

05.09.03
Т583



На правах рукописи

Топольский Дмитрий Валерианович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Специальность 05 09 03 – “Электротехнические комплексы
и системы, включая их управление и регулирование”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 2000

Работа выполнена на кафедре "Электротехника" Южно-Уральского государственного университета.

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Гладышев С.П.
- Научный консультант – кандидат технических наук, доцент
Смолин В.И.
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Усынин Ю.С.;
кандидат технических наук, доцент
Петров Г.А.
- Ведущее предприятие – ОАО "Трубодеталь" г. Челябинск.

Защита состоится 27 апреля 2000 г., в 10⁰⁰ часов, на заседании диссертационного совета Д053.13.07 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, аудитория 244.

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

Автореферат разослан 22 марта 2000г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



А.И. Сидоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вращающий момент является независимой переменной электрических машин, характеризующей усилие, передаваемое вращающимся валом. На разных этапах научно-технического прогресса появлялись различные методы и технические средства определения вращающего момента для решения конкретных технических задач. Сложная природа этой физической величины, широкая специфика применения и разнообразие условий, в которых требуется контролировать механический момент, не позволяют разработать универсальный метод его измерения. Наличие большого числа существующих и создаваемых методов нахождения этой независимой переменной свидетельствует об актуальности этой задачи.

Высокая потребность в получении информации о механическом моменте обусловлена массовым внедрением в производство автоматизированных систем управления технологическими процессами, созданием новых видов средств передвижения, разработкой новых испытательных стендов и другими факторами. К таким факторам следует отнести проблему механических поломок оборудования вследствие перегрузок вращающихся частей.

Современный уровень развития техники предъявляет к методам и средствам определения вращающего момента требования высоких эксплуатационных качеств и экологичности. Поэтому представляется логичным при определении механического момента использовать уже имеющиеся в любом электроприводе выходы сигналов для контрольно-измерительной аппаратуры. Широкое развитие аналого-цифровой и вычислительной техники позволяет применять такие методы измерения, для реализации которых еще недавно не было технических возможностей. Учет этих возможностей создает предпосылки для разработки новых методов и алгоритмов определения вращающего момента, дополняющих и развивающих уже существующие.

Все вышесказанное дает основание считать, что тема диссертации является актуальной научной задачей.

Цель работы – разработка и апробация метода определения вращающего момента, приспособленного к применению в автоматизированном эксперименте.

Идея работы – вычисление вращающего момента электрических машин по их собственным электрическим параметрам и регулируемым координатам в реальном масштабе времени.

Научные положения, разработанные лично автором, и новизна.

1. Для определения вращающего момента электрических машин различных типов достаточно измерять их токи, напряжения, частоту вращения и температуру обмоток.

2. Потери мощности в электрических машинах могут быть учтены через токи, напряжения, частоту вращения и набор констант, адаптирующих измерительное устройство к конкретному типу электрической машины.

3. При измерении токов, напряжений и частоты вращения с точностью 0,5% относительная ошибка определения вращающего момента на основе энергетического подхода не превышает 3%.

Обоснованность, достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются корректным применением методов цифрового моделирования, структурного анализа, идентификации, оптимизации, математической статистики. При составлении уравнений электрических машин использовался комбинированный подход к анализу электромагнитного преобразования энергии, сочетающий в себе методы теории поля и методы теории цепей. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Значение работы. *Научное значение работы* заключается в разработке нового метода определения вращающего момента и алгоритмов его реализации для наиболее распространенных типов электрических машин; разработке методики прогнозирования ожидаемой точности измерения вращающего момента в зависимости от допусков на отклонения входных параметров измерительного устройства; в установлении влияния на точность измерения

температурной нестабильности обмоток электрических машин для номинальных и ненормальных режимов работы; создании методики определения зависимости точности измерения вращающего момента в зависимости от КПД и полезной мощности электрических машин; получении зависимостей суммы магнитных и механических потерь мощности от частоты вращения для двигателей различных типов, что позволяет определить вид аналитического выражения для учета потерь мощности в алгоритмах вычисления вращающего момента.

Практическое значение работы заключается в создании ряда методик, включающих разработку пакетов прикладных программ для IBM PC, позволяющих в короткие сроки и с высоким качеством адаптировать измеритель момента к конкретной электрической машине.

