

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Алматинский университет энергетики и связи

Кафедра Электропривод и автоматизация промышленных установок

П.И. Сагитов

М.А. Мустафин

Н.К. Алмуратова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Методические указания к выполнению магистерских диссертации

по специальности 6М071800 - Электроэнергетика

Алматы 2010

СОСТАВИТЕЛЬ: П.И. Сагитов., Мустафин М.А., Н.К. Алмуратова.
Магистерская диссертация. Методические
указания к выполнению магистерских диссертации по специальности
6М071800 – Электроэнергетика, специализации - Электропривод и
автоматизация технологических процессов. - Алматы: АУЭС, 2009. - 30с

В методических указаниях сформулированы требования к магистерской работе, к ее написанию и защите. Магистерская диссертация является завершающим этапом обучения соискателя академической степени по программе магистранта. Методические указания предназначены магистранту и научному руководителю по специальности 6М071800 - Электроэнергетика, специализации - Электропривод и автоматизация технологических процессов.

Методическое пособие, по магистерским диссертациям отражает основные требования к выполнению диссертации, в общем, вопросы по оформлению и организации защиты. В данной разработке приведены

более подробные указания к выбору темы, особенностям объектов исследования и к выполнению магистерской диссертации по специальности 6М071800-Электроэнергетика, специализации «Электропривод и автоматизация технологических комплексов»

Библиогр.- 5 назв.

РЕЦЕНЗЕНТ: д-р. техн. наук, профессор О.З. Рутгайзер

Печатается по плану издания НАО «Алматинского института энергетики и связи» на 2009г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи»,
2011г.

1 Общие положения

Содержание диссертации [1]

Магистерская диссертация должна представлять собой выпускную квалификационную работу научного содержания, имеющую внутреннее единство, отражать результаты разработки предложенной (выбранной) темы исследования (научное содержание), готовится для публичной защиты с дальнейшим присуждением научной степени (квалификационная работа).

Основой содержания является принципиально новый материал или обобщение ранее известных положений, рассматриваемых соискателем с других научных позиций. Содержание диссертации характеризует степень оригинальности приводимых сведений.

Диссертация отражает всегда только одну концепцию или определенную точку зрения, поэтому соискатель изначально включается в научную полемику и становится участником заочной дискуссии. В диссертации должны приводиться веские и убедительные доводы в пользу позиции автора с критикой других точек зрения на объект исследования.

При выборе темы следует учитывать общее время работы соискателя в избранной области знаний, предыдущий «задел» в ней, а также опыт работы и сообщения на научных семинарах или конференциях. При выборе темы диссертации целесообразно выбирать тему сравнительно узкого плана с тем, чтобы ее глубоко проработать.

Результаты, полученные в диссертации, могут свидетельствовать о наличии, у автора;

- только начальных навыков научной работы по избранной специальности;
- некоторых результатов научной работы, которые могут служить основанием для продолжения исследования в том же научном направлении (в рамках кандидатской или докторской диссертации);
- об отсутствии способностей и подлинного интереса к научной деятельности. Такой результат позволяет сделать вывод о целесообразности изменения направления, будущей деятельности автора диссертации.

Совет факультета может в любое время проверить прогресс в работе отдельного магистранта.

Если прогресс неудовлетворителен и если после предупреждения нет существенного улучшения, то Совет факультета может рекомендовать Совету университета прекращение обучения магистранта.

1.2 Требования к магистерской диссертации [1]

Тема диссертации, ее содержание и идеология написания должны соответствовать направлению подготовки магистрантов:

- научно - педагогическая;
- профильная.

Утверждение темы диссертации Ученым Советом университета должно проходить не позже начала второго семестра обучения.

Содержание диссертации должно свидетельствовать о потенциальных возможностях соискателя в рамках решения похожих проблем: умение самостоятельно вести научный поиск, формулировать цели исследования и решать конкретные научные задачи. Соискатель должен показать умение классифицировать различные научные факты, доказывать научную ценность или практическую значимость тех или иных положений, опираясь не только на авторитет других авторов, а путем процедур сознательного убеждения, используя научные методы, приемы и критерии.

В процессе обучения магистрант должен выступить с докладом на кафедральном семинаре выпускающей кафедры, а также на научной конференции, например, на институтской конференции аспирантов и магистрантов.

В случае, если аттестационная комиссия решит, что диссертация не заслуживает положительной оценки, то степень не будет присуждена и повторный допуск к защите диссертации по этой теме не разрешается.

