано на рисунке 4.8.

Описание установки:

Электрический двигатель устанавливается на раму, куда крепятся опора датчика вращающего момента и опора подшипникового узла. Через муфты датчик скрепляется с валом ротора электрического двигателя. Датчик М40-10 вращающего момента цифрового типа, который предназначен для измерения

вращательного момента в широком диапазоне номинальных значений от 0,1Нм до 10Нм и допускает использование при частотах вращения до 20000 об/мин.

Конструктивно датчик выполнен в виде двух отдельных составных частей: ротора и статора, между которыми отсутствуют щеточные контакты и подшипники. Ротор имеет в своем составе упругий тензоэлемент, малочувствительный к воздействию изгибающего момента, поперечных и осевых сил. Расположенный на роторе датчика микропроцессорный электронный модуль преобразует сигналы тензорезисторов в цифровой код, который передается с ротора на статор по бесконтактному телеметрическому каналу связи. Цифровой кодированный сигнал имеет высокую помехозащищенность, обеспечивает высокую точность измерений, может быть передан на значительные расстояния без искажений и потерь информации.

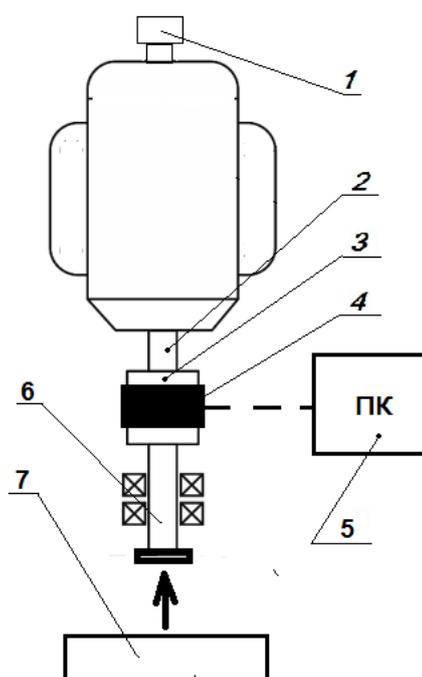


Рисунок 4.8 - Схема определения вращающего момента асинхронного электрического двигателя с помощью датчика вращающего момента М40-100: 1 – энкодер; 2- ведущий вал двигателя; 3 – предохранительная муфта; 4 – датчик вращающего момента М40-100; 5 – персональный компьютер с установленной программой обработки данных; 6 – ведомый вал с соединительной полумуфтой; 7 – эталонный диск.

Датчики М40-10 имеют цифровой (USB2.0, RS232/485 (протокол Modbus), аналоговый (5В, 10В, 4...20 мА), частотный (0,1...5 кГц) выходы, могут непосредственно подключаться к персональному компьютеру для мониторинга процесса измерений и сохранения данных.

Пределы основной допускаемой приведенной погрешности измерения номинального вращающего момента у датчика, включая нелинейность и гистерезис, не более 0,2 %.

Все данные с датчика попадают через цифровой декодер на ПК, где с помощью программы осуществляется мониторинг процесса измерений, запись и сохранение данных, позволяющие выполнять регулировку смещения «нуля», вычислять передаваемую датчиком механическую мощность, усреднение и фильтрацию измерительных сигналов одновременно с четырех датчиков.



Рисунок 4.9 - Внешний вид датчика вращающего момента М40-10.

Пользовательский интерфейс программы имеет цифровой индикатор текущих значений вращающего момента, частоты вращения и механической мощности, а также цифровой осциллоскоп для графического отображения измерительных сигналов в виде графиков функций времени с возможностью масштабирования по координатным осям [92,74,80].



Рисунок 4.10 - Интерфейс программного обеспечения датчика вращающего момента M40-10

Так как характеристика вращающего момента асинхронного электрического двигателя остается неизменной вне зависимости от величины инерционной нагрузки на валу, то для определения полезного момента необходимо построить механическую характеристику двигателя.

Определим механическую характеристику двигателя с помощью динамического метода. Для этого проведем запуски двигателя с разными инерционными массами. Определим моменты инерции вращающихся масс электропривода при разных инерционных нагрузках с помощью динамического метода, а также определим их угловые ускорения. На основании полученных данных определяем значения вращающихся моментов при разных инерционных нагрузках. Согласно теории электрических машин, их значения должны совпадать.

Одновременно с определением вращающихся моментов динамическим методом при разных инерционных нагрузках, снимаем показания с блока регистрации датчика вращающего момента и записываем в терминальной программе, установленной на компьютере 4.

Поскольку датчик вращающего момента, регистрирует вращающий момент в месте его установки, то в нашем случае определяем момент, равный разнице общего момента на валу привода и момента, который создает двигатель до датчика. Определим значение вращающего момента, измеряемого датчиком с помощью динамического метода по формуле (4.11):

$$M = M_{\text{привода}} - J_{\text{вчд}} \cdot \varepsilon \quad (4.11)$$

где $J_{\text{вчд}} = k_{\text{пот}} \cdot J_{\text{в.м.д.}} + J_{\text{муфта}}$ – момент инерции вращающихся масс системы до датчика вращающего момента «ротор асинхронного электрического двигателя, вентилятор двигателя, подшипниковые узлы двигателя, полумуфта» с учетом потерь в роторе; ε – угловое ускорение электропривода; $M_{\text{привода}}$ – вращающий момент однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6.

В таблице 4.13 приведены характеристики нагрузочных инерционных дисков, в том числе моментов инерции.

Таблица 4.13 - Физические характеристики инерционных дисков

Величина	Диск №1	Диск №2	Диск №3	Диск №4	Диск №5
R	0,054	0,07	0,08	0,09	0,1
h	0,035	0,035	0,04	0,04	0,04
□	7800	7800	7800	7800	7800
V	0,00032	0,00054	0,00080	0,00102	0,00125
m	2,501	4,202	6,273	7,939	9,801
J	0,003646	0,010296	0,020073	0,032154	0,049007

Определим механическую характеристику однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №1.

Таблица 4.14 - Данные для построения механической характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №1

Величина	Число оборотов, об/мин			
	400	600	800	900
$J_{вчд}$ кг·м ²	0,004620			
$J_{привода1}$, кг·м ²	0,010502			
ε_1 , рад/с ²	261,83	365,62	387,51	291,35
$J_{привода1} \cdot \varepsilon_1$, Н·м	2,75	3,84	4,07	3,06
$J_{вчд} \cdot \varepsilon_1$, Н·м	1,21	1,69	1,79	1,35
M_1 , Н·м	1,54	2,15	2,28	1,71
$M_{ДКМ1}$, Н·м	1,505	2,12	2,32	1,76
δ , %	2,5	1,4	1,7	2,6

где $J_{вчд}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс системы с учетом потерь, до датчика вращающего момента, «ротор асинхронного электрического двигателя, вентилятор двигателя, подшипниковые узлы двигателя, полумуфта»;

$J_{привода1} = k_{ном} \cdot J_{в.м.д.} + 3 \cdot J_{муф} + J_{дат.} + J_{вал} + J_{д1}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс электропривода «ротор асинхронного электрического двигателя, вентилятор двигателя, подшипниковые узлы двигателя и опоры, полумуфты 3 шт., датчик вращающего момента, вал от опоры до полумуфты крепления инерционного диска, инерционный диск №1»; $J_{дат}$ - приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс датчика вращающего момента; $J_{вал}$ - приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс вала от опоры до полумуфты крепления инерционного диска; $J_{д1}$ - приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс инерционного диска №1; ε_1 – угловое ускорение ротора электрического двигателя; M_1 – вращающий момент электропривода,

нагруженного инерционным диском №1; $M_{ДКМ1}$ – вращающий момент электропривода, определяемый датчиком вращающего момента М40 в месте установки на привод, который нагружен инерционным диском №1.

Для наглядности построим график вращающих моментов.

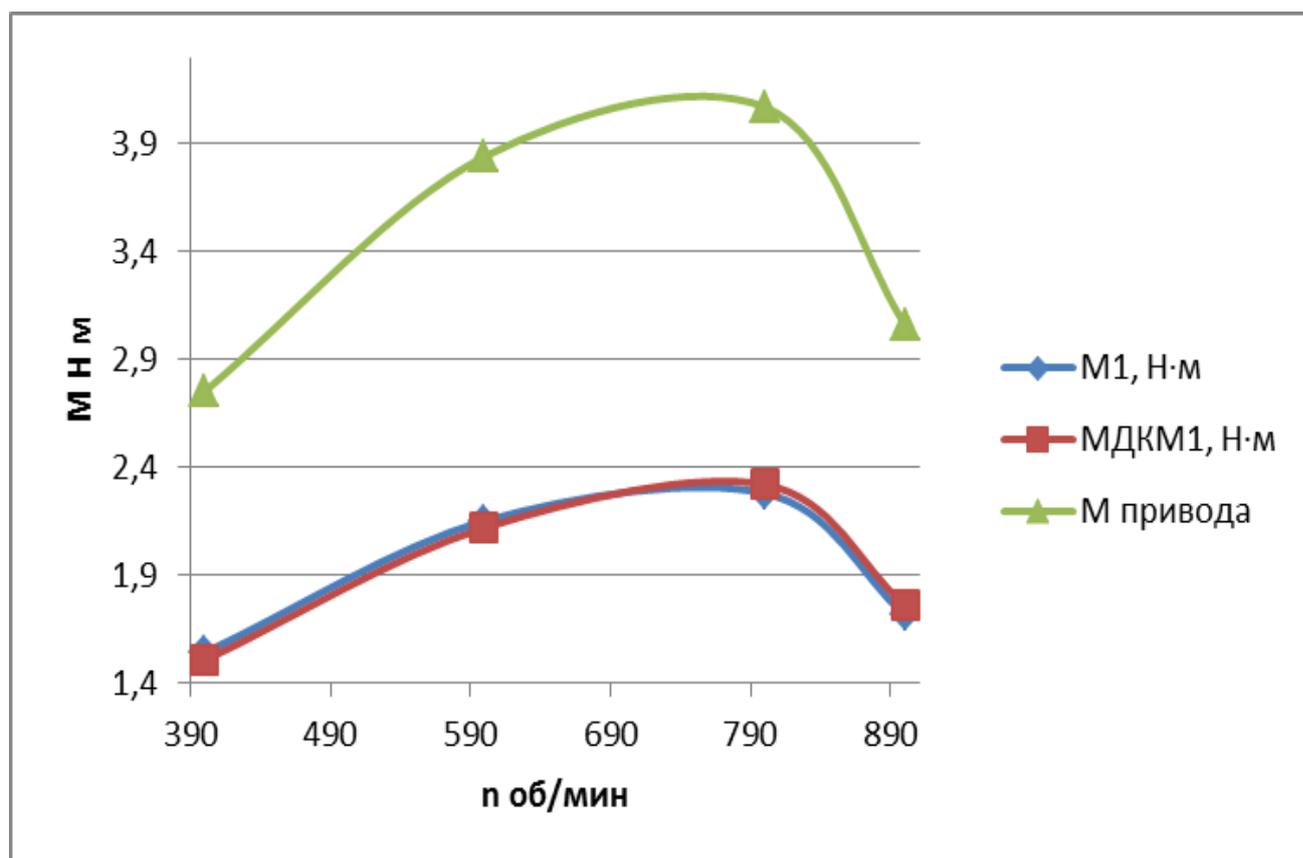


Рисунок 4.11 – Механические характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №1

Из таблицы 4.14 и рисунка 4.11 видно, что значения вращающего момента, полученные динамическим методом и с помощью датчика вращающего момента, отличаются с максимальной относительной погрешностью δ , равной 2,6 %, что говорит о высокой сходимости результатов измерений, полученных разными методами и возможности применения динамического метода для определения механических параметров асинхронных электрических двигателей.

Определим механическую характеристику однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №2.

Таблица 4.15 - Данные для построения механической характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №2

Величина	Число оборотов, об/мин			
	400	600	800	900
$J_{вчд}$ кг·м ²	0,004620			
$J_{привода2}$, кг·м ²	0,020798			
ε_2 , рад/с ²	132,22	184,62	195,68	147,12
$J_{привода2} \cdot \varepsilon_2$ Н·м	2,75	3,84	4,07	3,06
$J_{вчд} \cdot \varepsilon_2$ Н·м	0,61	0,85	0,90	0,68
M_2 , Н·м	2,14	2,99	3,16	2,38
$M_{ДКМ2}$, Н·м	2,09	2,95	3,17	2,42
δ , %	2,76	2,65	0,13	2,16

где $J_{привода2} = k_{пот} \cdot J_{в.м.д.} + 3 \cdot J_{муф} + J_{дат.} + J_{вал} + J_{д2}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс электропривода, «ротор асинхронного электрического двигателя, вентилятор двигателя, подшипниковые узлы двигателя и опоры, полумуфты 3 шт., датчик вращающего момента, вал от опоры до полумуфты крепления инерционного диска, инерционный диск №2»;

$J_{д1}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс инерционного диска №2;

ε_2 – угловое ускорение ротора электрического двигателя;

M_2 – вращающий момент электропривода нагруженного инерционным диском №2;

$M_{ДКМ2}$ – вращающий момент электропривода, определяемый датчиком вращающего момента М40 в месте установки на привод, который нагружен инерционным диском №2.

Для наглядности построим график вращающих моментов:

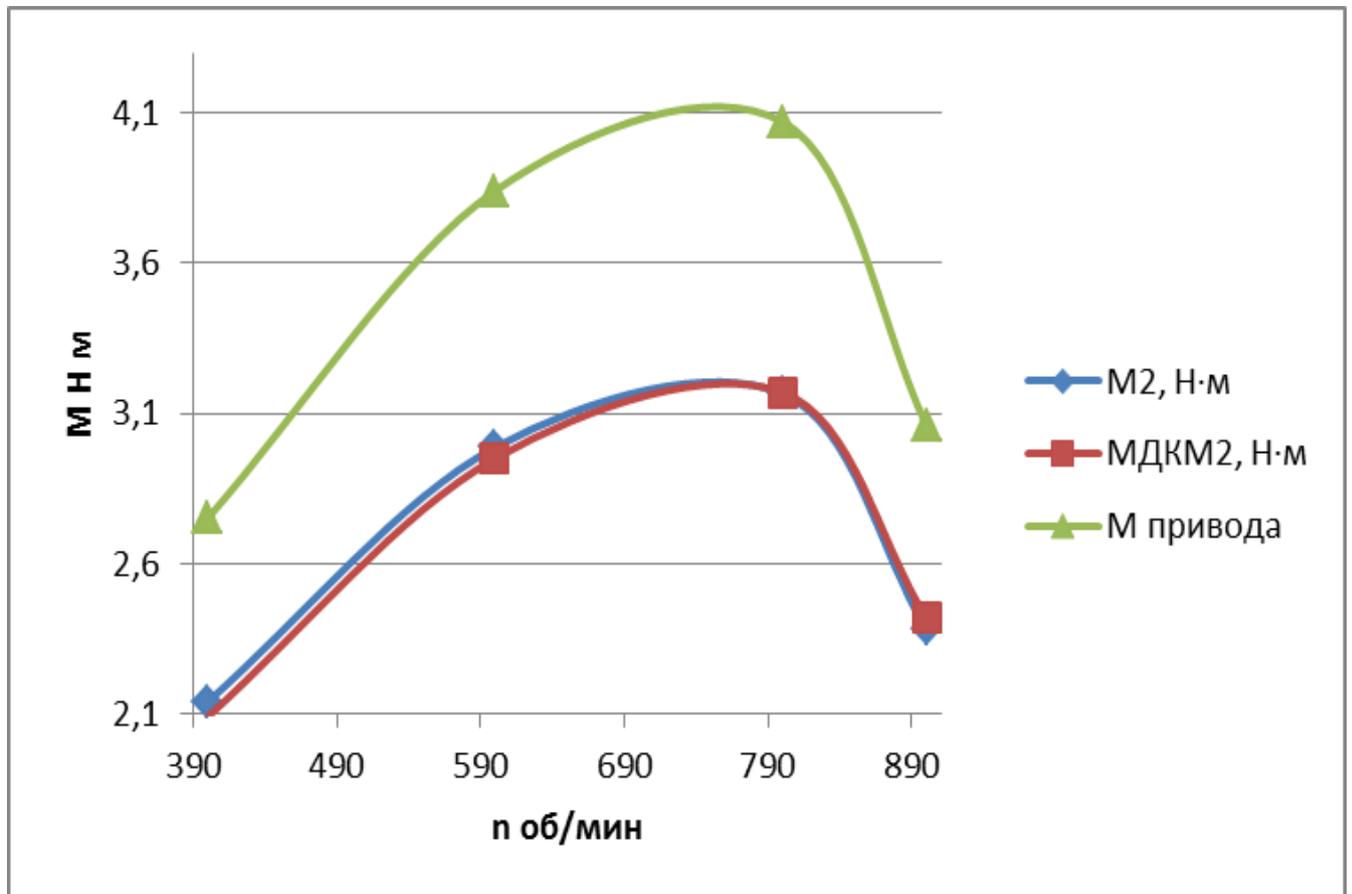


Рисунок 4.12 – Механические характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №2

Из таблицы 4.15 и рисунка 4.12 видно, что значения вращающего момента, полученные динамическим методом и с помощью датчика вращающего момента, отличаются с максимальной относительной погрешностью δ , равной 2,76 %, что говорит о высокой сходимости результатов измерений полученных разными методами.