Разработанный метод определения применим к различным типам электрических машин. Он позволяет с учетом различных требований определять вращающий момент в реальном масштабе времени сравнительно простыми техническими средствами. Применение современных вычислительных средств и устройств микроэлектроники для реализации разработанного метода позволяет внедрять его в системы управления различных систем и комплексов.

Отказ от сравнительно дорогостоящей механической части в конструкции измерителей вращающего момента повышает эффективность их применения. Невысокая стоимость, достаточно высокая точность измерения, а также разработанные методики и программное обеспечение, делают подобные измерительные устройства весьма доступными для применения в различных сферах деятельности.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Методика определения коэффициентов потерь мощности в электродвигателях, входящих в состав автоматизированной линии по производству панелей, внедрена в цехе № 5 АО "Трубодеталь" в г. Челябинске.

Методика бесконтактного определения вращающего момента и программное обеспечение для IBM PC используются в ходе лабораторных работ по курсу электротехники и научно-исследовательской работы студентов на кафедре электротехники Южно-Уральского государственного университета.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на VII международной конференции в области силовой электроники EPE'97 (Трондхейм, Норвегия), на IV международной конференции по использованию новых информационных технологий в преподавании электротехнических дисциплин NITE'98 (Астрахань), на международной конференции в области автомобилестроения SAE'2000 (Детройт, США), на научно-технических конференциях ЮУрГУ.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 145 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 2 таблицы, список использованной литературы из 98 наименований, 5 приложений, включая 2 акта внедрения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, поставлены цели и задачи исследования, приведены данные о структуре диссертации, представлены результаты работы и ее апробация.

В первой главе диссертации представлено современное состояние вопроса определения вращающего момента. Исследование выполнено методом обзора, выполненного в результате анализа первоисточников и позволяющего систематизировать научные данные о вопросе исследования.

Проведенный обзор методов определения вращающего момента электрических машин, а также анализ методов преобразования, используемых в

различных моментомерах, показывает, что ни один из типов моментомеров не позволяет удовлетворить всему разнообразию требований, предъявляемых к определению механического момента в различных применениях.

Несмотря на специализированность применения моментомеров, можно выделить общие недостатки, присущие многим измерителям в целом. Большинство моментомеров плохо приспособлены к автоматизации процессов измерения. Многие моментомеры определяют статический момент, который не дает представления об ударных нагрузках и биениях валов. Весьма проблематичным представляется определение механического момента в условиях неустойчивых (переходных) режимов работы. Существующие методы определения динамического момента дают лишь общее представление о характере измеряемой величины. Многие методы определения вращающего момента электрических машин связаны с большими затратами энергии. Это делает их весьма дорогостоящими, неэкономичными и не удовлетворяющими требованиям экологии.

Существует ряд тенденций в развитии методов и средств измерения вращающего момента электрических машин. Прежде всего, развиваются измерительные комплексы, использующие цифровую запись мгновенных процессов. Одновременно улучшаются существующие и разрабатываются новые методы и алгоритмы обработки и представления информации. Особые преимущества представление изучаемых сигналов в цифровой форме дает при изучении случайных процессов, а также при испытаниях электрических машин на надежность. В настоящее время преимущество отдается энергосберегающим технологиям измерения вращающего момента. Эти технологии предполагают рекуперацию электрической энергии в питающую сеть, а также отсутствие механического контакта первичных измерительных преобразователей с вращающимся валом.

Проведенный анализ дает предпосылки необходимости разработки новых бесконтактных методов определения вращающего момента, построенных на

учете энергетических преобразований в электрической машине и удобно реализуемых с применением вычислительной техники.

Вторая глава посвящена анализу электромеханических преобразований энергии в электрических машинах и разработке метода определения вращающего момента на базе проведенного анализа. В основу проведенного анализа положен метод представления электромеханического преобразователя в виде многополосника, предложенный И.П.Копыловым. Также вторая глава содержит алгоритмы определения вращающего момента электрических машин по их собственным параметрам с применением энергетического подхода.

Проведенный анализ преобразования энергии в электрических машинах показывает, что использование энергетического подхода позволяет получить взаимосвязь между их различными параметрами. Известные уравнения электромагнитного момента электрических машин содержат трудно контролируемые параметры, в частности, магнитный поток, и не учитывают ряд факторов, что затрудняет непосредственное использование их для определения механического момента. На практике широко используют методы приближенного определения механического момента и мощности на валу электрических машин по их собственным электрическим параметрам. Этому способствует простота технической реализации этих методов. Часто вращающий и тормозной моменты электрических машин определяют по току. В некоторых случаях применяют более сложные оценки, учитывая ток возбуждения машин постоянного тока и скольжение ротора асинхронных машин.