1.3 Структура диссертации [1]

Магистерская диссертация имеет структуру, которая принята для кандидатских и докторских диссертаций и включает следующие разделы:

- титульный лист (первая страница диссертации);
- реферат;
- содержание;
- перечень сокращений;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Объем диссертации не должен превышать 80 страниц машинописного текста с учетом иллюстраций. Приложения не входят в указанный объем.

1.4 Правила оформления магистерской диссертации

Технические требования к оформлению магистерской диссертации должны соответствовать критериям, предъявляемым Комитета по контролю в сфере образования и науки РК к кандидатским диссертациям [1].

Страницы текста диссертационной работы и включенные в диссертацию иллюстрации и таблицы должны соответствовать формату А4.

Диссертация должна быть выполнена с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги формата А4 через один интервал. Шрифт – обычный, кегль 14. Текст диссертации следует

печатать, соблюдая следующие размеры полей: правое – 10 мм, верхнее – 20 мм, левое – 35 и нижнее – 20. Разрешается использовать компьютерные возможности акцентирования внимания на определенных терминах, формулах, теоремах, применяя шрифты разной гарнитуры.

Вне зависимости от способа выполнения диссертации качество напечатанного текста и оформление иллюстраций, таблиц, распечаток с ПЭВМ должно удовлетворять требованию их четкого воспроизведения.

При выполнении диссертации необходимо соблюдать равномерную плотность, контрастность и четкость изображения по всей диссертации. В диссертации должны быть четкие, не расплывшиеся линии, буквы, цифры и знаки.

Опечатки, описки и графические неточности, обнаруженные в процессе подготовки диссертации, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской и нанесением на том же месте исправленного текста (графики) машинописным способом или черными чернилами или черной тушью – рукописным способом.

Повреждения листов текстовых документов, помарки и следы не полностью удаленного прежнего текста (графики) не допускаются. После внесения исправлений документ должен удовлетворять требованиям микрофильмирования.

Фамилии, названия учреждений, организаций, фирм, название изделий и другие имена собственные в диссертации приводят на языке оригинала. Допускается транслитерировать имена собственные и приводить названия организации в переводе на язык диссертации с добавлением (при первом упоминании) оригинального названия

Наименования структурных элементов диссертации, "Содержание", "Нормативные ссылки", "Определения", "Обозначения и сокращения", "Введение", "Выводы", "Список использованных источников" служат заголовками структурных элементов диссертации.

Диссертацию следует делить на разделы, подразделы и пункты. Пункты, при необходимости, могут делиться на подпункты. При делении текста диссертации на пункты и подпункты необходимо, чтобы каждый пункт содержал законченную информацию.

Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов.

Заголовки разделов, подразделов и пунктов следует печатать с абзацного отступа с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Страницы диссертации следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту диссертации. Номер страницы проставляют в центре нижней части листа без точки.

Титульный лист включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, включают в общую нумерацию страниц диссертации. Иллюстрации, таблицы на листе формата А3 учитывают как одну страницу.

Разделы диссертации должны иметь порядковые номера в пределах всего документа, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Разделы как и подразделы могут состоять из одного или нескольких пунктов.

Если документ не имеет подраздела, то нумерация пунктов в нем должна быть в пределах каждого раздела, и номер пункта должен состоять из номеров раздела и пункта, разделенных точкой. В конце номера пункта точка не ставится.

С более подробной информацией по оформлению диссертации можно ознакомиться в [4].

Сведения к выполнению магистерской диссертации

Магистерские диссертации по указанной специализации имеют свои особенности, связанные со специальными объектами исследования, которые изучаются в профильных дисциплинах. Некоторые аспекты объектов исследования в разрезе указанной специализации приведены ниже.

1.1 Возможные темы магистерских диссертации

Особенности выбора темы магистерской диссертации по специализации «Электропривод и автоматизация технологических комплексов» рассмотрим на примере некоторых конкретных объектов характерных для исследований и технических разработок в области автоматизированного электропривода.

Разработки для серийного производства. Исследуется и разрабатывается новое изделие - электропривод или его часть, предназначенные для серийного производства.

Примеры: электропривод для крупной партии новых станков с ЧПУ; отрезок серии массового широко регулируемого экономичного электропривода общего назначения; энергосберегающее многофункциональное устройство для массового асинхронного электропривода. Таким разработкам предшествуют научные исследования, технико-экономический анализ, включающий изучение материальных, трудовых и прочих балансов, потребности рынка, возможности организации соответствующего производства и т. д.