Определим механическую характеристику однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №3.

Таблица 4.16 - Данные для построения механической характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №3

Величина	Число оборотов, об/мин			
	400	600	800	900
$J_{вчд}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,00462			
$J_{привода3}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,04087185			
$\varepsilon_3, \text{рад}/\text{с}^2$	66,54	92,73	100,07	73,64
$J_{привода3} \cdot \varepsilon_3, \text{Н}\cdot\text{м}$	2,72	3,79	4,09	3,01
$J_{вчд} \cdot \varepsilon_3, \text{Н}\cdot\text{м}$	0,31	0,43	0,46	0,34
$M_3, \text{Н}\cdot\text{м}$	2,41	3,36	3,63	2,67
$M_{ДКМ3}, \text{Н}\cdot\text{м}$	2,38	3,33	3,58	2,73
$\delta, \%$	-1,36	-0,95	-1,32	-0,74

где $J_{привода3} = k_{пот} \cdot J_{в.м.д.} + 3 \cdot J_{муф} + J_{дат.} + J_{вал} + J_{д3}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс электропривода, «ротор асинхронного электрического двигателя, вентилятор двигателя, подшипниковые узлы двигателя и опоры, полумуфты 3 шт., датчик вращающего момента, вал от опоры до полумуфты крепления инерционного диска, инерционный диск №3»;

$J_{д3}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс инерционного диска №3;

ε_3 – угловое ускорение ротора электрического двигателя;

M_3 – вращающий момент электропривода, нагруженного инерционным диском №3;

$M_{ДКМ3}$ – вращающий момент электропривода, определяемый датчиком вращающего момента М40 в месте установки на привод, который нагружен инерционным диском №3;

Для наглядности построим график вращающих моментов:

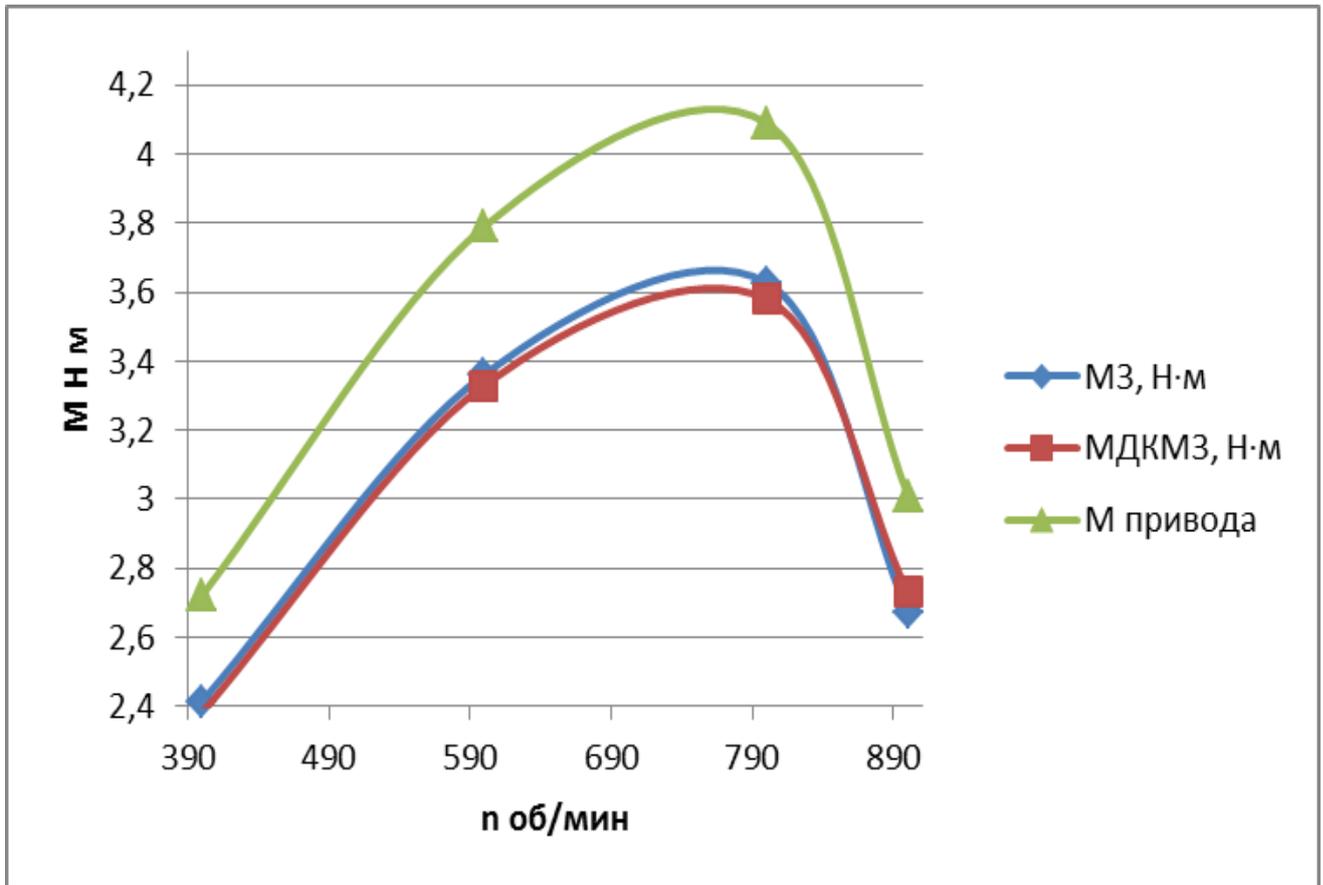


Рисунок 4.13 – Механические характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №3

Из таблицы 4.16 и рисунка 4.13 видно, что значения вращающего момента, полученные динамическим методом и с помощью датчика вращающего момента, отличаются с максимальной относительной погрешностью δ , равной -1,36 %, что говорит о высокой сходимости результатов измерений, полученных разными методами.

Определим механическую характеристику однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №4.

Таблица 4.17 - Данные для построения механической характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №4

Величина	Число оборотов, об/мин			
	400	600	800	900
$J_{вчд}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,004620			
$J_{привода4}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,073025			
$E_4, \text{рад/с}^2$	38,34	52,86	55,73	42,04
$J_{привода4} \cdot \varepsilon_4 \text{ Н}\cdot\text{м}$	2,8	3,86	4,07	3,07
$J_{вчд} \cdot \varepsilon_4 \text{ Н}\cdot\text{м}$	0,18	0,24	0,26	0,19
$M_4, \text{Н}\cdot\text{м}$	2,62	3,61	3,81	2,87
$M_{ДКМ4}, \text{Н}\cdot\text{м}$	2,58	3,59	3,85	2,94
$\delta, \%$	0,27	-0,72	0,97	-0,55

где $J_{привода4} = k_{пот} \cdot J_{в.м.д.} + 3 \cdot J_{муф} + J_{дат.} + J_{вал} + J_{д4}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс электропривода «ротор асинхронного электрического двигателя, вентилятор двигателя, подшипниковые узлы двигателя и опоры, полумуфты 3 шт., датчик вращающего момента, вал от опоры до полумуфты крепления инерционного диска, инерционный диск №4»;

$J_{д4}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс инерционного диска №4;

ε_4 – угловое ускорение ротора электрического двигателя;

M_4 – вращающий момент электропривода, нагруженного инерционным диском №4;

$M_{ДКМ4}$ – вращающий момент электропривода, определяемый датчиком вращающего момента М40 в месте установки на привод, который нагружен инерционным диском №4;

Для наглядности построим график вращающих моментов:

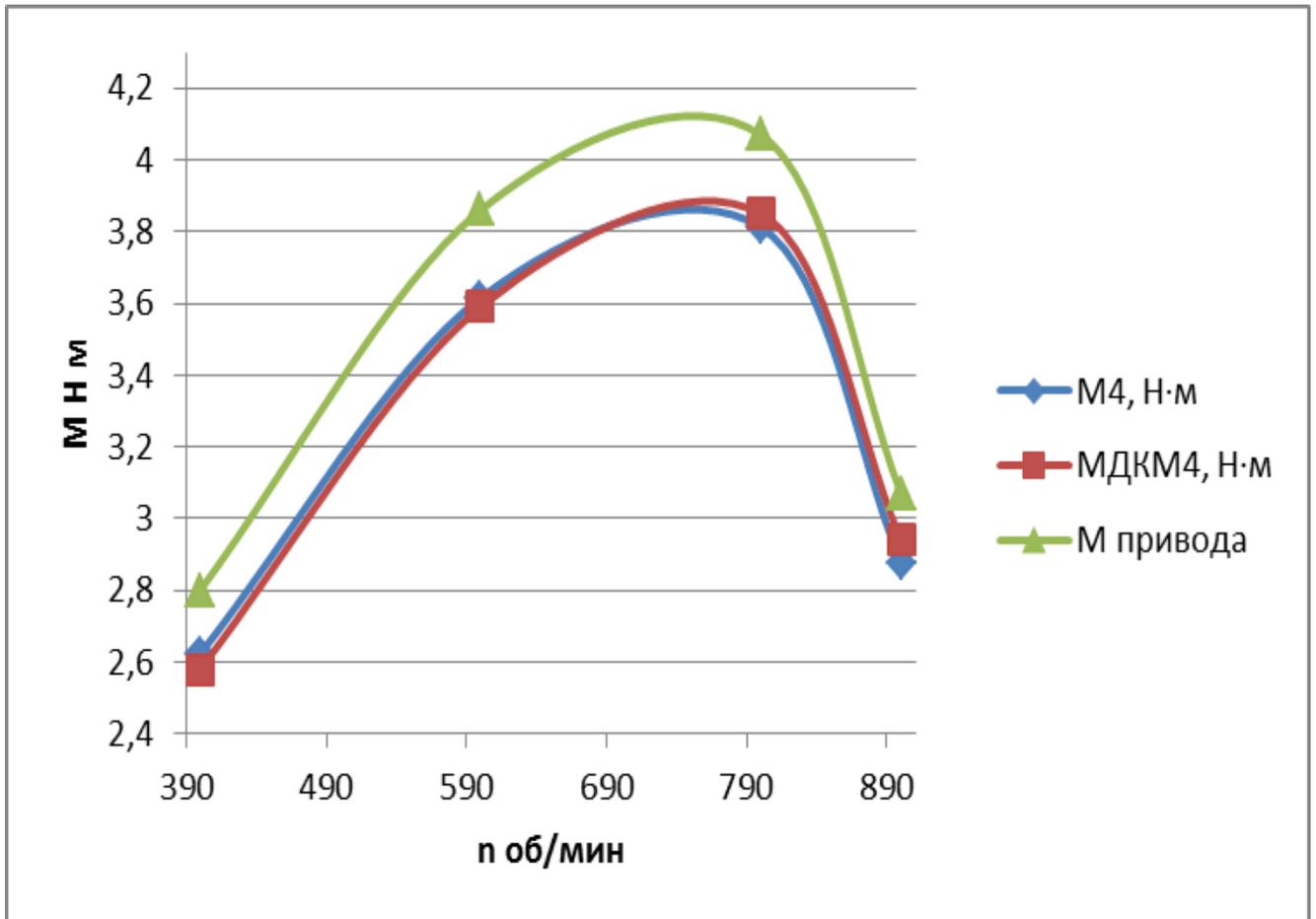


Рисунок 4.14 – Механические характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №4

Из таблицы 4.17 и Рисунка 4.14 видно, что значения вращающего момента, полученные динамическим методом и с помощью датчика вращающего момента, отличаются с максимальной относительной погрешностью δ , равной 0,97 %, что говорит о высокой сходимости результатов измерений полученных разными методами.

Определим механическую характеристику однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №5.

Таблица 4.18 - Данные для построения механической характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №5

Величина	Число оборотов, об/мин			
	400	600	800	900
$J_{вчд}$ кг·м ²	0,004620			
$J_{привода5}$, кг·м ²	0,122038			
E_5 , рад/с ²	22,45	31,22	33,43	25,15
$J_{привода5} \cdot \varepsilon_5$ Н·м	2,74	3,81	4,08	3,07
$J_{вчд} \cdot \varepsilon_5$ Н·м	0,10	0,14	0,15	0,11
M_5 , Н·м	2,64	3,66	3,92	2,95
$M_{ДКМ5}$, Н·м	2,65	3,68	3,94	2,99
δ , %	0,52	0,39	0,37	0,21

где $J_{привода5} = k_{пот} \cdot J_{в.м.д.} + 3 \cdot J_{муф} + J_{дат.} + J_{вал} + J_{д4}$ – приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс электропривода «ротор асинхронного электрического двигателя, вентилятор двигателя, подшипниковые узлы двигателя и опоры, полумуфты 3 шт., датчик вращающего момента, вал от опоры до полумуфты крепления инерционного диска, инерционный диск №5»;

$J_{д5}$ - приведенный к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момент инерции вращающихся масс инерционного диска №5;

ε_5 – угловое ускорение ротора электрического двигателя;

M_5 – вращающий момент электропривода, нагруженного инерционным диском №5;

$M_{ДКМ5}$ – вращающий момент электропривода, определяемый датчиком вращающего момента М40 в месте установки на привод, который нагружен инерционным диском №5;

Для наглядности построим график вращающих моментов.

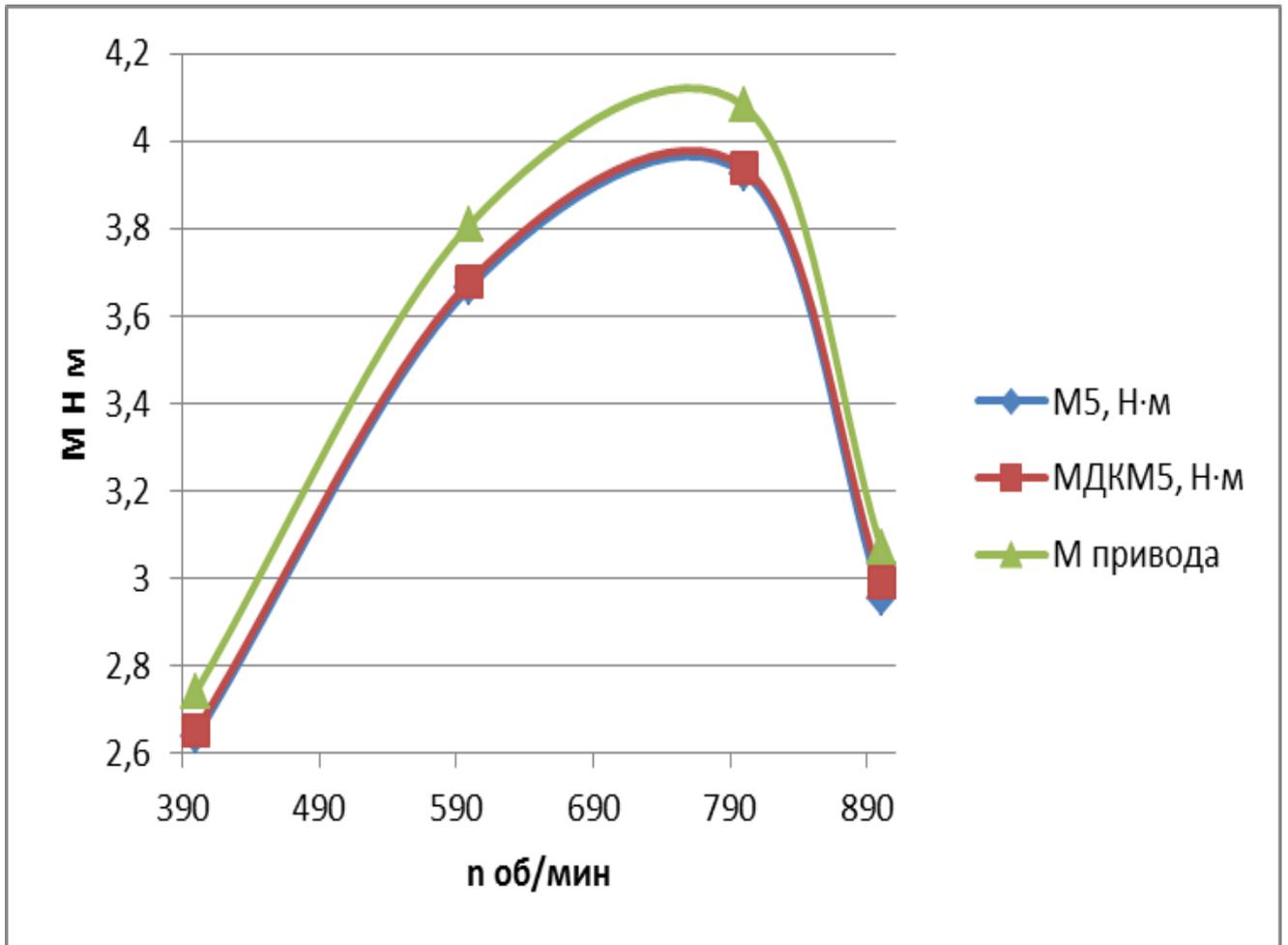


Рисунок 4.15 – Механические характеристики однофазного асинхронного электрического двигателя А80А6 с инерционным диском №5

Из таблицы 4.18 и рисунка 4.15 видно, что значения вращающего момента, полученные динамическим методом и с помощью датчика вращающего момента, отличаются с максимальной относительной погрешностью δ , равной 0,97 %, что говорит о высокой сходимости результатов измерений полученных разными методами.