Предлагаемый метод предназначен для более точного определения механического момента электрических машин по их собственным параметрам. Этот метод базируется на контроле за энергетическими преобразованиями, происходящими в электрической машине, и ориентирован на применение в этих целях современных измерительных и вычислительных средств. Алгоритм определения механического момента содержит следующие уравнения:

$$P_2 = P_1 \pm \Sigma \Delta P_1, \quad (1)$$

$$P_2 = \omega \times M, \quad (2)$$

$$M = \frac{P_1 \pm \Sigma \Delta P_1}{\omega}, \quad (3)$$

где P_2 – механическая мощность на валу машины, P_1 – электрическая мощность, ω – угловая частота вращения, M – механический (вращающий или тормозной) момент, $\Sigma \Delta P_1$ – сумма потерь мощности, знак “+” соответствует генераторному режиму работы, знак “-” соответствует двигательному режиму работы.

Уравнение (3) является наиболее удобной математической моделью для физической реализации измерительного устройства. Это объясняется тем, что две наиболее весомых величины P_1 и ω , входящие в уравнение (3), можно достаточно точно контролировать относительно простыми техническими средствами. Третья величина $\Sigma \Delta P_1$ составляет лишь малую часть общей мощности. Требования к точности определения данной величины менее жесткие, зависят от КПД электрической машины и существенно снижаются с ростом КПД. Следует учитывать, что при определении вращающего момента величина $\Sigma \Delta P_1$ включает только те потери, которые имеют место в основном процессе преобразования энергии.

Параметры, от которых зависят суммарные потери мощности, относятся к группе факторов, не подлежащих точному учету. Начальные отклонения и случайные вариации этих параметров в процессе эксплуатации могут быть значительными. В то же время имеется устойчиво-закономерная зависимость отдельных составляющих потерь мощности от ряда контролируемых величин: тока, напряжения, частоты вращения, температуры обмоток машины и других. Такие зависимости удобно учитывать программным путем, имея в составе измерителя вычислительные устройства (например, микроконтроллер).

Точный контроль величин P_1 и ω , учет закономерных изменений суммы потерь мощности программными методами, а также оптимизация начальных значений параметров создают вполне реальные предпосылки для достижения

современных требований по точности определения механического момента электрических машин. Определенным преимуществом данного метода является то, что дополнительные устройства на валу электрических машин при этом не требуются и механический контакт с вращающимся валом отсутствует.

С точки зрения физической реализуемости данного метода и получения максимально достоверной информации о механическом моменте на валу электрической машины необходимо решить задачу выбора наиболее оптимальных алгоритмов обработки информации в измерительном устройстве, работающем в комплексе с машиной. Помимо этого следует выявить зависимости различных составляющих потерь мощности от параметров, которые поддаются непосредственному измерению. Такими параметрами прежде всего, являются ток, напряжение, угловая частота вращения и сопротивление обмоток. Кроме этих параметров желательно принимать во внимание и температуру обмоток электрических машин.

Решение поставленных задач получено в ходе проведения анализа потерь мощности в электрических машинах. Принципы работы измерительного устройства, ориентированного на широкий класс трехфазных электрических машин и машин постоянного тока, базируются на известных аналитических описаниях энергетических процессов электрических машин. Приводимые ниже аналитические зависимости следует рассматривать в контексте с решаемой задачей как средство изложения решения.

Мощность P_1 электрических машин целесообразно контролировать путем численного интегрирования мгновенной мощности:

$$P_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u_{AB}(k) \times i_A(k) - u_{BC}(k) \times i_C(k)), \quad (4)$$

$$P_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u_a(k) \times i_a(k)), \quad (5)$$

где $u_{AB}(k)$, $u_{BC}(k)$, $i_A(k)$, $i_C(k)$ – мгновенные значения линейных напряжений и токов трехфазной машины, соответствующих k -му измерению их на периоде T с постоянным шагом T/N , N – количество измерений за период; $u_a(k)$ и $i_a(k)$ – мгновенные значения напряжения и тока якоря машины постоянного тока.