На предварительном этапе необходимо изучить наиболее совершенные аналоги и провести по возможности всестороннее и объективное сравнение достигнутых ранее разработок по выбранной тематике. При этом важно уметь проводить оптимизационные расчеты по экономическим критериям с ограничениями по техническим показателям. И, наоборот, по техническим критериям с экономическими ограничениями, учитывать с максимальной полнотой возможные условия эксплуатации - характер и спектр нагрузок, окружающую среду и т. п. Сравнению должны подвергаться надежность, технологичность, массогабаритные и энергетические показатели, основные показатели стандартизации, унификации, эргономики, патентно - правовые показатели. Такое сравнение является базой любых финальных экономических оценок, без него они фактически невозможны и может служить темой диссертационной работы магистрантов. Легковесные, поверхностные экономические оценки в таких разработках, по крайней мере, неуместны.

Соискателям магистерских диссертаций могут поручаться отдельные разделы основной тематики проводимых кафедрой исследований и разработок.

Разработка локальных технических решений. В этом случае исследуются и разрабатываются технические решения, обеспечивающие средствами электропривода повышение каких-либо технологических, энергетических, надежностных и других показателей механизма или установки.

Пример: повышение производительности прокатного стана за счет лучшего использования электропривода; повышение производительности мостового крана за счет уменьшения раскачивания груза посредством усовершенствования электропривода перемещения тележки; повышение надежности электропривода лифта; повышение точности слежения в антенной установке; повышение точности и качества обработки детали на станке и т. д. Разновидностью указанных разработок могут служить отмеченные выше случаи, когда главная цель - снижение каких-либо видов затрат при сохранении технических характеристик.

Пример: снижение энергетических затрат на единицу продукции в волочильном стане, кабельной линии, прессе и т. п. В некоторых случаях ставится задача одновременного улучшения нескольких технических характеристик.

Важный частный случай, часто встречающийся на практике, - получение нового технического эффекта (повышение диапазона регулирования,

точности управления, плавности, экономичности и т.д.) за счет добавления какого-либо элемента к существующему приводу - дополнительного канала управления, энергосберегающего устройства, адаптивного регулятора и т. п.

Экономические аспекты таких разработок очевидны: необходимо сопоставить новое техническое решение с аналогами, строго и полно определить, какова плата за полученные технические преимущества либо в чем и как выразилось снижение затрат на получение уже имевшихся технических показателей. Разумеется, новые качества не могут достигаться за счет снижения безопасности или надежности устройств.

Здесь во многих случаях возможны и целесообразны натуральные показатели, прямые сравнительные оценки. Так, снижение энергозатрат уместно оценить в кВт-ч/т, повышение производительности - в т/год и т.п. Указанные натуральные оценки могут и должны сопровождаться оценками в стоимостном выражении. Раздел расчетов экономической целесообразности выбранного технического решения не должен превышать заданного объема для раздела (в главе 1.3).