Теперь проанализируем вращающий момент, определяемый динамическим методом в разных опытах при использовании дисков, обладающих разными моментами инерции. Согласно динамическому методу вращающий момент асинхронного электрического двигателя остается неизменным вне зависимости от величины инерционной массы, воздействующей на вал двигателя, при

постоянных значениях входного напряжения, частоты питающей сети и сопротивления обмоток статора асинхронного электрического двигателя.

Таблица 4.19 - Вращающий момент, определяемый динамическим методом в разных опытах при использовании дисков, обладающих разными моментами инерции

Вращающего момента электропривода определённый динамическим методом	Число оборотов, об/мин			
	400	600	800	900
$J_{\text{привода1}} \cdot \varepsilon_1$	2,75	3,84	4,07	3,06
$J_{\text{привода2}} \cdot \varepsilon_2$	2,77	3,83	4,11	3,12
$J_{\text{привода3}} \cdot \varepsilon_2$	2,72	3,79	4,09	3,01
$J_{\text{привода4}} \cdot \varepsilon_4$	2,8	3,86	4,07	3,07
$J_{\text{привода5}} \cdot \varepsilon_5$	2,74	3,81	4,08	3,07
Среднее значение	2,756	3,826	4,084	3,066
Максимальное отклонение	0,030	0,027	0,0167	0,039
$\delta, \%$	1,10	0,70	0,41	1,27

Данные таблицы 4.19 показывают, что вращающий момент электрического двигателя, определяемый динамическим методом отличаются при разных нагрузках с максимальной относительной погрешностью δ , равной 1,27 %, что говорит о высокой достоверности данных, получаемых с помощью динамического метода определения вращающего момента асинхронного электрического двигателя. Динамический метод определения механических параметров асинхронных электрических двигателей может быть использован для контроля соответствующего параметра.

Также из всех выше приведенных графиков делаем вывод: чтобы значения показаний датчика приближались друг к другу при обоих запусках, необходимо использовать диски, момент инерции которых в несколько раз превышает момент инерции ротора двигателя, поскольку с увеличением момента инерции

инерционных дисков угловое ускорение системы вращающихся масс уменьшается, а, следовательно, уменьшается разница моментов до и после датчика, при этом показания датчика вращающего момента стремятся к моментной характеристике асинхронного электрического двигателя.

Выводы по четвертой главе:

1. Экспериментально доказана достоверность получаемых значений приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь с помощью разработанного АПК с максимальной относительной погрешностью 3 %.

2. По результатам сравнительного контроля вращающих моментов асинхронных электрических двигателей, определяемых с помощью разработанного динамического и существующего тормозного методов доказана сходимость результатов с максимальной относительной погрешностью, равной 2,6 %.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Выводы:

1. Анализ существующего уровня развития техники показывает, что применяемые в настоящее время методы контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей не позволяют с необходимой точностью контролировать механические параметры асинхронных электрических двигателей в переходных режимах работы вследствие косвенности измерений, а также характеризуются низкой частотой регистрации измеряемых параметров. Поэтому исследования, направленные на разработку методов контроля, расширяющих возможности существующих методов и средств, являются актуальными.
2. Разработаны динамический метод, методика и средство для контроля приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь и механических параметров асинхронных электрических двигателей в широком диапазоне частот вращения, позволяющие проводить контроль без демонтажа двигателя.
3. Впервые определена доля каждого вида потерь (механических, добавочных) в системе вращающихся масс асинхронного электрического двигателя, выраженная величиной приведенного к оси вращения ротора асинхронного электрического двигателя момента инерции вращающихся масс с учетом потерь.
4. Экспериментально доказана достоверность получаемых значений приведенного к оси вращения ротора момента инерции вращающихся масс асинхронных электрических двигателей с учетом потерь с помощью разработанного АПК с максимальной относительной погрешностью 3 %.
5. По результатам сравнительного контроля вращающихся моментов асинхронных электрических двигателей, определяемых с помощью разработанного динамического и существующего тормозного методов доказана сходимость результатов с максимальной относительной погрешностью, равной 2,6 %.

Рекомендации:

1. Производителям асинхронных электрических двигателей рекомендуется определять значение приведенного к оси вращения момента инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь динамическим методом контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

2. Предприятиям, эксплуатирующим асинхронные электрические двигатели, проводить испытания и контроль с помощью динамического метода контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю.П. Введение в планирование эксперимента: монография / Ю.П. Адлер. - М.: "Металлургия", 1969. - 159 с.
2. Акимов, Л.В. Исследование асинхронных двигателей перспективных серий / Л.В. Акимов, Ю.Г. Борозяк, А.Д. Колесник, О.Л. Литвинов, И.И. Сосиницкий // Электротехника. – 1981. - №10. – С.29-31.
3. Акимов, Л.В. Идентификация характеристик асинхронных двигателей электроприводов общепромышленного назначения / Л.В. Акимов, Ю.Г. Борозяк, О.Л. Литвинов, И.И. Сосиницкий // Электротехническая промышленность. Серия электрические машины. - 1982. - №1. – С.5-7.
4. Акимов, Л.В. Совершенствование динамических испытаний асинхронных двигателей / Л.В. Акимов, Ю.Г. Борозяк, О.Л. Литвинов, И.И. Сосиницкий // Электротехника. - 1978. - №9. – С.45-46.
5. Акимов, Л.В. Устройство для экспресс-динамометрических испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / Л.В. Акимов, О.Л. Литвинов, Н.П. Спанцирети // Электротехника. - 1975. - №3. – С.47-49.
6. Акимов, Л.В. Устройство для экспресс-динамометрических испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / Л.В. Акимов, О.Л. Литвинов // Электроника. -1986. - №8. - С.22-27.
7. Алешин, А.Д. Разработка высокопроизводительного комплекса оценки качества асинхронных электродвигателей: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Алешин А. Д. - Кемерово, 1997. – 173 с.
8. Алеханян, К.А. Автоматизированная установка для периодических испытаний асинхронных электрических двигателей с коротко замкнутым ротором / К.А. Алеханян // Ереван . ЕЭМСЗ. - 1988. – Вып. 721. – С.12-18.
9. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров: учебн. пособие. / А.А. Амосов - М.: Высш. шк., 1994. – 544 с.

10. А. с. 1138769 СССР, G1R31/34. Устройство для испытания моментных электродвигателей / А. П Теплинский, В. Н. Шувалов, Б. Е. Базанов (СССР). – №4916427/22 ; заявл. 10.12.90 ; опубл. 07.12.92. Бюл. №45. – 5 с. : ил.
11. А. с. 1468211 СССР, G1R31/34. Устройство для определения параметров асинхронных электродвигателей/ Е.К. Ещин, В.Л. Иванов, В.Г. Власов, Д.А. Алешин, М.А. Тынкевич (СССР).- №4184538/22 ; заявл. 15.07.92 ; Бюл. №26. – 4 с. : ил.
12. А. с. 1629884 СССР, G1R31/34. Устройство для измерения сопротивления постоянному току обмоток статора электрической машины под нагрузкой/ В.С. Грибакин, А.Ф. Барышев, Г.И. Эйдельман, А.С. Грибакин (СССР). - №4668047/21. ; заявл. 23.02.91. Бюл. №7. – 4 с. : ил.
13. А. с. 1802347 СССР, G1R31/34. Устройство для определения параметров асинхронного электродвигателя/ Д.А. Алешин, Е.К. Ещин, В.Л. Иванов (СССР).- №928795/22. ; заявл. 18.04.91. ; опубл. 15.03.93. Бюл. №10. – 5 с. : ил.
14. А. с. 1295347 СССР, G1R31/34. Способ определения активного, индуктивного сопротивлений и ЭДС асинхронного двигателя по высшим гармоникам/ С.И. Кутузов, Н.Г. Широков (СССР).- №3927765/24-07. ; заявл. 07.03.87. Бюл. №9. – 4 с. : ил.
15. Величко, Г.В. Метод идентификации параметров асинхронных трехфазных двигателей ориентированных на использование в автоматизированном электроприводе/ Г.В. Величко - Автоматизация и управление в машиностроении. - 2000. - № 11. - С.22-28.
16. Гайдышев, И. Анализ и обработка данных: специальный справочник СПб./ И. Гайдышев - Питер. - 2001.- 752 с.
17. Гернет, М.М. Определение моментов инерции / М.М. Гернет, В.Ф. Ратобыльский - М.: Машиностроение - 1969. – 248 с.
18. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман - Изд. 4-е, доп. Учебн. пособие для вузов. -М.: Высш.шк. - 1972. - 386 с.

19. Гольдберг, О.Д. Испытания электрических машин. / Гольдберг О. Д - Учеб. Для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк. - 1990. – 255 с.
20. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. - М. : Изд-во стандартов, 1990. - 37 с.
21. ГОСТ 20918-75 Подшипники качения. Методы расчета предельной частоты вращения.
22. ГОСТ 52859-2007 Подшипники качения. Общие технические условия.
23. ГОСТ 520-89 Подшипники качения. Общие технические условия.
24. ГОСТ 520-2011 Подшипники качения. Общие технические условия
25. ГОСТ 520-2002 Подшипники качения. Общие технические условия.
26. ГОСТ 25255-82 Подшипники качения. Ролики цилиндрические длинные. Технические условия
27. ГОСТ 27471-87 Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
28. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования.
29. ГОСТ 7217-87 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний
30. ГОСТ 11828-75 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.
31. ГОСТ 25000-81- Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний (взамен ГОСТ 11828-75 (кроме раздела 6), ГОСТ 25000-81).
32. ГОСТ 25941-83 Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия.
33. Гришин, В.С. Автоматизированная система приемочных испытаний низковольтных асинхронных двигателей / В.С. Гришин, В.А. Боровков, А.В. Воронов, А.Ф. Воронин // Тезисы докладов VIII Всесоюзной научно-технической конференции «Состояние и перспективы совершенствования разработки, производства применения низковольтных электродвигателей переменного тока.» - Суздаль. - 1988. – С.128-129.

34. Димитров, Д.А. Построение механических характеристик асинхронных электрических двигателей при пониженном напряжении / Д.А. Димитров М.П. Михов // Изв. ВМЕИ Ленина. – 1976. - №2 – С.13-20.
35. Дудзинский, Я. Стенд для автоматической регистрации характеристик электрических двигателей малой мощности / Я. Дудзинский, Я. Курашкевич // Институт электротехники. – Варшава. – 1988.
36. Егоров, А.В. Бестормозное определение эффективных характеристик электрических двигателей вращательного действия / А.В. Егоров, В.Н Белогусев // Контроль и диагностика. – 2010. – №7. – С.66-72.
37. Егоров, А.В. Бестормозной способ определения момента инерции электрического двигателя / А.В. Егоров, В.Н Белогусев // Будущее машиностроения России: Сборник трудов Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – С.207-208.
38. Егоров, А.В. Диагностирование эффективных показателей электрических двигателей, работающих в составе приводов / А.В. Егоров, В.Н Белогусев // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XV международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. Т. 2. М.: издательский дом МЭИ. - 2009. – С.58-60.
39. Егоров, А.В. Диагностирование эффективных показателей электрических двигателей / А.В. Егоров, В.Н Белогусев // Автоматизация в промышленности: III Международной научной конференции: Тез. докл. М.: Институте проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН. - 2009. – С.105-110.
40. Егоров, А.В. Испытание асинхронного двигателя без демонтажа с помощью АПК «Омид» / А.В. Егоров, В.Н. Белогусев, С.В. Зверев, А.Г. Демьянов // Материалы докл. V молодежной Международной науч. конф. «Гинчуринские чтения» / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. В 4т.; Т.3 – Казань, Казанский Государственный Энергетический Университет. – 2010. – С.52-54.

41. Егоров, А.В. Определение потерь и КПД асинхронного двигателя с помощью АПК «Омид» / А.В. Егоров, В.Н. Белогусев, С.В. Зверев, А.Г. Демьянов // Электронные и электромеханические системы и устройства: Тез. докл. XVIII науч.-техн. конф. ОАО «НПЦ» Полус». – Томск: ООО «Печатная мануфактура». - 2010 – С.154-156.
42. Егоров, А.В. Инерционный метод оценки мощности механических потерь в асинхронном зубчатом электроприводе / А.В. Егоров, В.Н. Белогусев, // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. - №6. - С.34-37.
43. Егоров, А.В. Определение коэффициента полезного действия асинхронных электрических машин с помощью эталонного момента инерции / А.В. Егоров В.Н. Белогусев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Том 12 (33) №1(2). - С.349-353.
44. Ещин, Е.К. Определение параметров асинхронных электроприводов в автоматизированной системе испытаний/ Е.К. Ещин, М.А. Тынкевич, В.В. Новоселов // Автоматиз. и электриф. горных предприятий в условиях АСУ: Сб. науч. тр./ Кузбасский политехн. институт – Кемерово. - 1985. - С.62-66.
45. Ещин, Е.К. Теория предельных режимов работы горных машин / Е.К. Ещин - Томск: изд-во Том. ун-та - 1995. – 232 с.
46. Иванов, М.Н. Детали машин: учебн. для машиностр. спец. вузов 7-е изд., перераб. и доп. / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. - М.: Высш. шк., 2002. - 408 с.
47. Измерения, контроль, испытания и диагностика. / Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. - М.: Машиностроение. В 40 томах. Том III – 7, 2005. - 484 с.
48. Ильин, М. О. Частотный метод определения параметров схем замещения обмоток электрических машин/ М.О. Ильин, Ф.Ф. Котченко // Электричество -1987. - №3.
49. Кац, С.М. Балансирные динамометры для измерения вращающего момента / С.М. Кац. - М.: Госэнергоиздат., 1962. - 144 с.

50. Кацман, М.М. Электрические машины: учеб. для студентов сред. Поф. Учебных заведений. 3-е издание исправленное / М.М. Кацман. - М.: Академия, 2001. – с.463.
51. Кацман, М.М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электроприводу: учеб. для электротехнических специальностей техникумов / М.М. Кацман. - М.: Академия, 2004. - 252 с.
52. Каширских, В.Г. Определение в реальном времени активного сопротивления и потокосцепления ротора асинхронного двигателя при его работе в установившемся режиме / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов // Вести. КузГТУ.- 2003. - №1. - С.21-24.
53. Каширских, В.Г. Определение индуктивности ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов // Вести. КузГТУ.- 2003. - №1. - с.20-21.
54. Каширских, В.Г. Оценка параметров и состояния асинхронного двигателя при динамической нагрузке / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов // М.: 2002, - 11 с. Дел. В ВИНТИ 26 дек. 2002, №2265-82002
55. Каширских, В.Г. Оценка параметров и состояния асинхронного двигателя при установившемся режиме работы / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов // М. - 2002. - 11с. Дел. В ВИНТИ 26 дек. 2002, №2266-В2002
56. Каширских, В.Г. Идентификация параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов, Д.В. Соколов // Проблемы развития автоматизированного электропривода: Труды Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. - Новокузнецк: СибПИГУ.-2002. - С.81-82.
57. Каширских, В.Г. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с помощью метода наименьших квадратов / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов, Д.В. Соколов // Вести. КузГТУ-2002. - №2 - С.17-19.
58. Каширских, В.Г. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с помощью расширенного фильтра Калмана/ В.Г. Каширских, В.М. Завьялов, Д.В. Соколов // Вестн. КузГТУ – 2002 - №2 - С.18-20.