Аналогично решается задача определения эффективных и средних значений токов и напряжений электрических машин. Например:

$$I_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_A^2(k)}, \quad (6)$$

$$U_A = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_A(k). \quad (7)$$

Интегральная оценка электрических сигналов позволяет учесть энергетические составляющие высших гармоник. Применение цифровой фильтрации повышает помехоустойчивость и быстродействие измерительного устройства.

Суммарные потери мощности машин переменного и постоянного тока представлены в виде суммы трех составляющих:

$$\Sigma \Delta P_1 = \Delta P_{эл} + \Delta P_{магн} + \Delta P_{мех}, \quad (8)$$

где $\Delta P_{эл}$ – электрические потери мощности, $\Delta P_{магн}$ – потери мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи, $\Delta P_{мех}$ – механические потери мощности на трение и вентиляцию.

Применение программного метода контроля потерь мощности позволяет учесть их зависимость от параметров электрической машины:

$$\Delta P_{эл} = c_1 \times I^2 \times (1 + \alpha \times (t - t_{ном})) + \Delta U_{щ} \times I, \quad (9)$$

$$\Delta P_{магн} = c_2 \times U^2 \times \omega^2, \quad (10)$$

$$\Delta P_{мех} = \omega \times (c_3 + c_4 \times \omega), \quad (11)$$

где I и U – линейные ток и напряжение трехфазной машины или ток якоря и напряжение обмотки возбуждения машины постоянного тока, t и $t_{ном}$ – измеряемая температура и номинальная температура электрической машины, α – температурный коэффициент сопротивления, $\Delta U_{щ}$ – суммарное падение напряжения на переходах “щетка-коллектор”, $c_1 \dots c_4$ – константы, посредством которых устройство адаптируется к конкретному типу электрической машины. В качестве таких констант приняты величины, определяемые традиционным путем проведения опытов холостого хода и короткого замыкания. Ориентировочные значения констант можно определить по основным данным

электрических машин. Квадратичная аппроксимация в уравнениях (10) и (11) является компромиссным решением, упрощающим техническую реализацию устройства. Применение более точного описания магнитно-механических потерь мощности не исключено, но может оказаться малоэффективным вследствие отмеченного ранее фактора случайности.

В третьей главе диссертации разработаны и проанализированы методы реализации алгоритмов определения вращающего момента, построенных на основе энергетического подхода, с помощью современных вычислительных аппаратных средств и использования новых информационных технологий.

Структурная схема измерительного устройства на базе микроконтроллера устройства представлена на рис.1.



Рис.1. Структурная схема микропроцессорного измерителя вращающего момента

Предлагаемый метод определения механического момента может быть реализован на стандартном оборудовании. Измерительное устройство включает измерительные преобразователи тока (ИП1), напряжения (ИП2), частоты вращения (ИП3) и температуры (ИП4), а также многоканальную аналого-цифровую систему сбора данных (АЦССД) и микроконтроллер. Результаты измерения выводятся на светодиодный дисплей. Устройство имеет возможность обмениваться информацией с внешними устройствами

посредством интерфейса RS-232C. Благодаря такой структуре измеритель вращающего момента может быть использован отдельно, а также как компонент системы управления. При необходимости более сложной обработки информации легко осуществить сопряжение подобного измерительного устройства с более мощным вычислительным устройством. Также подобная структура измерителя позволяет использовать этот измеритель в мультимикроконтроллерных системах децентрализованного управления на протяженных объектах (производственная линия, прокатный стан и др.).

Известно, что микроконтроллеры вследствие специфики своего устройства более приспособлены для применения в системах управления, чем для использования в системах обработки информации. Для обработки информации более подходят вычислительные машины классического типа. В силу своего широкого распространения все чаще в системах сбора и обработки данных применяются IBM-совместимые персональные компьютеры. В главе 3 представлены измерительные системы, содержащие персональный компьютер и одну или несколько плат сбора данных, а также на базе крейт-контроллеров. Подобные измерительные системы позволяют передавать информацию об измеренном моменте на большие расстояния через компьютерную сеть Internet.

Четвертая глава содержит результаты исследования динамических свойств измерителя вращающего момента, использующего разработанные алгоритмы работы. Исследование проведено методом динамического моделирования с применением математической модели обобщенной электрической машины. При составлении уравнений электрических машин использовался комбинированный подход к анализу электромагнитного преобразования энергии. Этот подход сочетает в себе методы теории поля, развивающиеся на основе уравнений Максвелла, и методы теории цепей, базирующиеся на основе уравнений Кирхгофа. Исследование выполнено для различных типовых режимов работы электрических машин. На основе анализа результатов динамического моделирования и известных методов исследования

систем автоматического управления рассмотрена эквивалентная структурная схема измерителя.