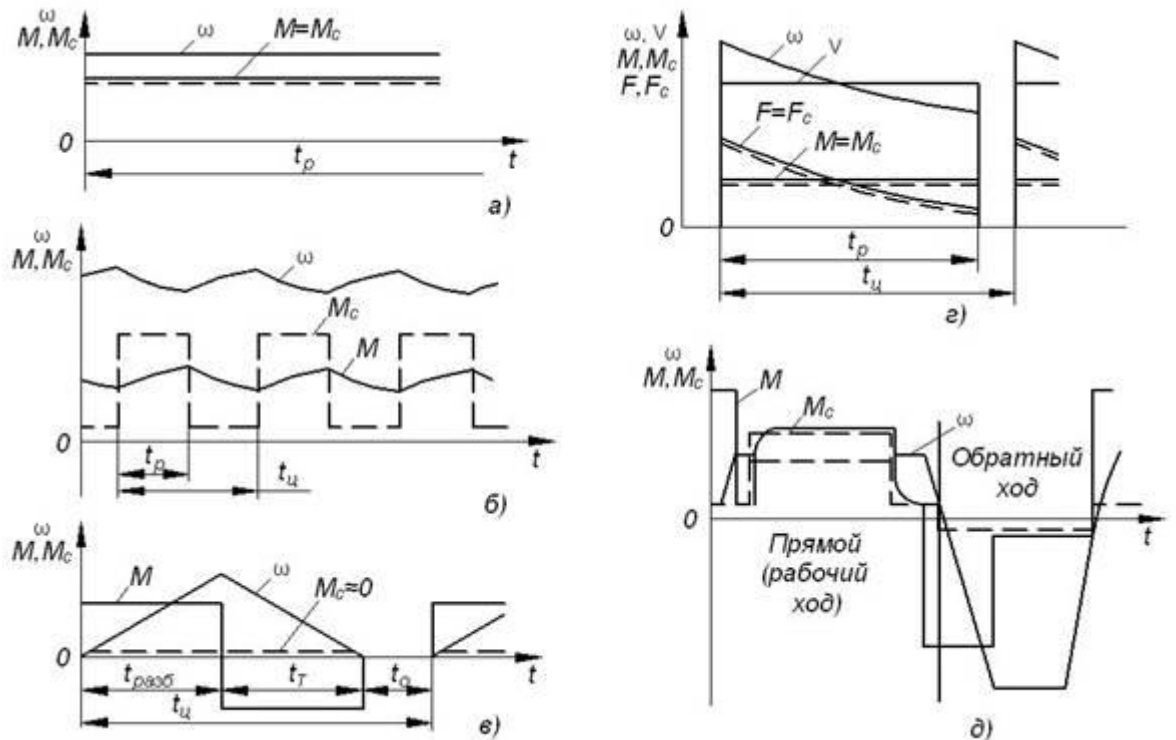
Решение конкретных технических задач. Для какой-либо конкретной технической установки осуществляется замена использовавшегося ранее электропривода на новый. Чаще всего такие разработки производятся при замене оборудования, либо при частичной модернизации устаревшего оборудования, при использовании регулируемых электроприводов на основе новых разработок с энергосберегающими эффектами.

Наличие конкретного аналога и вариантов нового решения определяет специфику экономических оценок: они должны быть локальными, однако полными и всесторонними; должны быть строго сопоставлены, в том числе в натуральных показателях, все имеющие значения, признаки во всех вариантах, а также произведено сравнение конкурирующих вариантов по приведенным затратам. Разновидностью указанного типа задач является разработка новых устройств, для конкретного единичного применения - новых лабораторных или испытательных стендов, их фрагментов и т. п.

Если разработка единична и не связана со значительными затратами, то в состав экономических оценок может входить определение затрат по конкурирующим вариантам. Если же разрабатывается дорогое уникальное устройство, то вполне уместна его оптимизация по какому-либо техническому (минимум потерь и т. п.) или экономическому критерию, например, по приведенным затратам при технических ограничениях, определяемых назначением устройства, требованиями технологического характера, которые должны быть отображены в техническом задании. Каждое электрооборудование, и в частности электропривод должен обеспечивать на рабочем органе приводимого в движение механизма, некоторые предписанные или формируемые в процессе работы значения скорости и момента (силы). В некоторых случаях - осуществлять перемещение рабочего органа на требуемую величину или по заданной траектории либо создавать нужное напряженное состояние за счет приложения определенной силы.

Все случаи функционирования объектов встречаются при изучении различных курсов в процессе обучения; рассматриваются и соответствующие технические и технологические решения.

Вспользуемся некоторым обобщением - назовем все, что должно выполнять электрооборудование, алгоритмом функционирования, который обеспечивается надлежащим построением собственно структуры электрооборудования и соответствующим алгоритмом управления.



t_p - время работы; $t_{ц}$ - время цикла.

Рисунок 1 - Нагрузочные диаграммы и тахограммы

Чаще всего алгоритмы функционирования к примеру в электроприводе представляют в виде нагрузочных диаграмм механизма $M_c(t)$ и двигателя $M(t)$, соответствующих диаграммам скорости или тахограммам $\omega(t)$, причем они могут быть отнесены к любой точке кинематической цепи с учетом формул приведения моментов и скоростей, рисунок 1.

Очевидно, что нагрузочные диаграммы и тахограммы могут иметь вполне определенный вид лишь в самых простых и поэтому не очень интересных случаях. Так, для постоянно работающего вентилятора они показаны на рисунке 1, а для прессы, работающего в автоматическом режиме и производящего одинаковые детали - на рисунке 1, б для центрифуги,

входящей в состав автоматизированной технологической линии - на рисунке 1, в, для приемного барабана волочильного стана - на рисунке 1, з, для продольно - строгального станка, обрабатывающего одну деталь - на рисунке 1, д; различие между $M(t)$ и $M_c(t)$ обусловлено динамическим моментом $M_{дин} = J_S dw / dt$.