59. Каширских, В.Г. Определение кривой намагничивания асинхронного двигателя / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов, Д.В. Соколов // Проблемы развития автоматизированного электропривода: Труды Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. - Новокузнецк: СибГИУ. - 2002 - С.85-87.
60. Каширских, В.Г. Определение кривой намагничивания асинхронного двигателя по результатам испытания на холостом ходе/ В.Г. Каширских, В.М. Завьялов, Д.В. Соколов // Веста. КузГТУ. - 2002 - №2 - С.14-16.
61. Котельнец, Н.Ф. Испытания, Эксплуатация и ремонт электрических машин: учебник для вузов /Н. Ф. Котельнец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – с.384.
62. Кривицкий, М.Я. Автоматизированная система для испытаний Асинхронных электровентиляторов / М.Я. Кривицкий, С.В. Поносков // Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. - Владимир, 1989. - С.182 - 184.
63. Крутов, В.И. Основы научных исследований / В.И. Крутов, В.В. Попов - М.: Высш. шк., 1989. – 400 с.
64. Кухлинг, Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. / Х. Кухлинг - М.: Мир, 1985. - 250 с.
65. Литвинов, О.И. Устройство для экспресс-динамометрических испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / О.И. Литвинов, Н.П. Спанцирети // Электроника. -1985. - №3.- С.47-50.
66. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. М.: Машиностроение. 1995. - с.488.
67. Одинец, С.С. Средства измерения крутящего момента. / С.С. Одинец, Г.Е. Топилин // М.: «Машиностроение» - 1977. – с.159
68. Панасенков, М.А. Серия электромагнитных тормозов для испытания малых и средних машин. / М. А. Панасенков – «электротехн. пром-сть, сер. электрические машины», - 1965. - С.3-5.

69. Панасенков, М.А. Электромагнитные расчеты устройств с нелинейными распределенными параметрами. М.: Энергия / М. А. Панасенков - 1971 - с.212.
70. Пат. 2425342 Российская Федерация, МПК G01M 1/00. Способ определения момента инерции электрического двигателя [Текст]/ А.В. Егоров, В.Н. Егоров, В.Н. Белогусев; заявитель и патентообладатель А.В. Егоров, В.Н. Егоров, В.Н. Белогусев. Заявл. 03.07.2008; опубл. 27.07.2011, Бюл. №21.
71. Пожаренко, В.А. Компьютерно-измерительная система для испытания асинхронных двигателей в опыте короткого замыкания / В.А. Пожаренко, В.В. Кухарчук // Автоматизация проектирования и производства в электромашиностроении. – Суздаль. - 1989. - с.119.
72. Потапов, Л.А. Измерение вращающих моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей / Л. А. Потапов, Ф. М. Юферов - М., «Энергия», 1974.- с.128.
73. Прикладная механика. Учебное пособие для вузов. Под ред. В.М. Осецко-го. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. - с.488.
74. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под ред. Е.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. - с.480.
75. Розанов, Ю.А. Случайные процессы (краткий курс) / Ю.А. Розанов - М.: Наука, 1971. - с.288.
76. Столяров, И.М. Определение параметров асинхронной машины/ И.М. Столяров, З.Б. Слепцова // Горный журнал, 1984. - №10 - С.6-8.
77. Сыромятников, И.А. Режимы работ асинхронных машин и синхронных машин двигателей / И. А. Сыромятников. - М.: Энергоиздат, 1984. - с.240.
78. Теория механизмов и механика машин: Учеб. для втузов/ К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др.; Под ред. К.В. Фролова. 3-е изд., стер. -М.: Высш. шк., 2001. - с.496
79. Теоретическая механика. Учеб. для вузов/ Н.Н. Поляхов, С.А. Зегжда, М.П. Юшков; Под ред. П.Е. Товстика. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2000.- с.592.

80. Шушкевич, В.А. Основы электротензометрии / В.А. Шушкевич - Минск, Вышш. шк. , 1975 г.- с.352.
81. Щиголев, Б.М. Математическая обработка наблюдений / Б.М. Щиголев - М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1962. - с.344.
82. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова - М.: Высш. шк., 1966. - с.439.
83. Янцен, В.И. Расчет режимов экстренного нагружения асинхронных электродвигателей горных машин / В. И. Янцен - Изв. вузов. Горный журнал, 1981. - №7.
84. Amuliu V.P. Induction motor parameter identification operating data for electric drive applications/ V.P. Amuliu, All K.// 18th Digital Avionics Systems Conference, St. Louis, Missouri, October 1999.
85. Boldea I. Unified treatment of core losses and saturation in the orthogonal - axis model of electric machines/ Boldea I., Nasar S.A.// IEE Proc., 1987. - B 134. №. 6. - Pp.355-363.
86. Kataoka T. A new method of determining the equivalent circuit parameters and predicting the steady state performance of inverter fed induction motors/ T. A Kataoka - Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. soc. 1988. Nene V.D. Optimal Tracking of the Dynamic Performance of an Induction Machine// Electric Machines and Electro mechanics, 1982. - №7. - Pp.27-34.
87. Krynke M. Identyfikacja współczynników modelu matematycznego silnika indukcyjnego na podstawie doświadczalnie wyznaczonej charakterystyki/ Krynke M., Jezierski A.// Subszae Optim. Zautomatyc. 1983. - №7. - Pp.28-40.
88. Moons C. Parameter Identification of Induction Motor Drivers/ Moons C., Moor De.B.// Automatic, vol. 31, 1995. - № 8. - Pp.1137-1147.
89. Parameter Identification of a Mathematical Model of Induction Motors Via Least Square Technics/ Alonge F., D'ippolo F., Barbera La.S., Raimondi F.M.// Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications Trieste, Italy 1-4 September

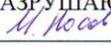
90. Toliyat H.A. A Method for Dynamic Simulation and Detection of Air.Gap Eccentricity in Induction Machines/ Toliyat H.A, Arefeen M.S, Parlos A.G.// IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, №. 4, July/August 1996. - Pp.910-918.
91. URL: <http://www.svaltera.ua/press-center/articles/4341.php>
92. URL: <http://www.tilkom.com>.

Приложение 1

Копия акта внедрения результатов диссертационной работы на ООО
«Поволжский центр неразрушающего контроля»

«СОГЛАСОВАНО»

«УТВЕРЖДАЮ»

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР
ООО «ПОВОЛЖСКИЙ ЦЕНТР
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ»
 НОСОВ М.А.
«10» марта 2015 г.

ДИРЕКТОР
ООО «ПОВОЛЖСКИЙ ЦЕНТР
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ»
ЗАВГОРОДНИЙ Э.Ю.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

выполненная БЕЛОГУСЕВЫМ ВЛАДИМИРОМ НИКОЛАЕВИЧЕВ
Кафедра ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ И
МАШИНОСТРОЕНИЯ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

внедрены на ООО «ПОВОЛЖСКИЙ ЦЕНТР НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ»

Вид внедренных результатов МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

1. Характеристика масштаба внедрения ОСНАЩЕНИЕ ОТДЕЛА ТЕХНИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ
АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ, РЕАЛИЗУЮЩИМИ
ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2. Форма внедрения ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ

3. Новизна результатов научно-исследовательских работ ПРИНЦИПИАЛЬНО
НОВЫЕ

4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ
ИСПЫТАНИЙ ВНЕДРЯЕМЫХ МЕТОДОВ

5. Внедрены: в промышленное производство ОТДЕЛА ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

6. Годовой экономический эффект

Ожидаемый —

Фактический —

7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —

8. Объем внедрения —

что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета

гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

9. Социальный и научно-технический эффект ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ЗНАНИЙ О
ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ КАЧЕСТВА ИСПОЛЪЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И
ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

От исполнителя

Автор разработанных методов контро-
ля



Белогусев В. Н.

Заместитель директора по научной ра-
боте Института механики и машино-
строения Поволжского государствен-
ного технологического университета



Багаутдинов И.Н.

Приложение 2

Копия акта внедрения результатов диссертационной работы на ООО
«Интеллектуальные технологии»

«СОГЛАСОВАНО»

«УТВЕРЖДАЮ»

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР
ООО «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ»

 ИВАНОВ Г.Н.
«27» февраля 2015 г.

ДИРЕКТОР
ООО «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ»

 ШУЛЕПОВ В.И.
«27» февраля 2015 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

выполненная БЕЛОГУСЕВЫМ ВЛАДИМИРОМ НИКОЛАЕВИЧЕВ
Кафедра ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ И
МАШИНОСТРОЕНИЯ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

внедрены на ООО «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Вид внедренных результатов МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

1. Характеристика масштаба внедрения ОСНАЩЕНИЕ ОТДЕЛА ТЕХНИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ
АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ, РЕАЛИЗУЮЩИМИ
ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2. Форма внедрения ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ

3. Новизна результатов научно-исследовательских работ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫЕ

4. Опытнo-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ
ВНЕДРЯЕМЫХ МЕТОДОВ

5. Внедрены: в промышленное производство ОТДЕЛА ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

6. Годовой экономический эффект

Ожидаемый —

Фактический —

7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —

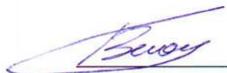
8. Объем внедрения —

что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета
гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

9. Социальный и научно-технический эффект ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ЗНАНИЙ О
ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ КАЧЕСТВА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

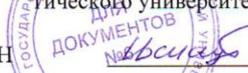
От исполнителя

Автор разработанных методов контроля



Белогусев В.Н.

Заместитель директора по научной работе
Института механики и машиностроения
Поволжского государственного техно-
логического университета


ДОКУМЕНТОВ
№ 6/30/15

Багаутдинов И.Н.

Приложение 3

Копия акта внедрения результатов диссертационной работы на ООО
«Институт перспективных технологий»

«СОГЛАСОВАНО»

«УТВЕРЖДАЮ»

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР
ООО «ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ»

ДИРЕКТОР
ООО «ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ»

 СМИКУЛИС Ю.Е.
«20» марта 2015 г.

 ЗВЕРЕВ С.В.
«20» марта 2015 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

выполненная БЕЛОГУСЕВЫМ ВЛАДИМИРОМ НИКОЛАЕВИЧЕВ
Кафедра ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ И
МАШИНОСТРОЕНИЯ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

внедрены на ООО «ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Вид внедренных результатов МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

1. Характеристика масштаба внедрения ОСНАЩЕНИЕ ОТДЕЛА ТЕХНИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СБОРКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ
АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ, РЕАЛИЗУЮЩИМИ
ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2. Форма внедрения ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ

3. Новизна результатов научно-исследовательских работ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫЕ

4. Опытно-промышленная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ПРОТОКОЛАМИ ИСПЫТАНИЙ
ВНЕДРЯЕМЫХ МЕТОДОВ

5. Внедрены: в промышленное производство ОТДЕЛА ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

6. Годовой экономический эффект

Ожидаемый —

Фактический —

7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —

8. Объем внедрения —

что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета
гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

9. Социальный и научно-технический эффект ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ЗНАНИЙ О
ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ КАЧЕСТВА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

От исполнителя

Автор разработанных методов контроля

 Белогусев В. Н.

Заместитель директора по научной работе
Института механики и машиностроения
Поволжского государственного техноло-
гического университета

 Багаутдинов И.Н.



Приложение 4

Копия акта внедрения результатов диссертационной работы в Институт механики и машиностроения ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»

«СОГЛАСОВАНО»

«УТВЕРЖДАЮ»

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ДИРЕКТОРА ПО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ РАБОТЕ ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

«20» января 2015 г.

ГРЯЗИН В.А.

«20» января 2015 г.

ЕГОРОВ А.В.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

выполненной БЕЛОГУСЕВЫМ ВЛАДИМИРОМ НИКОЛАЕВИЧЕВ

(ф.и.о. исполнителя, наименование кафедры)

Кафедра ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

внедрены на КАФ. ТТМ ИММ ФГБОУ ВПО «ПГТУ»

Вид внедренных результатов ТЕОРИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

эксплуатация (изделия, работы, технологии), производство (изделия, работы, технологии) и др.

1. Характеристика масштаба внедрения МАГИСТЕРСКАЯ ПРОГРАММА «ТЕХНОЛОГИИ ИНЕРЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСОВ» ПО НАПРАВЛЕНИЮ 150402 «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ»

2. Форма внедрения МАГИСТЕРСКАЯ ПРОГРАММА

методика (метод)

3. Новизна результатов научно-исследовательских работ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫЕ (пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификация, модернизация старых разработок)

4. Учебно-опытная проверка ПОДТВЕРЖДЕНА ГОСУДАРСТВЕННОЙ АККРЕДИТАЦИЕЙ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ

5. Внедрены: в учебный процесс ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

6. Годовой экономический эффект

Ожидаемый —

Фактический —

7. Удельная экономическая эффективность внедренных результатов —

8. Объем внедрения —

что составляет — от объема внедрения, положенного в основу расчета

гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР

9. Социальный и научно-технический эффект ПОДГОТОВКА МАГИСТРАНТОВ, ОБЛАДАЮЩИХ НОВЫМИ, КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫМИ И УНИКАЛЬНЫМИ КОМПЕТЕНЦИЯМИ

(охрана окружающей среды, недр; улучшение и оздоровление условий труда; специального назначения и т.п.)

От исполнителя

Автор разработанных методов контроля

Белогусев В. Н.

Заведующий кафедрой ТТМ

Павлов А.И.



Приложение 5

Руководство по эксплуатации аппаратно-программного комплекса контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей

Глава 1 введение

Руководство по эксплуатации содержит технические характеристики, описание принципа действия и устройства, а также сведения, необходимые для правильной эксплуатации аппаратно программно комплекса для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей (далее Комплекс).

Глава 2 назначение

Комплекс «контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей» предназначен для проведения процедуры оценки общего и механического коэффициента полезного действия.

Комплексом производится измерение электрической мощности (активной и реактивной) и механической мощности двигателя на валу, определяет момент инерции и крутящий момент двигателя бесконтактным методом.

Комплекс регистрирует значения угловых ускорений на валу двигателя при его разгоне. Все измеренные характеристики могут сохраняться на жестком диске ПК. Благодаря применению в конструкции прибора современных цифровых элементов он имеет небольшие габариты и малое потребление энергии. Комплекс может использоваться в различных отраслях народного хозяйства, в заводских и научно – исследовательских лабораториях.

Глава 3 условия эксплуатации

Эксплуатация комплекса осуществляется в закрытых взрыво- и пожаробезопасных лабораторных помещениях при следующих условиях:

- температура окружающего воздуха от плюс 10 до плюс 35 0С;
- относительная влажность не более 80 %;
- атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт.ст.);
- внешние электрические и магнитные поля, кроме земного, должны отсутствовать;
- содержание примесей в окружающем воздухе в пределах санитарных норм, регламентированных ГОСТ 12.1.005-88.

По степени защиты от воздействия окружающей среды (проникновения воды, пыли и посторонних частиц) относится к группе IP00 по ГОСТ 14254-96 (изделие в обыкновенном исполнении). По воздействию температуры и влажности окружающего воздуха относится к группе В1 по ГОСТ 12997-84. По эксплуатационной законченности относится к изделиям третьего порядка. По электрической защищенности человека от поражения электрическим током относится к I классу по ГОСТ 12.2.007.0-75. По информационной совместимости соответствует ГОСТ 26.014-81.

Электрическое питание осуществляется от источника постоянного тока напряжением 12В. Питание ПК осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением в пределах от 187 до 242 В, частотой (50 + 1) Гц.

Комплекс не содержит в своем составе источников радиопомех.

Глава 4 технические характеристики

Технические характеристики комплекса :

Потребляемая мощность- 500 мВт.

Питание комплекса осуществляется от источника постоянного тока напряжением 12В. Питание ПК производится от сети переменного тока напряжением 220 В с пределами допустимого отклонения от минус 15% до +10% частотой (50±1) Гц с коэффициентом нелинейных искажений не более 5%. Заземление прибора осуществляется через клемму на наружной боковой части прибора.

Количество измерительных каналов – 7.

Тип входного сигнала – биполярный.

Диапазон входного напряжения – ± 400 В.

Диапазон входного тока – ± 1000 А.

Входное сопротивление измерительного канала – 40 кОм.

Количество входных импульсов за 1 оборот ротора энкодера – 5000 имп.

Нижний предел измеряемой частоты оборотов – 0 об/мин.

Верхний предел измеряемой частоты оборотов – 3000 об/мин.