Основной целью проведенного исследования по динамике было сопоставление момента на валу электрической машины с моментом, измеренным аналого-цифровым устройством по разработанному алгоритму (рис.2). Учитывая, что по сравнению с другими типами электрических машин наилучшими качествами с точки зрения регулирования обладают машины постоянного тока, для проверки работы электронного измерителя момента в динамическом режиме была выбрана математическая модель машины постоянного тока.

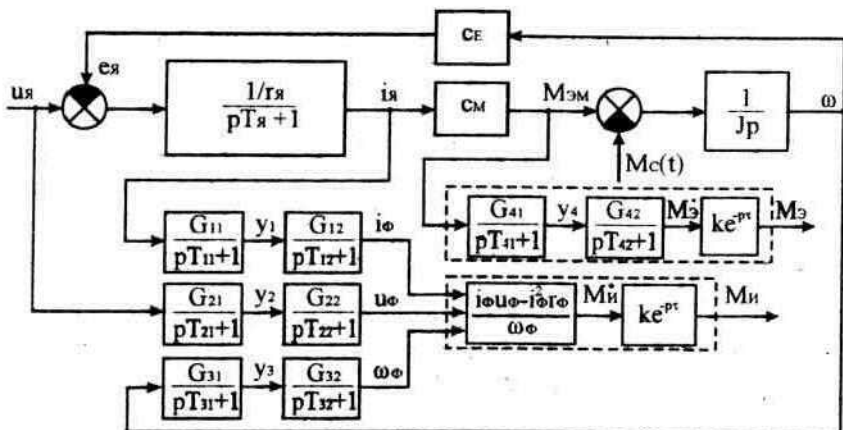


Рис.2. Математическое описание динамической модели

Собственная динамика измерительных устройств, работающих на вышеупомянутом принципе, была приведена в следующей постановке задачи. Каждый измерительный канал описан дифференциальным уравнением 2 порядка, что соответствует наличию в каждом канале линейного фильтра, где T_{11} , T_{12} , T_{21} , T_{22} , T_{31} , T_{32} – постоянные времени фильтров; G_{11} , G_{12} , G_{21} , G_{22} , G_{31} , G_{32} – коэффициенты усиления фильтров; i_ϕ , u_ϕ , ω_ϕ – отфильтрованные ток, напряжение и угловая скорость соответственно; y_1 , y_2 , y_3 – переменные

состояния фильтров в каналах измерения тока, напряжения и угловой скорости якоря соответственно:

$$\frac{dy_1}{dt} = -y_1 \frac{T_{11} + T_{12}}{T_{11} T_{12}} - \frac{i_p}{T_{11} T_{12}} + \frac{G_{11} G_{12}}{T_{11} T_{12}} i_a \quad (12)$$

$$\frac{di_p}{dt} = y_1 \quad (13)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = -y_2 \frac{T_{21} + T_{22}}{T_{21} T_{22}} - \frac{u_p}{T_{21} T_{22}} + \frac{G_{21} G_{22}}{T_{21} T_{22}} u_a \quad (14)$$

$$\frac{du_p}{dt} = y_2 \quad (15)$$

$$\frac{dy_3}{dt} = -y_3 \frac{T_{31} + T_{32}}{T_{31} T_{32}} - \frac{\omega_p}{T_{31} T_{32}} + \frac{G_{31} G_{32}}{T_{31} T_{32}} \omega \quad (16)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} = y_3 \quad (17)$$

Наличие цифрового вычислительного устройства в измерителе вращающего момента обуславливает дискретный характер его работы. Входными сигналами данного цифрового звена являются ток i_f , напряжение u_f и угловая скорость вращения ω_f электрической машины. Переменная M_n^* является результатом вычисления момента по нелинейному алгоритму, без учета дискретности измерителя. На вычисление требуется некоторое время τ . Выходным сигналом измерителя является момент M_n .