Дискретность измерения длительности входных импульсов – 62,5 нс.

Тактовая частота измерительного контроллера – 16 МГц.

Скорость накопления регистрируемых данных, макс. – 1,37 МБ/мин.

Точность измерения числа оборотов в минуту - Младший разряд.

Погрешность измерения углового ускорения – Младший разряд.

Печать протокола отчета о проведенных испытаниях.

Сохранение и загрузка записанных данных.

Отображение рассчитанных параметров в графическом виде.

Вес прибора - не более 10 кг.

Габаритные размеры - 300*200*100.

Режим работы комплекса продолжительный.

Цифровой интерфейс — USB 2.0.

Скорость передачи данных USB 2.0 — 256000 б/с.

Объем встроенной памяти – 2 Гб.

Глава 5 состав комплекса

Комплект поставки должен соответствовать таблице 1.

Таблица 1 - Комплект поставки АПК.

Наименование	Кол	Примечание
АПК	1	
Программа регистрации и анализа цифрового сигнала	1	Поставляется на диске

Руководство по эксплуатации	1	
Кабель USB	1	
Энкодер	1	
Эталонный диск	1	
Упаковка	1	

Глава 6 описание конструкции и принципа работы

Комплекс относится к типу измерительных устройств. Электронный блок работает от источника постоянного тока напряжением 12 В.

АПК имеет три аналоговых (напряжение в трех фазах) и четыре цифровых (токи в трех фазах и энкодер) измерительных канала (рисунок 1). При вращении вала в энкодере формируется цифровой сигнал. Энкодер генерирует 5000 импульсов за один оборот вала двигателя. Применение энкодера с таким количеством импульсов на один оборот дает точность высших порядков и подробную характеристику разгона со всеми колебаниями угловой скорости, которые возникают от переходных процессов при разгоне асинхронного электрического двигателя.

В АПК применен инкрементальный энкодер компании Autonics, датчики тока компании Honeywell на основе эффекта Холла, которые формируют цифровой сигнал, допустимый диапазон токов составляет ± 1000 А. К главным достоинствам датчиков на основе эффекта Холла можно отнести отсутствие вносимых в систему потерь мощности и, как следствие, выделение теплоты, хорошую электрическую изоляцию, широкий диапазон частот и возможность измерения постоянных токов. Датчики напряжения выполнены в виде резисторов высоких сопротивлений. В зависимости от величины напряжения резисторы подают на вход аналогово-цифрового преобразователя напряжение, не превышающее 5 В.

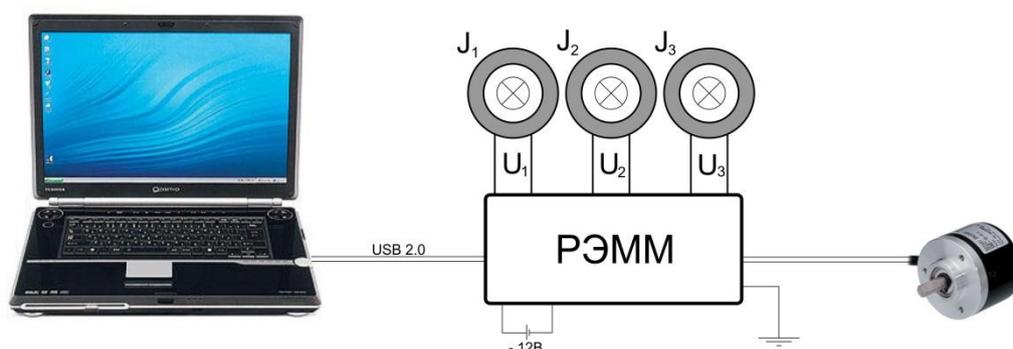


Рисунок 1 - Структура АПК для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

Цифровой сигнал с датчиков поступает на вход блока регистрации, в котором через гальваническую развязку сигналов и фильтр попадает в измерительный микроконтроллер Atmega 640 с тактовой частотой 16 МГц (рисунок 2). Система гальванической развязки состоит из двух блоков - блок развязки питания и блок развязки сигнальной линии. Цифровой сигнал из микроконтроллера поступает на Flash-память до конца измерения. После окончания измерения данные из Flash-памяти поступают в персональный компьютер (ПК) и обрабатываются терминальной программой, установленной на жестком диске ПК.



Рисунок 2 - Структура блока регистрации АПК для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей.

В терминальной программе на ПК осуществляется математическая обработка массива данных, вычисление угловых скоростей, ускорений вала асинхронного электрического двигателя, полной электрической мощности и производится расчет механических параметров, по методике, приведенной во

второй главе. По данным угловых ускорений, полученных при разгоне двигателя с диском с известным моментом инерции и без него, вычисляется приведенный к оси вращения ротора момент инерции вращающихся масс электрического двигателя с учетом потерь, механическая мощность, и вращающий момент на валу двигателя и электрическая мощность двигателя. Полученные результаты представляются графически. Терминальная программа имеет встроенные часы реального времени, что позволяет сохранять время и дату проведения контроля параметров. Комплекс выполнен в экранированном алюминиевом корпусе.

Глава 7 требование безопасности

Общие требования безопасности к конструкции комплекса должны соответствовать ГОСТ 12.2.003-91, ГОСТ 12.2.007.0-75, требования к электрической прочности и сопротивлению изоляции - ГОСТ 12997-84.

К работам по монтажу, установке, проверке и обслуживанию комплекса должны допускаться лица, имеющие квалификацию не ниже второй группы согласно правилам ПТЭ и ПТБ и обученные правилам техники безопасности при работе с прибором.

При монтаже, установке, проверке и обслуживании комплекса должны соблюдаться действующие «Правила устройства электроустановок» (ПУЭ), «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭ) и «Правила техники безопасности электроустановок потребителей (ПТБ) для напряжения до 1000 В постоянного и переменного тока».

Источниками опасности комплекса являются:

- токоведущие части комплекса, находящиеся под напряжением;

Электрическое сопротивление между заземляющей клеммой и любой доступной прикосновению неокрашенной металлической нетоковедущей частью должно быть не более 0,2 Ом.

Глава 8 подготовка к работе и порядок работы с комплексом

Далее выбранные двигатели собираются и проходят контроль механических параметров, разработанным динамическим методом.

Выполняются следующие действия:

- разместить и смонтировать АПК, согласно требованиям безопасности.
- подключить USB кабель к ПК и АПК.
- Подключить питание ПК.
- запустить терминальную программу комплекса на ПК (рисунок 3).

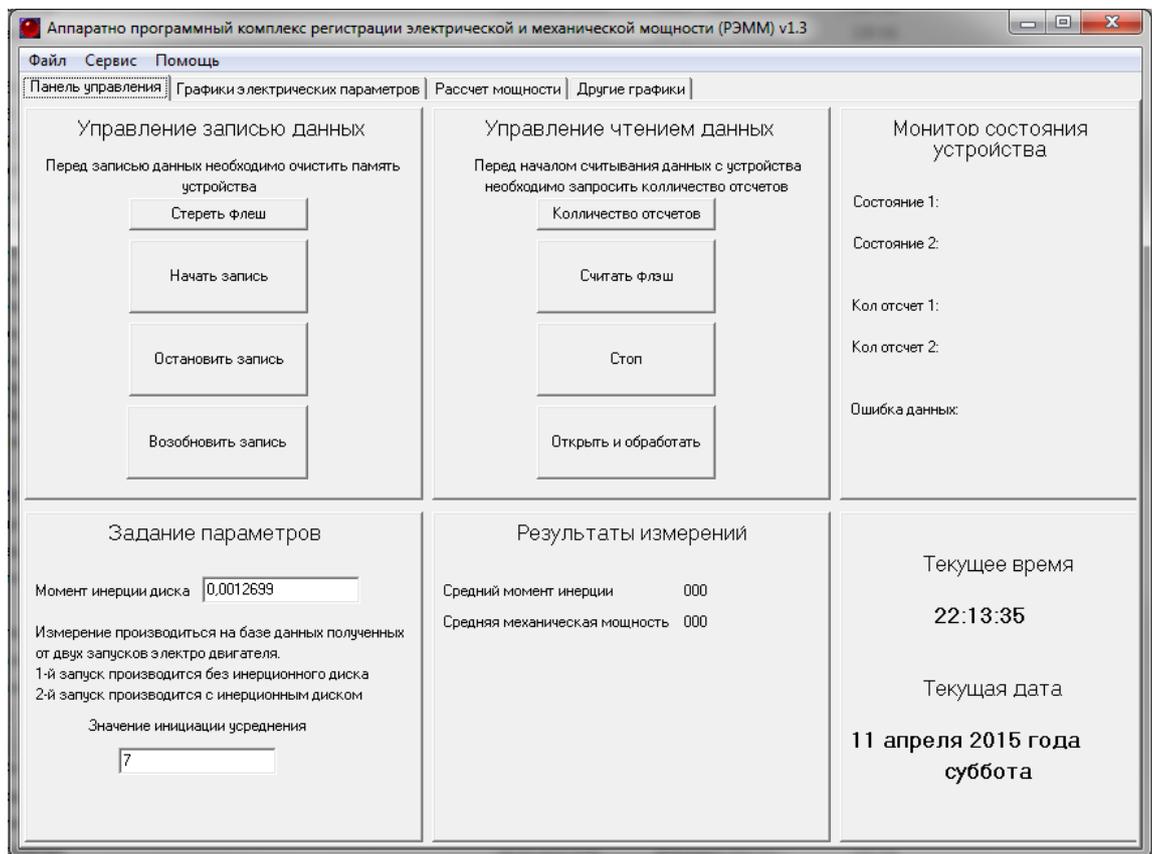


Рисунок 3 - Терминальная программа АПК для контроля механических параметров асинхронных электрических двигателей

- соединить энкодер с ротором испытуемого асинхронного электрического двигателя.

- соединить клеммы питающих проводов со входными клеммами на комплексе.
- соединить выходные клеммы посредством силового кабеля с испытуемым асинхронным электрическим двигателем.
- запустить двигатель, проверить направление вращения вала, правильное направление вращения - против часовой стрелки.

Подготовка терминальной программы комплекса (рисунок 3.5.).

- перейти на вкладку "настройка порта" основного окна программы.
 - задать номер порта, к которому подключено устройство,
 - проверить соответствие параметров обмена данными.
 - нажать кнопку "Применить", в правой части интерфейса программы отобразится состояние соединения.
 - если команды не выполняются: необходимо проверить правильность соединения устройства с компьютером, соответствие заданного номера порта с используемым, переустановить драйвер USB устройства, перезагрузить систему.
 - если соединение установлено, нужно перейти на вкладку "Настройка фильтра данных", параметр "количество отсчетов ФСС" должен быть равен количеству импульсов, выдаваемых энкодером.
 - перейти на вкладку "Определение момента инерции" программы.
- В правой части интерфейса программы заполните графы "Данные оператора" и "Модель и номер двигателя".

Глава 9 измерение параметров двигателя

Перед началом измерений, нужно задать значение момент инерции эталонного диска. При необходимости можно производить измерения без фильтрации полученных данных, для этого нажмите на кнопку "Фильтр включен", фильтр будет отключен.

- в правой части интерфейса программы заполнить графы "Данные оператора" и "Модель и номер двигателя". Сначала программа производит измерение угловых ускорений при разгоне без эталонного диска, затем с ним. Программа по заданным формулам высчитывает приведённый к оси вращения вала ротора момент инерции вращающихся масс асинхронного электрического двигателя с учетом потерь.

- нажать кнопку "Стереть флеш" для очистки предыдущей информации с Flash-памяти.

- нажать кнопку "Начать запись".

- запустить асинхронный электрический двигатель.

- когда вал ротора асинхронного электрического двигателя достигнет номинальной угловой скорости, нажать кнопку "Остановить запись".

Далее устанавливается эталонный диск.

- нажать кнопку "Возобновить запись".

- запустить асинхронный электрический двигатель.

- когда вал ротора асинхронного электрического двигателя достигнет номинальной угловой скорости нажать кнопку "Остановить запись".

- нажать кнопку "количество отчетов".

- нажать кнопку "Считать флеш", откроется диалоговое окно с указанием «места» куда сохранять на ПК первый рабочий файл (можно задать название файла), после выбора места нажать "сохранить", далее ожидаем пока красные сигнальные светодиоды около USB шлейфа на АПК перестанут мигать.

- После того, как, красные сигнальные светодиоды около USB шлейфа на АПК перестали мигать, нажимаем кнопку "Стоп". Откроется диалоговое окно с указанием «места» куда сохранять на ПК, второй рабочий файл, после выбора места ждем "сохранить", как правило, рядом с первым файлом.

- Нажать кнопку "Открыть и обработать". Откроется диалоговое окно с указанием «места», где были сохранены рабочие файлы на ПК. Выберите второй рабочий файл, нажмите "открыть", затем снова откроется диалоговое окно с

указанием «места» где были сохранены рабочие файлы на ПК теперь выберете первый рабочий файл и нажмите "открыть".

Глава 10 печать отчета

Выберите пункт основного меню печать.

Проверьте правильность заполнения отобразившейся страницы.

Нажмите кнопку "Печать".

Выберите принтер для печати и проверьте его настройки, печать обычной страницы.

Нажмите кнопку "ОК".

10.1 Печать графиков

1. На каждой из вкладок графиков есть кнопка "Печать".
2. Нажмите кнопку "Печать" на графике который необходимо распечатать.
3. Задайте в печать на альбомной странице.
4. Нажмите кнопку "ОК" .

10.2 Вкладка "Число оборотов"

Вкладка "Число оборотов" предназначена для просмотра массива данных измерения числа оборотов двигателя.

1. Нажмите кнопку "Start" запустите двигатель, подождите пока он выйдет на номинальное количество оборотов, выключите его, подождите пока он остановиться.
2. Нажмите кнопку "Stop", на графике отобразиться зависимость числа оборотов двигателя от времени его работы.

Глава 11 выключение комплекса

1. Сохраните полученные значения и выйдете из программы.
2. Отключите кабель USB от комплекса.

Глава 12 поверка комплекса

Поверку комплекс должен производить персонал, прошедший подготовку по техническому обслуживанию и использованию электроизмерительных приборов.

Перед проведением работ необходимо ознакомиться с техническим описанием и изучить порядок работы на комплексе в соответствии с настоящим руководством. Порядок и наименование проверок приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Порядок и наименование проверок комплекса

Наименование проверок	Номера п.п. методики	Периодичность
1 Внешний осмотр и проверка соответствия комплекса комплектности поставки и документации	9.1	1 раз в год
2 Определение относительной погрешности измерения времени	9.2	1 раз в год
3 Поверка линейных размеров измерительного диска	9.3	

При проведении поверки должны применяться средства измерения, приведённые в таблице 3.

Таблица 3 - Средства измерения

Наименование средств измерения	Характеристики
1 Двигатель с постоянной частотой вращения выходного вала.	
2 Частотомер	
3 Линейка измерительная металлическая	Предел измерения 1-1000, цена деления 1 мм, ТУ 2-034-0851-79
4 Микроскоп измерительный	

Средства измерений, применяемые при поверке, должны быть аттестованы. Допускается применять другие средства измерений, соответствующие заменяемым по точности и диапазонам измерений.

Перед проведением поверки комплекс должен быть выдержан при температуре окружающего воздуха $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ не менее 24 часов.

Глава 13 методики поверки

13.1 Внешний осмотр

Проверку соответствия комплекса комплекту технической документации проводят визуально и с помощью мерительного инструмента. Проверяют:

- комплектность;
- соответствие габаритных размеров;
- отсутствие механических повреждений переключателей, разъёмов, кабелей;
- правильность подключения разъёмов согласно маркировке.

13.2 Определение относительной погрешности измерения времени

Угловые ускорения определяются с помощью инкрементального энкодера компании Autonics, который выдает 5000 импульсов за оборот. Принцип работы оптического энкодера основан на пересечении луча оптопары (светодиоды и фототранзисторы) с размеченным диском, установленным на валу (рисунок 4). В зависимости от частоты разметки диска определяется разрешающая способность датчика и, как следствие, точность измерения угла поворота. Существует несколько разновидностей энкодеров, наибольшее применение нашел инкрементальный (импульсный) энкодер, где происходит последовательный счет меток перемещения и абсолютный, когда для каждого положения вала существует индивидуальный бинарный код. Инкрементальный энкодер предназначен для

формирования импульсов, которые считываются вторичным устройством, позволяющим определить направление движения или углового смещения наблюдаемого механизма. Обычно инкрементальные энкодеры производятся с тремя импульсными выходами. Два из которых определяют скорость и направление движения.