В процессе исследования показания измерителя M_n сравнивались со значением электромагнитного момента $M_{ЭМ}$. Результаты реакции такой системы на скачкообразное изменение M_c приведены на рис.3. Рис.3,а соответствует идеальному источнику питания, рис.3,б демонстрирует случай с питанием от управляемого выпрямителя, а рис.3,в случай с широтно-импульсным преобразователем. Эквивалентное значение измеренного момента M_n получено путем преобразования значения электромагнитного момента $M_{ЭМ}$, которое на цифровой модели может быть определено точно.

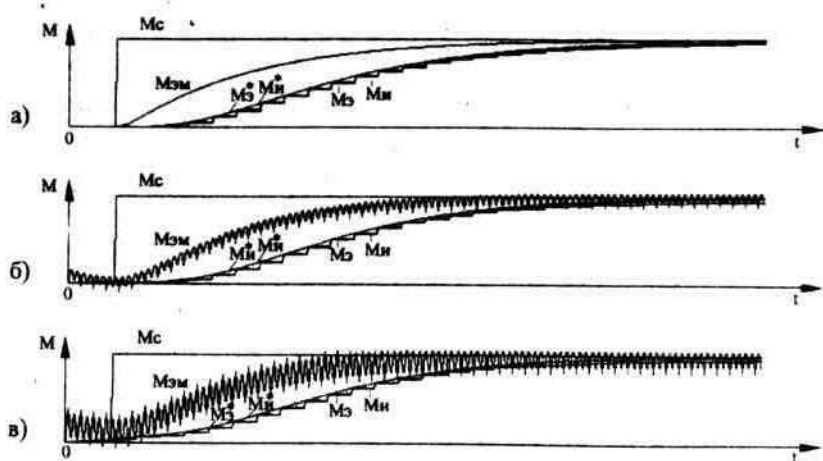


Рис.3. Сравнение результатов определения вращающего момента по разработанному алгоритму и по эквивалентной функции

Пятая глава представляет опытно-экспериментальную часть исследования. В ней представлены результаты разработки методик определения коэффициентов потерь мощности расчетным путем по конструктивным параметрам электрических машин и экспериментальным методом. Там же представлен опытный образец микропроцессорного измерителя вращающего момента и результаты его испытаний. Приводится оценка точностных характеристик измерителей подобного типа. Завершают пятую главу результаты разработки и применения компьютерных программ, позволяющих определять вращающий момент электрических машин по их собственным параметрам на основе энергетического подхода.

Коэффициенты потерь мощности можно приближенно вычислить по конструктивным параметрам электрических машин, применив алгоритм, включающий следующие этапы: 1) построение энергетической диаграммы, 2) выявление составляющих потерь мощности, 3) подбор известных аналитических выражений, описывающих отдельные составляющие потерь через конструктивные параметры электрической машины; 4) построение энергетической диаграммы.

Опытное определение коэффициентов потерь мощности проводилось в лабораторных условиях с машинами постоянного и переменного тока. Результатом проведения этих опытов стало получение набора констант, необходимых для адаптации моментомера, определяющего вращающий момент по формуле (3), к конкретному типу электрической машины. Также были апробированы различные методики получения набора констант. На рис.4 представлены результаты определения суммы магнитных и механических потерь для двигателей постоянного тока серии 2ПН100МГУХЛ4.

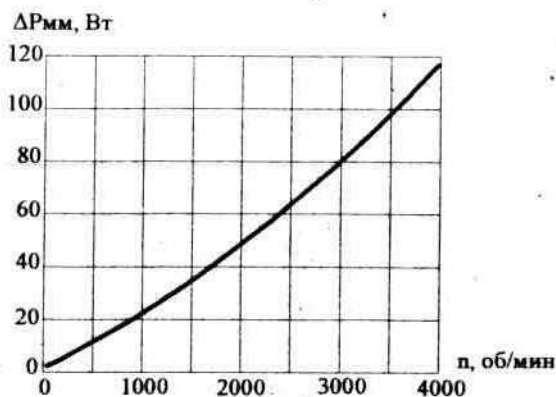


Рис. 4. Зависимость суммы магнитных и механических потерь от частоты вращения для двигателя постоянного тока 2ПН100МГУХЛ4

Опытный образец микропроцессорного измерителя момента выполнен в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис.1. Данное измерительное устройство предназначено для совместной работы с нерегулируемым асинхронным двигателем в составе автомобильного испытательного стенда. Устройство должно обеспечивать измерение вращающего момента в диапазоне от 0 до 1,2 номинального значения с погрешностью, не превышающей 3%. В соответствии с этими требованиями измерительные преобразователи имеют проектный класс точности 0,5%, а цифровая информация передается в микроконтроллер в 8-разрядном цифровом коде. Показания предварительно настроенного измерителя сравнивались с