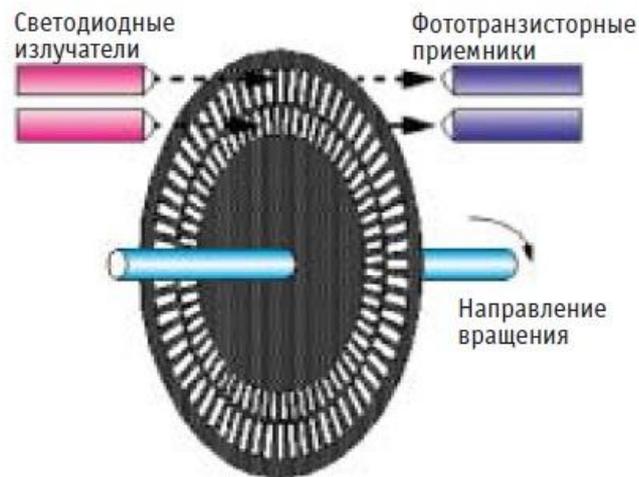


Рисунок 4 - Принцип работы оптического энкодера инкрементального типа

Последовательности импульсов этих выходов сдвинуты друг относительно друга на $1/4$ периода, что реализовано сдвигом оптического диска и расположением оптических пар «излучатель-приемник». Третья последовательность импульсов служит для определения позиции. Этот канал формирует импульс нулевой отметки на один оборот, что позволяет корректировать ошибки в пределах каждого оборота. Подсчетом импульсов за один оборот от нулевой точки можно определять текущее абсолютное положение вращаемого вала. Для нанесения меток на диск используется лазер со специальным алгоритмом калибровки, что позволяет наносить метки с точностью до $0,1$ мкм. В производстве энкодеров южнокорейской компании Autonics используется специальный материал диска DREXON, который устойчив к воздействию воды и сухого пара, а его полимерная основа является гарантом долговечности диска энкодера. Его исключительным оптическим

качеством является прозрачность, которая не зависит от времени эксплуатации и мало чувствительна к окружающим условиям.

Как следует из устройства энкодера, определяемой величиной является время прохождения от одной метки до другой. В АПК используется процессор с 16 МГц частотой, который постоянно опрашивает 7 датчиков. То есть АПК с частотой 2285714 Гц запрашивает положение энкодера. Наш энкодер выдает 5000 импульсов за один оборот. Время прохождения от одной метки до другой отличается и зависит от угловой скорости вращения ротора двигателя. Асинхронный электрический двигатель промышленного исполнения, подключенный к промышленной электрической сети номинальным напряжением 380 В способен развить в асинхронном режиме работы угловую скорость не превышающую 3000 об/мин – 50 об/с (50 Гц). То есть за одну секунду при таких условиях мы получим 250 000 импульсов. Разделим частоту опроса энкодера АПК на количество импульсов $2285714/250000 = 9,14$. Таким образом 9,14 импульса процессора приходятся на прохождение одной метки энкодера при угловой скорости ротора электрического двигателя, равной 3000 об/мин.

Угол между соседними метками энкодера, выдающего 5000 импульсов на один оборот (360°), составляет 0,072 градуса. А на один импульс АПК приходится 0,001125 градуса. Согласно паспортным данным радиус нанесения меток на оптический диск энкодера составляет 0,015 м. Длина окружности оптического диска, на которой нанесены метки энкодера составляет 0,094 м. Линейное расстояние между соседними метками составляет 18,8 мкм.

Согласно паспортным данным точность нанесения одной метки 0,1 мкм. Так как при прохождении от одной метки до другой при угловой скорости 3000 об/мин, процессор АПК посылает на энкодер 9,14 импульса, то погрешность изготовления меток оптического диска, выраженная в импульсах процессора АПК, составляет 0,097 импульса.

Таким образом, точность определения времени поворота оптического диска между двумя соседними метками при угловой скорости ротора электрического двигателя 3000 об/мин будет стремиться к 100 %.

Глава 14 маркировка

На каждом комплексе должны быть указаны:

- наименование предприятия-изготовителя;
- обозначение комплекса и знак Государственного реестра;
- вид климатического исполнения;
- потребляемая мощность;
- напряжение и частота питания;
- заводской номер;
- год выпуска.

Транспортная маркировка должна соответствовать требованиям ГОСТ 14192 и иметь манипуляционные знаки № 1, № 3 и № 11.

Маркировка ПДСИ и транспортной тары должна быть выполнена на русском языке.

Способ нанесения маркировки на средство фотохимический и ударный, на транспортную тару – окраской по трафарету

Качество нанесения маркировки на должно обеспечивать четкое и ясное изображение в течение всего времени эксплуатации.

Глава 15 упаковка

После приемочных испытаний должен быть демонтирован для консервации и последующей упаковки.

Консервация комплекса должна быть выполнена по варианту временной противокоррозионной защиты ВЗ-10 по ГОСТ 9.014-78 с переконсервацией через каждые 3 года в течение срока хранения.

комплекс должны быть упакованы в потребительскую и транспортную тару, выполненную по чертежам предприятия-изготовителя.

Упаковка должна обеспечивать сохранность комплекса при погрузо-разгрузочных работах, транспортировании, хранении и необходимую защиту от климатических и механических факторов.

Масса транспортной тары не должна превышать 5 кг.

Эксплуатационная документация должна быть уложена в пакет и упакована вместе с прибором.

Под верхней крышкой упаковки должен находиться лист, на котором нанесено крупным шрифтом: «Перед распаковкой выдержать при нормальной температуре в течение 4 часов».

Глава 16 Требования безопасности

Требования безопасности по ГОСТ Р 51350, ГОСТ 12.2.003-91, ГОСТ 12.2.007.0-75.

Глава 17 Правила приемки

Порядок предъявления и приемки комплекса.

комплекса подвергаются следующим видам испытаний:

- для утверждения типа;
- приемо-сдаточным.

Объем и последовательность проведения приемо-сдаточных испытаний должны соответствовать табл.4.

Таблица 4 - Объем и последовательность проведения приемо-сдаточных испытаний

Наименование испытаний	Номер пункта	
	технических требований	методов испытаний
1	2	3
Внешний осмотр	1.5	4.3

Проверка массы	1.1.16	4.4
Проверка габаритных размеров	1.1.17	4.4
Определение потребляемой мощности	1.1.1	4.5
Проверка допускаемой относительной погрешности измерения угловой скорости (числа оборотов в минуту) и погрешности измерения ускорений	1.1.14	4.6

Приемо-сдаточные испытания проводит служба технического контроля предприятия-изготовителя в последовательности и объеме, указанном в табл. 4.

Вид контроля – сплошной.

Комплексы, прошедшие приемо-сдаточные испытания, должны иметь в паспорте отметку о приемке.

Комплексы, не прошедшие приемо-сдаточные испытания бракуют и возвращают в производство для устранения дефектов.

Комплексы после устранения неисправностей должны вторично подвергаться приемо-сдаточным испытаниям в полном объеме.

Допускается проводить испытания по требованиям, по которым были получены неудовлетворительные результаты, и по которым испытания не проводились.

Глава 18 Транспортирование и хранение

Транспортирование комплекса в упакованном состоянии может осуществляться в закрытом транспорте любого типа, кроме негерметизированных отсеков самолетов.

Условия транспортирования:

- температура окружающей среды от минус 50 до плюс 50 °С;
- относительная влажность воздуха до 98 % при плюс 25 °С;
- наличие в воздухе пыли и паров агрессивных примесей недопустимо.

Распаковку комплекса производить в сухих отапливаемых помещениях после суточного пребывания в них, в случае, если при транспортировании или хранении окружающая температура была ниже 5 °С.

комплекс в упакованном состоянии должен храниться в закрытом помещении при условиях:

- температура воздуха от минус 50 до плюс 40 °С;
- относительная влажность воздуха не более 98 % при плюс 25 °С.

Глава 19 Гарантии изготовителя

Изготовитель гарантирует соответствие комплекса требованиям настоящих ТУ при соблюдении потребителем условий транспортирования, хранения, монтажа и эксплуатации, установленных ТУ.

Гарантийный срок эксплуатации - 18 месяцев со дня ввода в эксплуатацию, но не более 24 месяцев со дня изготовления. Гарантийный срок хранения – 6 месяцев со дня изготовления.

Приложение 6

Код программы для АПК динамического контроля механических параметров
асинхронных электрических двигателей

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, CPortMonitor, CPort, CPortCtl, Grids, ExtCtrls,
  TeeProcs, TeEngine, Chart, Menus, Series, ComCtrls;
type
  TForm1 = class(TForm)
    ComPort1: TComPort;
    SaveDialog1: TSaveDialog;
    OpenFileDialog1: TOpenDialog;
    Timer1: TTimer;
    MainMenu1: TMainMenu;
    N1: TMenuItem;
    N2: TMenuItem;
    N3: TMenuItem;
    PageControl2: TPageControl;
    TabSheet10: TTabSheet;
    TabSheet13: TTabSheet;
    N4: TMenuItem;
    N5: TMenuItem;
    N6: TMenuItem;
    N7: TMenuItem;
    N8: TMenuItem;
    TabSheet1: TTabSheet;
    TabSheet11: TTabSheet;
    PageControl1: TPageControl;
    TabSheet2: TTabSheet;
    Chart10: TChart;
    Series25: TFastLineSeries;
    TabSheet3: TTabSheet;
    Chart11: TChart;
    Series26: TFastLineSeries;
    Series27: TFastLineSeries;
    PageControl6: TPageControl;
    TabSheet26: TTabSheet;
    Chart3: TChart;
    Series3: TFastLineSeries;
    Series16: TFastLineSeries;
    TabSheet27: TTabSheet;
    Chart9: TChart;
    Series13: TFastLineSeries;
    Series17: TFastLineSeries;
```

TabSheet4: TTabSheet;
Chart12: TChart;
Series28: TFastLineSeries;
TabSheet5: TTabSheet;
Chart13: TChart;
Series30: TFastLineSeries;
TabSheet6: TTabSheet;
Chart14: TChart;
Series32: TFastLineSeries;
TabSheet7: TTabSheet;
Chart4: TChart;
Series4: TFastLineSeries;
Series24: TFastLineSeries;
PageControl3: TPageControl;
TabSheet8: TTabSheet;
PageControl7: TPageControl;
TabSheet15: TTabSheet;
Chart6: TChart;
Series6: TFastLineSeries;
Series10: TFastLineSeries;
Series14: TFastLineSeries;
TabSheet16: TTabSheet;
Chart5: TChart;
Series5: TFastLineSeries;
Series22: TFastLineSeries;
Series23: TFastLineSeries;
TabSheet9: TTabSheet;
PageControl4: TPageControl;
TabSheet18: TTabSheet;
Chart8: TChart;
Series8: TFastLineSeries;
Series9: TFastLineSeries;
Series15: TFastLineSeries;
TabSheet19: TTabSheet;
Chart7: TChart;
Series7: TFastLineSeries;
Series20: TFastLineSeries;
Series21: TFastLineSeries;
TabSheet14: TTabSheet;
PageControl5: TPageControl;
TabSheet22: TTabSheet;
Chart1: TChart;
Series2: TFastLineSeries;
Series11: TFastLineSeries;
Series12: TFastLineSeries;
TabSheet23: TTabSheet;
Chart2: TChart;
Series1: TFastLineSeries;
Series18: TFastLineSeries;
Series19: TFastLineSeries;
TabControl1: TTabControl;
Label16: TLabel;

Button10: TButton;
Label17: TLabel;
Label18: TLabel;
Button11: TButton;
Button12: TButton;
Button13: TButton;
TabControl2: TTabControl;
Button14: TButton;
Button19: TButton;
Button18: TButton;
Button17: TButton;
Label19: TLabel;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
TabControl3: TTabControl;
Label22: TLabel;
Label23: TLabel;
Label10: TLabel;
Label11: TLabel;
Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Label14: TLabel;
Label1: TLabel;
Label2: TLabel;
Label3: TLabel;
Label4: TLabel;
Label5: TLabel;
TabControl4: TTabControl;
Label24: TLabel;
Edit1: TEdit;
Label25: TLabel;
Label26: TLabel;
Label27: TLabel;
Label28: TLabel;
Label29: TLabel;
CheckBox1: TCheckBox;
CheckBox2: TCheckBox;
CheckBox3: TCheckBox;
CheckBox4: TCheckBox;
CheckBox5: TCheckBox;
CheckBox6: TCheckBox;
CheckBox7: TCheckBox;
CheckBox8: TCheckBox;
CheckBox9: TCheckBox;
CheckBox10: TCheckBox;
CheckBox11: TCheckBox;
CheckBox12: TCheckBox;
CheckBox13: TCheckBox;
Panel3: TPanel;
Panel5: TPanel;
Panel7: TPanel;
Panel8: TPanel;

```
Panel9: TPanel;
Panel11: TPanel;
Panel12: TPanel;
Panel13: TPanel;
Panel14: TPanel;
Panel15: TPanel;
Panel10: TPanel;
Panel16: TPanel;
Panel17: TPanel;
Panel18: TPanel;
Panel19: TPanel;
Panel20: TPanel;
Panel21: TPanel;
Panel22: TPanel;
Panel23: TPanel;
Panel24: TPanel;
Panel1: TPanel;
Panel2: TPanel;
Panel4: TPanel;
Panel6: TPanel;
TabSheet12: TTabSheet;
Chart15: TChart;
Series29: TFastLineSeries;
Series31: TFastLineSeries;
Series33: TFastLineSeries;
Series34: TFastLineSeries;
Edit2: TEdit;
Label6: TLabel;
Timer2: TTimer;
TabControl5: TTabControl;
Label7: TLabel;
Label8: TLabel;
Label9: TLabel;
Label15: TLabel;
Label30: TLabel;
TabControl6: TTabControl;
Label31: TLabel;
Label32: TLabel;
Label33: TLabel;
Label34: TLabel;
Label35: TLabel;

procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
procedure Button7Click(Sender: TObject);
procedure Button8Click(Sender: TObject);

procedure Button9Click(Sender: TObject);
procedure Button10Click(Sender: TObject);
```

```

procedure Button11Click(Sender: TObject);
procedure Button12Click(Sender: TObject);
procedure Button13Click(Sender: TObject);
procedure Button14Click(Sender: TObject);
procedure Button16Click(Sender: TObject);

procedure ComPort1RxChar(Sender: TObject; Count: Integer);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure Button19Click(Sender: TObject);
procedure Button18Click(Sender: TObject);
procedure Button20Click(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);

procedure Button17Click(Sender: TObject);
procedure Button15Click(Sender: TObject);
procedure N7Click(Sender: TObject);
procedure N4Click(Sender: TObject);
procedure N6Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox8Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox9Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox10Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox11Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox12Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox13Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox1Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox2Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox3Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox4Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox5Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox6Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox7Click(Sender: TObject);
procedure Timer2Timer(Sender: TObject);

private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
crc,rs:byte;
indata:array[1..300]of integer;
data_time1:array[1..999999]of real;
data_time2:array[1..999999]of real;
data_U1:array[1..999999]of real;
data_U2:array[1..999999]of real;
data_U3:array[1..999999]of real;
data_J1:array[1..999999]of real;
data_J2:array[1..999999]of real;
data_J3:array[1..999999]of real;
Sum_power:array[1..999999]of real;
Sum_power1:array[1..999999]of real;
oboroty2:array[1..999999]of real;
oboroty1:array[1..999999]of real;
Ugl_uskor1:array[1..999999]of real;

```

```

Ugl_uskor2:array[1..999999]of real;
data_time_kor1:array[1..999999]of real;
data_time_kor2:array[1..999999]of real;
ugl_speed1:array[1..999999]of real;
ugl_speed2:array[1..999999]of real;
Mom_iner:array[1..999999]of real;
oboroty_sr:array[1..999999]of real;
Mech_power:array[1..999999]of real;
Krut_mom:array[1..999999]of real;
all_time:array[1..999999]of real;
//data:array[1..20000000]of integer;
f_55:boolean;
f_AA:boolean;
f_551:boolean;
f_AA1:boolean;
zapis:boolean;
Z:string;
sym:byte;
nc,z3,ax,kolbyte,nc1,nct,b6,kolbyte2,vz,kolbyteall,end_point:integer;
Stream: TFileStream;
J_d,sred_mom_iner, min, mech, sred_mech_power:real;

end;

var
  Form1: TForm1;

implementation

{$R *.dfm}

const
  stDay : array[1..7] of string[11] =
    ('воскресенье','понедельник','вторник',
     'среда','четверг','пятница','суббота');

  stMonth : array[1..12] of string[8] =
    ('января','февраля','марта',
     'апреля','мая','июня','июля',
     'августа','сентября','октября',
     'ноября','декабря');

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  ComPort1.Connected:=false;
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  ComPort1.Connected:=true;
  ///crc :=$21 xor $37 xor $02 xor $01;

```

```
Z:=#$07;//+##$37+##$02+##$01+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
end;
```

```
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
```

```
begin
ComPort1.Connected:=true;
///crc :=$21 xor $37 xor $02 xor $01;
Z:=#$03;//+##$37+##$02+##$01+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
end;
```

```
procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
```

```
begin
ComPort1.Connected:=true;
///crc :=$21 xor $37 xor $02 xor $01;
Z:=#$0E;//+##$37+##$02+##$01+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
end;
```

```
procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
```

```
begin
ComPort1.Connected:=true;
///crc :=$21 xor $37 xor $02 xor $01;
Z:=#$11;//+##$37+##$02+##$01+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
end;
```

```
procedure TForm1.Button7Click(Sender: TObject);
```

```
begin
ComPort1.Connected:=true;
///crc :=$21 xor $37 xor $02 xor $01;
Z:=#$0D;//+##$37+##$02+##$01+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
end;
```

```
procedure TForm1.Button8Click(Sender: TObject);
```

```
begin
ComPort1.Connected:=true;
///crc :=$21 xor $37 xor $02 xor $01;
Z:=#$12;//+##$37+##$02+##$01+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
end;
```

```
procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```

ComPort1.Connected:=true;
///crc :=$21 xor $37 xor $02 xor $01;
Z:=#$37;//+#$37+#$02+#$01+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
end;

```

```

procedure TForm1.Button10Click(Sender: TObject);
begin
ComPort1.Connected:=true;
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $0A;
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$0A+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
{
Button10.Visible:=false;
Button11.Visible:=true;
Button12.Visible:=false;
Button13.Visible:=false;

Button17.Visible:=false;
Button14.Visible:=false;
Button19.Visible:=false;
Button18.Visible:=false; }
end;

```

```

procedure TForm1.Button11Click(Sender: TObject);

begin
ComPort1.Connected:=true;
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $14;
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$14+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
{
Button10.Visible:=false;
Button11.Visible:=false;
Button12.Visible:=true;
Button13.Visible:=false;

Button17.Visible:=false;
Button14.Visible:=false;
Button19.Visible:=false;
Button18.Visible:=false;}
end;

```

```

procedure TForm1.Button12Click(Sender: TObject);

begin
ComPort1.Connected:=true;
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $1E;
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$1E+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
Timer1.Enabled:=true;
{

```

```

Button10.Visible:=false;
Button11.Visible:=false;
Button12.Visible:=false;
Button13.Visible:=true;

```

```

Button17.Visible:=false;
Button14.Visible:=true;
Button19.Visible:=false;
Button18.Visible:=false;}
end;

```

```

procedure TForm1.Button13Click(Sender: TObject);

```

```

begin
ComPort1.Connected:=true;
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $28;
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$28+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
{
Button10.Visible:=false;
Button11.Visible:=false;
Button12.Visible:=true;
Button13.Visible:=false;

Button17.Visible:=false;
Button14.Visible:=false;
Button19.Visible:=false;
Button18.Visible:=false;  }
end;

```

```

procedure TForm1.Button14Click(Sender: TObject);

```

```

begin
nct:=0;
  if SaveDialog1.Execute then
  begin
    Stream := TFileStream.Create(SaveDialog1.FileName + 'anapa.dat', fmCreate);
    end;
Stream.Position:= Stream.Size;

ComPort1.Connected:=true;
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $33;
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$33+#$7C;
ComPort1.WriteStr(z);
{
Button10.Visible:=false;
Button11.Visible:=false;
Button12.Visible:=false;
Button13.Visible:=false;

Button17.Visible:=false;
Button14.Visible:=false;

```

```

Button19.Visible:=true;
Button18.Visible:=false;
    }
end;

```

```

procedure TForm1.Button16Click(Sender: TObject);

```

```

begin
ComPort1.Connected:=true;
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $32;
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$32+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);
end;

```

```

procedure TForm1.ComPort1RxChar(Sender: TObject; Count: Integer);

```

```

var i:word;
    sss:string;
    ee,f,f1,f2,f3,f4,f5,nomer1,nomer:integer;
    rds:real;

```

```

begin
//label11.Caption:=format('%d',[Count]);
ComPort1.ReadStr(sss,count);
for I := 1 to count do
begin

```

```

rds:= ord(sss[i]);

```

```

    if (zapis) then begin
        Stream.WriteBuffer(rds, SizeOf(rds));
        nc1:=nc1+1;
        if (nc1>2111) then begin
            zapis:=false;
            ComPort1.WriteStr(Z);
            nc1:=0;
        end
    end
else

```

```

    if (not f_AA) then begin
        if (rds=$56) then begin f_AA:=true; nc:=0; sym:=0; sym := sym xor 24 xor 86; end
        else begin f_AA:=false; f_55:=false; end;
        if (not f_55) then begin
            if (rds=$18) then begin f_55:=true end
            else begin f_55:=false; f_AA:=false end;
        end;
    end

```

```

end
else

```

```

begin
rs:=strtoint(floattostr(rds));
nc:=nc+1;

```

```

indata[nc] := rs;

    if (indata[2]=70) then begin
        Z:=#$2F+#$62+#$02+#$3D+#$72;
        ComPort1.WriteStr(Z);

        //label8.Caption:= inttostr(nct);
        f_55:=false; f_AA:=false;
        indata[2]:=0;
        label1.Caption:=('Чтение 1 завершено');
        zapis:=false;
    end;
    if (indata[2]=71) then begin
        label2.Caption:=('Чтение 2 завершено');
        f_55:=false; f_AA:=false;
        indata[2]:=0;
        //label9.Caption:= inttostr(nct);
    end;

if (indata[2]=60) then begin ax:= 6 end else
    if (indata[2]=50) then begin ax:= 6 end else ax:=2;
if (indata[2]=51) then begin
    zapis:=true; f_55:=false; f_AA:=false; indata[2]:=0;
end
else

if nc > ax then
begin
    f_AA := false;
    f_55 := false;
    if sym<>rs then
    begin
        z3:=z3+1;
        Label5.Caption:=inttostr(z3);//ошибки src
        continue;
    end
else
    begin
        if (indata[2]=11) then begin label2.Caption:= ('Стирание 2'); end;
        if (indata[2]=12) then begin label1.Caption:= ('Стирание 1'); end;
        if (indata[2]=13) then begin label2.Caption:= ('Очищено 2'); end;
        if (indata[2]=14) then begin label1.Caption:= ('Очищено 1'); end;

        if (indata[2]=21) then begin label2.Caption:= ('Запись начата 2'); end;
        if (indata[2]=22) then begin label1.Caption:= ('Запись начата 1'); end;
        if (indata[2]=23) then begin label2.Caption:= ('Память заполнена 2'); end;
        if (indata[2]=24) then begin label1.Caption:= ('Память заполнена 1'); end;
        if (indata[2]=25) then begin label1.Caption:= ('Ошибка памяти'); label2.Caption:= ('Ошибка
памяти'); end;

        if (indata[2]=30) then begin label2.Caption:= ('Запись остановлена2'); end;
        if (indata[2]=31) then begin label1.Caption:= ('Запись остановлена1'); end;

```

```

    if (indata[2]=40) then begin label1.Caption:= ('Запись продолжена'); label2.Caption:= ('Запись
продолжена'); end;

```

```

    if (indata[2]=50) then begin ee:=((indata[3]) shl 24) or (indata[4] shl 16)+(indata[5] shl
8)+indata[6];

```

```

        label4.Caption:= inttostr ((ee+1)*2112);
        kolbyte:= (ee+1)*2112;
        end;

```

```

    if (indata[2]=60) then begin ee:=((indata[3]) shl 24) or (indata[4] shl 16)+(indata[5] shl
8)+indata[6];

```

```

        label3.Caption:= inttostr ((ee+1)*2112);
        kolbyte2:= (ee+1)*2112;
        end;

```

```

    end;

```

```

end

```

```

else

```

```

    sym := sym xor rs;

```

```

    end;

```

```

end;

```

```

end;

```

```

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);

```

```

begin

```

```

ComPort1.Connected:=false; vz:=0;

```

```

ax:=2; zapis:=false; z3:=0;b6:=0; nc1:=0; nc:=0; sym:=0; kolbyte:=100; Z:=#$95;

```

```

Timer1.Enabled:=false;

```

```

{

```

```

Button10.Visible:=true;

```

```

Button11.Visible:=false;

```

```

Button12.Visible:=false;

```

```

Button13.Visible:=false;

```

```

Button17.Visible:=true;

```

```

Button14.Visible:=false;

```

```

Button19.Visible:=false;

```

```

Button18.Visible:=false; }

```

```

end;

```

```

procedure TForm1.Button19Click(Sender: TObject);

```

```

begin

```

```

ComPort1.Connected:=false;

```

```

Stream.Free;

```

```

//label8.Caption:= inttostr(nct);

```

```

zapis:=false;

```

```

kolbyteall:=(kolbyte+kolbyte2) div 12;

```

```

if SaveDialog1.Execute then

```

```

begin

```

```

Stream := TFileStream.Create(SaveDialog1.FileName + 'anapa.siz', fmCreate);

```

```

end;
Stream.Position:= Stream.Size;
    Stream.WriteBuffer(kolbyteall, SizeOf(kolbyteall));
Stream.Free;
{
Button10.Visible:=false;
Button11.Visible:=false;
Button12.Visible:=false;
Button13.Visible:=false;

Button17.Visible:=false;
Button14.Visible:=false;
Button19.Visible:=false;
Button18.Visible:=true; }
end;

procedure TForm1.Button18Click(Sender: TObject);
var

ee,f,f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7,f8,nomer1,nomer,f9,nomer2,nomer3,nomer4,ti,start_zap,data_old,nomer_end,ti
k,i,nomer_start:integer;
    nomer_start1,ti1,tik1,nomer_end1: integer;
    q,q1:string;
    t9,t91,summa,summa8,summa6,summa1,summa5,summa7,sector_rad:real;
    summar,summar8,summar6,summar1,summar5,summar7,a:real;
    J1,J2,J3,U1,U2,U3,N_obor:real;
    count,j,znak: integer;
    raznica,s,s1,s2,data_min1,data_min: real;

begin

nc:=0;z3:=0;ax:=0;kolbyte:=0;nc1:=0;nct:=0;b6:=0;kolbyte2:=0;vz:=0;kolbyteall:=0;end_point:=0;
    if OpenFileDialog1.Execute then
    begin
        try
            Stream := TFileStream.Create(OpenDialog1.FileName + ", fmOpenRead);
        except
            exit;
        end;
        Stream.ReadBuffer(kolbyteall,SizeOf(kolbyteall));
        Stream.Free;

        end;

        if OpenFileDialog1.Execute then
        begin
            try
                Stream := TFileStream.Create(OpenDialog1.FileName + ", fmOpenRead);
            except
                exit;
            end;
        end;
    end;

```

```

Series2.Clear;Series12.Clear;Series10.Clear;Series6.Clear;Series14.Clear;Series9.Clear;

Series8.Clear;Series15.Clear;Series18.Clear;Series1.Clear;Series19.Clear;Series22.Clear;Series5.Clear
;

Series24.Clear;Series32.Clear;Series30.Clear;Series28.Clear;Series17.Clear;Series13.Clear;Series24.C
lear;

Series4.Clear;Series16.Clear;Series3.Clear;Series11.Clear;Series23.Clear;Series20.Clear;Series7.Clear
;

Series21.Clear;Series25.Clear;

// kolbyteall:=(kolbyte+kolbyte2) div 12;
//
nc:=0;z3:=0;ax:=0;kolbyte:=0;nc1:=0;nct:=0;b6:=0;kolbyte2:=0;vz:=0;kolbyteall:=0;end_point:=0;
Z:=Z; f1:=0; f2:=0; f3:=0;f4:=0;tik:=0; f5:=0; f6:=0; t9:=0; t91:=0; nomer1:=1;
nomer2:=1;nomer3:=1;nomer4:=1;nomer:=1;
f7:=0;f8:=0; f9:=0; summa:=0;summa8:=0; summa6:=0;
summa1:=0;summa5:=0;summa7:=0;data_old:=0; data_min:=65536;data_min1:=65536;
nomer_start:=0;
summar:=0;summar8:=0; summar6:=0; summar1:=0;summar5:=0;summar7:=0;
N_obor:=0; ti:=0; start_zap:=0;nomer_end:=0;
f_AA1:=false; f_551:=false; f_AA:=false; f_55:=false; nomer_start1:=0;
nc1:=0; vz:=1;ti1:=0;tik1:=0;nomer_end1:=0; count:=0;j:=0;
raznica:=0;

for f:=0 to (kolbyteall) do
begin
Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
// t9:=data[nc1];

{ stringgrid1.Cells[vz,nc1]:=floattostr(t9);
stringgrid1.Cells[0,nc1]:=inttostr(nc1);
nc1:=nc1+1;
if (nc1>2111) then begin nc1:= 0; vz:=vz+1; end;

end; }
//////////***** Ток 3 *****//////////
if (t9=251) then begin
Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t91));
Stream.ReadBuffer(t91,SizeOf(t91));
q:=floattostr(t9);
q1:=floattostr(t91);
ee:=((strtoint(q) shl 8) + strtoint(q1));
J3:=((ee-summar1)*0.000038147)/0.0015;
data_J3[f1]:=J3;
//Series11.AddXY(f1,J3,",clGreen);
if (f1<4000) then begin summa1:=summa1+ee; end;
if (f1=4000) then begin summa1:= summa1/4000; end;
f1:=f1+1;

//////////***** напряжение3 *****//////////

```

```

Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t91));
// if (t9=251) then begin
Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t91));
Stream.ReadBuffer(t91,SizeOf(t91));
q:=floattostr(t9);
q1:=floattostr(t91);
ee:=(strtoint(q) shl 8) + strtoint(q1);
U3:=((ee-summar)*0.0248148);//0.000038147)*1001;
data_U3[f2]:=U3;
//Series2.AddXY(f2,U3,"clGreen); //напряжение3
if (f2<4000) then begin summa:=summa+ee; end;
if (f2=4000) then begin summar:= summa/4000; end;
f2:=f2+1;
// end;

//////////***** энкодер *****//////////
Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t91));
// if (t9=252) then begin
Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
Stream.ReadBuffer(t91,SizeOf(t91));
q:=floattostr(t9);
q1:=floattostr(t91);
ee:=(strtoint(q) shl 8) + strtoint(q1);

//Series13.AddXY(f3,ee,"clGreen);
f3:=f3+1;
// end;

Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t91));
// if (t9=252) then begin
Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
Stream.ReadBuffer(t91,SizeOf(t91));
q:=floattostr(t9);
q1:=floattostr(t91);
ee:=(strtoint(q) shl 8) + strtoint(q1);
if (ee=0) then begin ee:=1; end;
if (start_zap=0) then begin if (ee>30) then begin start_zap:=1; nomer_start:=f4; end;
end;

if (start_zap=1) then begin
data_time1[ti]:=ee;
if (data_time1[ti]<data_min) then begin
tik:=0;data_min:=data_time1[ti]; nomer_end:=ti; end;
if (tik=2000 ) then begin
start_zap:=2; end;
tik:=tik+1;
ti:=ti+1;
end;

if (start_zap=2) then begin if (ee<30) then begin start_zap:=3; end; end;
if (start_zap=3) then begin if (ee>30) then begin start_zap:=4; nomer_start1:=f4; end;
end;

```

```

all_time[f4]:= ee;
Series25.AddXY(f4,ee,"clBlack);

f4:=f4+1;
// end;
end

else
//////////***** ток1 *****//////////
if (t9=253) then begin
  Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
  Stream.ReadBuffer(t91,SizeOf(t91));
  q:=floattostr(t9);
  q1:=floattostr(t91);
  ee:=(strtoint(q) shl 8) + strtoint(q1);
  J1:=((ee-summar5)*0.000038147)/0.0015;
  data_J1[f5]:=J1;
  //Series10.AddXY(f5,J1,"clBlack); //ток 1
  if (f5<4000) then begin summa5:=summa5+ee; end;
  if (f5=4000) then begin summar5:= summa5/4000; end;
  f5:=f5+1;
  //end;
  //////////***** напряжение1 *****//////////
  Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
  //if (t9=253) then begin
  Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
  Stream.ReadBuffer(t91,SizeOf(t91));
  q:=floattostr(t9);
  q1:=floattostr(t91);
  ee:=(strtoint(q) shl 8) + strtoint(q1);
  U1:=((ee-summar6)*0.02469287);//*0.000038147)*1001;
  data_U1[f6]:=U1;
  //Series6.AddXY(f6,U1,"clWhite); //напряжение 1
  if (f6<4000) then begin summa6:=summa6+ee; end;
  if (f6=4000) then begin summar6:= summa6/4000; end;
  f6:=f6+1;
  // end;
  //////////***** ток2 *****//////////
  Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
  // if (t9=254) then begin
  Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
  Stream.ReadBuffer(t91,SizeOf(t91));
  q:=floattostr(t9);
  q1:=floattostr(t91);
  ee:=(strtoint(q) shl 8) + strtoint(q1);
  J2:=((ee-summar7)*0.000038147)/0.0015;
  data_J2[f7]:=J2;
  //Series9.AddXY(f7,J2,"clRed); //ток 2
  if (f7<4000) then begin summa7:=summa7+ee; end;
  if (f7=4000) then begin summar7:= summa7/4000;end;
  f7:=f7+1;

```