тормозным моментом нагрузочного устройства асинхронного двигателя (индукционно-вихревого тормоза). Испытания показали, что погрешность измерительного устройства содержала аддитивную составляющую. За вычетом этой составляющей отклонения момента имели разброс в пределах 1,8...2,0% (рис.5). Закономерность разброса повторными испытаниями не подтвердилась. Существенная мультипликативная составляющая погрешности, а также систематический характер отклонения характеристики от линейной, не обнаружены. Значения констант приведены в табл. 1.

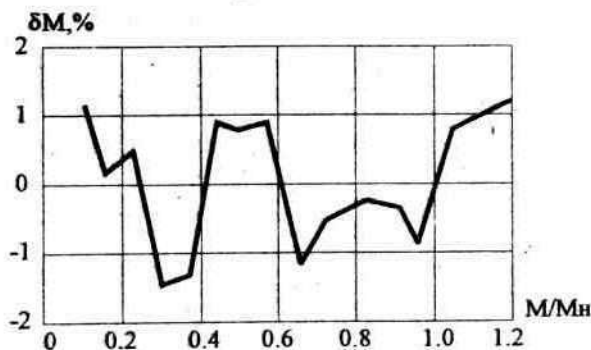


Рис.5. Результаты испытаний опытного образца измерителя

Таблица 1

Значения коэффициентов потерь мощности

Коэффициенты	$c_1, \text{ Ом}$	$c_2, (\text{Вт} \times \text{с}^2) / (\text{В}^2 \times \text{рад}^2)$	$c_3, \text{ Н}$	$c_4, \text{ с}^2 / (\text{Ом} \times \text{рад}^2)$
Значения	16,021	0,627	$3,211 \times 10^{-8}$	0

Исследование точностных характеристик алгоритма определения вращающего момента электрических машин проведено путем математического моделирования. При моделировании решалась задача определения области допустимых изменений основных параметров измерительного устройства, при которых погрешность измерения не превышает заданный уровень. Исследование выполнено методом статистических испытаний для двигателей постоянного тока. Коэффициенты потерь были получены как опытным, так и расчетным путем по конструктивным параметрам для различных типов машин.

Для входных параметров измерителя выбрано равномерное распределение. Для погрешности измерения крутящего момента получено распределение, подобное нормальному. Среднее значение ошибки измерения определено с вероятностью $P = 0.9973$ при объеме выборки 10000 точек.

По результатам исследования разработана методика определения приемлемых для технической реализации допусков δI , δU , $\delta \omega$, δt° на погрешность измерения токов, напряжений, частоты вращения и температуры обмоток машины. Допуск δt° непосредственно связан с допуском δr на погрешность измерения сопротивления обмоток. Аналогично назначаются допуски $\delta P_{\text{мех}}$ и $\delta P_{\text{элект}}$ на погрешность программного учета магнитных и механических потерь мощности. Результаты моделирования для случая, когда погрешность измерителя не превышает пределы $\delta M = \pm 2.5\%$, приведены в табл. 2. На рис.6 показана зависимость приведенной погрешности измерителя δM от коэффициента полезного действия электрических машин η для вышеуказанной области параметрических возмущений.

Таблица 2

Область отклонения параметров измерительного устройства

Параметры	$\delta I, \delta U, \delta \omega$	δt°	δr	$\Delta P_{\text{мех}}$	$\Delta P_{\text{элект}}$	δM
Отклонения	$\pm 0.5\%$	$\pm 10^\circ\text{C}$	$\pm 4.0\%$	$\pm 15\%$	$\pm 10\%$	$\pm 2.5\%$

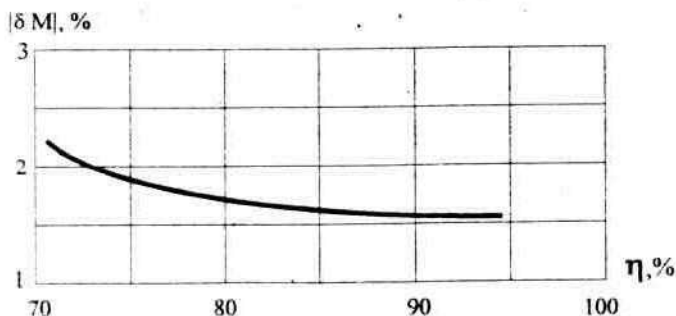


Рис 6. Зависимость приведенной ошибки измерения вращающего момента от КПД электрических машин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации дано новое решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в определении вращающего момента электрических машин по их собственным параметрам. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования привели к следующим результатам и выводам:

1. Разработан метод определения вращающего момента на валу электрических машин по собственным электрическим переменным, основанный на контроле за энергетическими преобразованиями в электрических машинах. Метод характеризуется бесконтактностью, быстродействием и точностью, а также возможностью отказа от сложной и дорогостоящей механической части измерителей момента.
2. Получены соответствующие алгоритмы реализации метода определения вращающего момента для электрических машин постоянного и переменного тока. Алгоритмы универсальны и исходят из набора основных контролируемых электрических величин: тока, напряжения и скорости вращения вала электрической машины. Потери мощности учитываются программным путем.
3. Создана методика программного учета потерь мощности в электрических машинах. Разработанная методика позволяет контролировать с помощью вычислительного устройства потери мощности в электрической машине через набор контролируемых переменных, а также посредством ряда констант, которые адаптируют измеритель к конкретному типу машины.
4. Предложена методика определения коэффициентов потерь мощности по конструктивным параметрам электрических машин, дающая возможность настраивать моментомер по справочным данным электрической машины.
5. Получена методика определения точности измерения вращающего момента на основе энергетического подхода, позволяющая определить область

допусков на отклонения входных параметров измерителя и оценить точность измерения вращающего момента на основе статистических методов. Данная методика также позволяет оценить точность определения вращающего момента в зависимости от КПД электрических машин.

6. Построена динамическая модель цифрового измерителя механического момента и динамические модели "управляемый выпрямитель (УВ) – машина постоянного тока (МПТ) – цифровой измеритель момента (ЦИМ)" и "широотно-импульсный преобразователь (ШИП) – МПТ – ЦИМ". Эти динамические модели позволяют исследовать как собственную динамику измерителя, так и в составе электропривода, что позволит проводить корректное проектирование систем, включающих подобный измеритель.

7. Результаты исследований внедрены на АО "Трубодеталь" (г. Челябинск) на автоматизированной линии по производству панелей и в учебный процесс на кафедре электротехники Южно-Уральского государственного университета.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гладышев С.П. и др. Использование новых информационных технологий для определения вращающего момента электрических машин / С.П. Гладышев, В.И. Смолин, Д.В. Топольский, Н.Н. Гудаев //Материалы международной научно-методической конференции NITE '98.– Астрахань, 1998. –С.136-139.

2. Смолин В.И. и др. Об одном методе определения вращающего момента электрических машин./ В.И. Смолин, Д.В. Топольский, Н.Н. Гудаев //Электричество. – 1999. – № 7. –С.27-30.

3. Смолин В.И., Топольский Д.В. Виртуальный измеритель вращающего момента// Методика вузовского преподавания: Тезисы 3-й междувузовской научно-методической конференции. –Челябинск, 1999. –С.152-153.

4. Автомобильный генератор с импульсным возбуждением ротора/ Гладышев С.П., Топольский Д.В., Мокшин С.Ю.; Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск, 1999. – 9с.: ил.8, библиогр. 1 назв. Рус. Деп. в ВИНТИ 28.06.99, №2078-В99.

5. Измеритель крутящего момента для тяговых автомобильных стендов / Смолин В.И., Топольский Д.В., Мокшин С.Ю.; Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск, 1999. – 8с.: ил. 2, библиогр. 1 назв. Рус. Деп. в ВИНТИ 21.12.99, №3795-В99.
6. Smolin V.I., Topolsky D.V., Gudaev N.N. Measurement of a torque of the electrical machines according to their electrical parameters: EPE Conference '97, Proceedings, Vol.3, Brussels, 1997. -P.3305-3307.
7. Gladyshev S.P., Sheshukov V.V., Topolsky D.V. The Car Generator with External Excitation of the Rotor. SAE BRASIL '98, paper number 982868, San Paulo, 1998
8. Gladyshev S.P., Smolin V.I., Topolsky D.V. The Torque Meter for Car Test Stands. SAE '2000, paper number 2000-01-1335, Detroit, 2000.



Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 28.02.2000. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1.
Тираж 70 экз. Заказ 132/102.

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