```

// end;
//////////***** напряжение2 *****//////////
Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
//if (t9=254) then begin
Stream.ReadBuffer(t9,SizeOf(t9));
Stream.ReadBuffer(t91,SizeOf(t91));
q:=floattostr(t9);
q1:=floattostr(t91);
ee:=(strtoint(q) shl 8) + strtoint(q1);
U2:=((ee-summar8)*0.0248148);//*0.000038147)*1001;
data_U2[f8]:=U2;
//Series8.AddXY(f8,U2,"clGreen); //напряжение 2
  if (f8<4000) then begin summa8:=summa8+ee; end;
  if (f8=4000) then begin summa8:= summa8/4000; end;
f8:=f8+1;
// end;

end
end;

end;
Stream.Free;

//////////***** расчет и отображение в графиках *****//////////

//////////***** выравнивание единичных выбросов *****//////////
znak:= strtoint(edit2.Text);
for i:=nomer_start+1 to f4 do begin
if (abs (all_time[i]-all_time[i-1])>znak) then begin
  all_time[i]:= (all_time[i-1]+all_time[i+1])/2;
end;
//Series34.AddXY(i,all_time[i],"clGreen);
end;

//////////***** аппроксимация "полок" *****//////////
for i:=nomer_start+1 to f4 do begin
if (all_time[i]=all_time[i-1]) then begin count:=count+1; end
else begin
  if (count=0) then begin
    data_time_kor1[i]:=all_time[i];
  end;

  if (count>0) then begin
    raznica:=((all_time[i]-all_time[(i-count)-1])/(count+1));
    data_time_kor1[(i-count)-1]:=all_time[(i-count)-1];
    for j:=i-count to i do begin
      data_time_kor1[j]:=data_time_kor1[j-1]+raznica;
    end;
    count:=0;
  end;
end;
end;
end;
end;

```

```
//////////***** перезапись массива *****//////////
```

```
for i:=2 to f4 do begin
  all_time[i]:= data_time_kor1[i];
  Series33.AddXY(i,all_time[i],"clGreen);
end;
```

```
//////////***** поиск зон разгона *****//////////
```

```
ti:=0; tik:=0; data_min:=65000;  //1-й пуск
for i:=nomer_start+1 to f4 do begin
  data_time_kor1[ti]:=all_time[i];
  if (data_time_kor1[ti]<data_min) then begin
    tik:=0;data_min:=data_time_kor1[ti]; nomer_end:=ti; end;
  if (tik=2000 ) then begin
    break; end;
  tik:=tik+1;
  ti:=ti+1;
end;
```

```
ti1:=0; tik1:=0; data_min1:=65000;  //2-й пуск
for i:=nomer_start+1 to f4 do begin
  data_time_kor2[ti1]:=all_time[i];
  if (data_time_kor2[ti1]<data_min1) then begin
    tik1:=0;data_min1:=data_time_kor2[ti1]; nomer_end1:=ti1; end;
  if (tik1=2000 ) then begin
    break; end;
  tik1:=tik1+1;
  ti1:=ti1+1;
end;
```

```
if (nomer_end>nomer_end1) then begin end_point:= nomer_end1; end
else begin end_point:= nomer_end; end;
```

```
for i:=1 to end_point do begin
```

```
Series26.AddXY(i,data_time_kor1[i],"clGreen);
Series27.AddXY(i,data_time_kor2[i],"clGreen);
```

```
end;
```

```
//////////***** BAX 1 *****//////////
```

```
for i:=nomer_start to (nomer_start+nomer_end) do begin
  a:= (i-nomer_start)*(1/15000);
  Series11.AddXY(a,data_J3[i],"clGreen);
  Series2.AddXY(a,data_U3[i],"clGreen);
  Series12.AddXY(a,(data_U3[i]*data_J3[i]),"clGreen);
  Series10.AddXY(a,data_J1[i],"clBlack);
  Series6.AddXY(a,data_U1[i],"clGreen);
  Series14.AddXY(a,(data_U1[i]*data_J1[i]),"clGreen);
  Series9.AddXY(a,data_J2[i],"clBlack);
  Series8.AddXY(a,data_U2[i],"clGreen);
  Series15.AddXY(a,(data_U2[i]*data_J2[i]),"clGreen);
```

```

Sum_power[i-
nomer_start]:=(data_U3[i]*data_J3[i])+(data_U2[i]*data_J2[i])+(data_U1[i]*data_J1[i]);
Series4.AddXY(a,Sum_power[i-nomer_start],"clGreen);

end;
////////////////////////***** BAX 1 *****////////////////////////////////////
for i:=nomer_start1 to (nomer_start1+nomer_end1) do begin
  a:= (i-nomer_start1)*(1/15000);
Series18.AddXY(a,data_J3[i],"clGreen);
Series1.AddXY(a,data_U3[i],"clGreen);
Series19.AddXY(a,(data_U3[i]*data_J3[i]),"clGreen);
Series22.AddXY(a,data_J1[i],"clBlack);
Series5.AddXY(a,data_U1[i],"clGreen);
Series23.AddXY(a,(data_U1[i]*data_J1[i]),"clGreen);
Series20.AddXY(a,data_J2[i],"clBlack);
Series7.AddXY(a,data_U2[i],"clGreen);
Series21.AddXY(a,(data_U2[i]*data_J2[i]),"clGreen);
Sum_power1[i-
nomer_start1]:=(data_U3[i]*data_J3[i])+(data_U2[i]*data_J2[i])+(data_U1[i]*data_J1[i]);
Series24.AddXY(a,Sum_power1[i-nomer_start1],"clGreen);

end;
{
////////////////////////***** аппроксимация массива времен 1 *****////////////////////////////////////
for i:=2 to nomer_end do begin
  if (data_time1[i]=data_time1[i-1]) then begin count:=count+1; end
  else begin
    if (count=0) then begin
      data_time_kor1[i]:=data_time1[i];
      end;

    if (count>0) then begin
      raznica:=((data_time1[i]-data_time1[(i-count)-1])/(count+1));
      data_time_kor1[(i-count)-1]:=data_time1[(i-count)-1];
      for j:=i-count to i do begin
        data_time_kor1[j]:=data_time_kor1[j-1]+raznica;
        end;
      count:=0;
    end;
  end;
end;

count:=0;
////////////////////////***** аппроксимация массива времен 2 *****////////////////////////////////////
for i:=2 to nomer_end1 do begin
  if (data_time2[i]=data_time2[i-1]) then begin count:=count+1; end
  else begin
    if (count=0) then begin
      data_time_kor2[i]:=data_time2[i];
      end;

    if (count>0) then begin

```

```

raznica:=((data_time2[i]-data_time2[(i-count)-1])/(count+1));
data_time_kor2[(i-count)-1]:=data_time2[(i-count)-1];
for j:=i-count to i do begin
data_time_kor2[j]:=data_time_kor2[j-1]+raznica;
end;
count:=0;
end;
end;
end; }

//////////***** приведение временных интервалов к числу оборотов, выравнивание
MAССИВОВ*****//////////
sector_rad:=(360/(180/3.14))/5000; ///5000 количество отсчетов энкодера, сектор в радианах.

if (nomer_end>nomer_end1) then begin end_point:= nomer_end1; end
else begin end_point:= nomer_end; end;

for i:=1 to end_point do begin
oboroty1[i]:=60/((data_time_kor1[i]/24000000)*5000);
oboroty2[i]:=60/((data_time_kor2[i]/24000000)*5000);
oboroty_sr[i]:=(oboroty1[i]+oboroty2[i])/2;

a:= i*(1/15000);///координаты реального времени, частота дискретизации 15000Гц
Series3.AddXY(a,oboroty1[i],"clGreen);
Series16.AddXY(a,oboroty2[i],"clGreen);

Series4.AddXY(oboroty1[i],Sum_power[i],"clGreen); ///зависимость полной мощности от
частоты вращения
Series24.AddXY(oboroty2[i],Sum_power1[i],"clGreen);

ugl_speed1[i]:=(sector_rad/(data_time_kor1[i]/24000000));///угловая скорость 1 рад/сек.
ugl_speed2[i]:=(sector_rad/(data_time_kor2[i]/24000000));///угловая скорость 2 рад/сек.

end;

//////////***** расчет угловых ускорений *****//////////

for i:=2 to end_point do begin
Ugl_uskor1[i]:=(ugl_speed1[i]-ugl_speed1[i-1])/(1/15000); ///угловое ускорение 1 рад/*сек^2
Ugl_uskor2[i]:=(ugl_speed2[i]-ugl_speed2[i-1])/(1/15000); ///угловое ускорение 2 рад/*сек^2
a:= i*(1/15000);///координаты реального времени, частота дискретизации 15000Гц
Series13.AddXY(oboroty_sr[i],Ugl_uskor1[i],"clGreen);
Series17.AddXY(oboroty_sr[i],Ugl_uskor2[i],"clGreen);
end;

//////////***** МОМЕНТ ИНЕРЦИИ *****//////////
J_d:=strtofloat(edit1.Text); min:=0;
for i:=2 to end_point do begin
Mom_iner[i]:=(Ugl_uskor2[i]*J_d)/(Ugl_uskor1[i]-Ugl_uskor2[i]);
Series28.AddXY(oboroty_sr[i],Mom_iner[i],"clGreen);
min:=min+Mom_iner[i];
end;

```

```

sred_mom_iner:=min/(end_point-2);
label34.Caption:= floattostr(abs(sred_mom_iner));

////////////////////////////////***** крутящий момент *****////////////////////////////////

for i:=2 to end_point do begin
  Krut_mom[i]:=Mom_iner[i]*Ugl_uskor2[i];
  Series30.AddXY(obodoty_sr[i],Krut_mom[i],"clGreen);
end;

////////////////////////////////***** МОЩНОСТЬ *****////////////////////////////////
  mech:=0;
for i:=2 to end_point do begin
  Mech_power[i]:=Krut_mom[i]*(obodoty_sr[i]/60);
  Series32.AddXY(obodoty_sr[i],Mech_power[i],"clGreen);
  mech:=mech+Mech_power[i];
end;
sred_mech_power:=mech/(end_point-2);
label35.Caption:= floattostr(abs(sred_mech_power));

{
Button10.Visible:=true;
Button11.Visible:=false;
Button12.Visible:=false;
Button13.Visible:=false;

Button17.Visible:=true;
Button14.Visible:=false;
Button19.Visible:=false;
Button18.Visible:=false; }
end;

procedure TForm1.Button20Click(Sender: TObject);
begin
  if SaveDialog1.Execute then
  begin
    Stream := TFileStream.Create(SaveDialog1.FileName + 'anapa.dat', fmCreate);
    end;
    // zapis:=true;
end;

procedure TForm1.Timer1Timer(Sender: TObject);
begin
  Timer1.Enabled:=false;

ComPort1.Connected:=true;
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $32;
Z:=$2F+$62+$02+$32+chr(crc);
ComPort1.WriteStr(z);

crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $3C;
Z:=$2F+$62+$02+$3C+chr(crc);

```

```
ComPort1.WriteString(z);
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.Button17Click(Sender: TObject);
```

```
var
```

```
Z: string;
```

```
begin
```

```
ComPort1.Connected:=true;
```

```
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $3C;
```

```
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$3C+chr(crc);
```

```
ComPort1.WriteString(z);
```

```
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $32;
```

```
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$32+chr(crc);
```

```
ComPort1.WriteString(z);
```

```
{
```

```
Button10.Visible:=false;
```

```
Button11.Visible:=false;
```

```
Button12.Visible:=false;
```

```
Button13.Visible:=false;
```

```
Button17.Visible:=false;
```

```
Button14.Visible:=true;
```

```
Button19.Visible:=false;
```

```
Button18.Visible:=false; }
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.Button15Click(Sender: TObject);
```

```
var
```

```
Z: string;
```

```
begin
```

```
nct:=0;
```

```
ComPort1.Connected:=true;
```

```
crc :=$2F xor $62 xor $02 xor $3D;
```

```
Z:=#$2F+#$62+#$02+#$3D+chr(crc);
```

```
ComPort1.WriteString(z);
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.N7Click(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
Series2.Clear;Series12.Clear;Series10.Clear;Series6.Clear;Series14.Clear;Series9.Clear;
```

```
Series8.Clear;Series15.Clear;Series18.Clear;Series1.Clear;Series19.Clear;Series22.Clear;Series5.Clear
```

```
;
```

```
Series24.Clear;Series32.Clear;Series30.Clear;Series28.Clear;Series17.Clear;Series13.Clear;Series24.C  
lear;
```

```
Series4.Clear;Series16.Clear;Series3.Clear;Series11.Clear;Series23.Clear;Series20.Clear;Series7.Clear
```

```
;
```

```
        Series21.Clear; Series25.Clear;
end;

procedure TForm1.N4Click(Sender: TObject);
begin
    Button18.Click;
end;

procedure TForm1.N6Click(Sender: TObject);
begin
    Form1.close;
end;

procedure TForm1.CheckBox8Click(Sender: TObject);
var
    s:integer;
begin
    for s:=1 to 3 do
        chart6.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox8.Checked;
    end;
end;

procedure TForm1.CheckBox9Click(Sender: TObject);
var
    s:integer;
begin
    for s:=1 to 3 do
        chart5.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox9.Checked;
    end;
end;

procedure TForm1.CheckBox10Click(Sender: TObject);
var
    s:integer;
begin
    for s:=1 to 3 do
        chart8.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox10.Checked;
    end;
end;

procedure TForm1.CheckBox11Click(Sender: TObject);
var
    s:integer;
begin
    for s:=1 to 3 do
        chart7.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox11.Checked;
    end;
end;

procedure TForm1.CheckBox12Click(Sender: TObject);
var
    s:integer;
begin
    for s:=1 to 3 do
        chart1.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox12.Checked;
    end;
end;
```

```
procedure TForm1.CheckBox13Click(Sender: TObject);
var
s:integer;
begin
for s:=1 to 3 do
chart2.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox13.Checked;
end;
```

```
procedure TForm1.CheckBox1Click(Sender: TObject);
var
s:integer;
begin
for s:=1 to 2 do
chart3.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox1.Checked;
end;
```

```
procedure TForm1.CheckBox2Click(Sender: TObject);
var
s:integer;
begin
for s:=1 to 2 do
chart9.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox2.Checked;
end;
```

```
procedure TForm1.CheckBox3Click(Sender: TObject);
var
s:integer;
begin
for s:=1 to 1 do
chart12.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox3.Checked;
end;
```

```
procedure TForm1.CheckBox4Click(Sender: TObject);
var
s:integer;
begin
for s:=1 to 1 do
chart13.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox4.Checked;
end;
```

```
procedure TForm1.CheckBox5Click(Sender: TObject);
var
s:integer;
begin
for s:=1 to 1 do
chart14.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox5.Checked;
end;
```

```
procedure TForm1.CheckBox6Click(Sender: TObject);
var
s:integer;
```

```
begin
for s:=1 to 2 do
chart4.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox6.Checked;
end;

procedure TForm1.CheckBox7Click(Sender: TObject);
var
s:integer;
begin
for s:=1 to 3 do
chart10.series [s-1].Marks.Visible:=checkbox7.Checked;
end;

procedure TForm1.Timer2Timer(Sender: TObject);
var
Time: TDateTime; // текущее время
Present: TDateTime; // текущая дата и время
Year, Month, Day : Word; // год, месяц и число, как
// отдельные числа
begin
Time := Now(); // получить системное время
Label7.Caption := FormatDateTime('hh:mm:ss',Time);

Present:= Now; // получить текущую дату
DecodeDate(Present, Year, Month, Day);
Label8.Caption := IntToStr(Day)+ ' ' + stMonth[Month] + ' '+ IntToStr(Year)+ ' года ';
Label30.Caption :=stDay[DayOfWeek(Present)];

end;

end.
```