Даже в перечисленных простейших случаях диаграммы изменятся при изменении технологических условий - другая деталь, другой цикл и т. п. Для реальных установок, работающих в реальных условиях, нагрузочные диаграммы представляются спектром конкретных реализаций. Так, для электропривода пассажирского лифта с уравновешенной кабиной - M_c определится на каждом рабочем интервале числом и средней массой находящихся в кабине людей, продолжительность интервала - заказанным этажом и т. п. (см. рисунок 2,а).

Строго говоря, при разработке электропривода алгоритм функционирования нужно представлять в терминах случайных величин (для лифта - M_c в данный момент, продолжительность рабочего интервала и т. п.) или случайных процессов. Именно так это и делается в серьезных проектах.

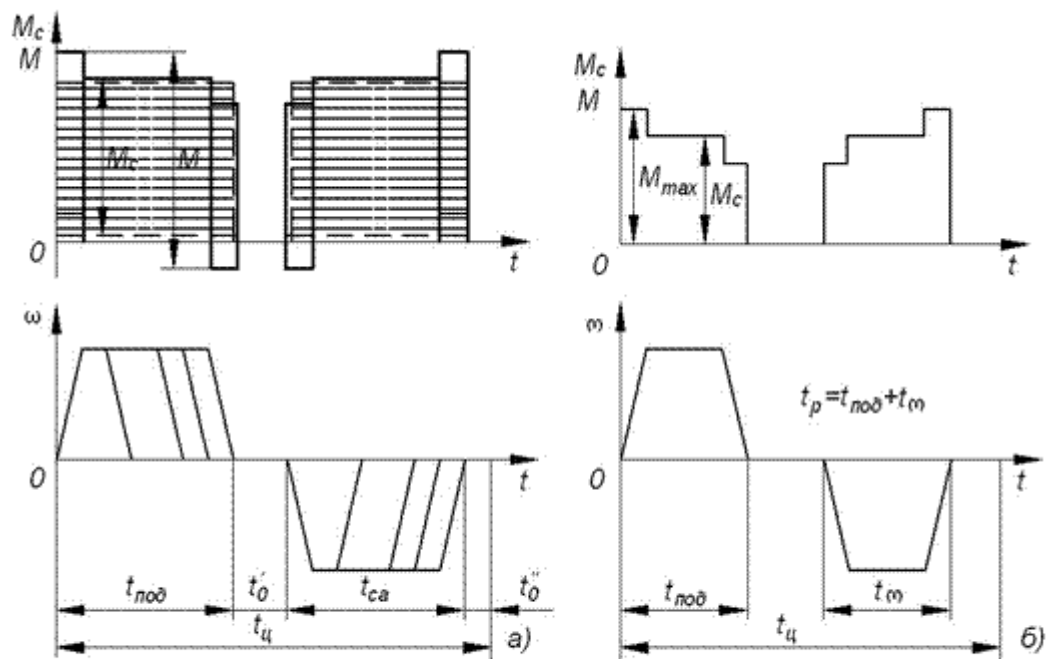


Рисунок 2 - Упрощенные нагрузочные диаграммы лифта с уравновешенной кабиной

В качестве первого приближения можно воспользоваться некоторой усредненной нагрузочной диаграммой, параметры которой (M_c , M_{max} , t_p , t_u) оценены по граничным ситуациям: лифт редко поднимает одиночных пассажиров и лифт с максимальной загрузкой практически непрерывно

работает на подъем (начало рабочего дня в учреждении) или на спуск (конец рабочего дня). В основу сопоставительных оценок разных систем на первых этапах проектирования, по-видимому, уместно положить именно такие нагрузочные диаграммы (см. рисунок 2,б).

Нагрузочные диаграммы и тахограммы, приведенные к валу двигателя, служат основой для выбора двигателя при разработке электропривода. Часто в задачу входит также выбор оптимального передаточного отношения.

По выбранной номинальной скорости двигателя, с учетом допустимой нагрузки при выбранном способе регулирования ориентировочно оценивают номинальный момент двигателя. Полученные оценки обычно используют вместе с другой информацией (исполнение двигателя по степени защиты, способ вентиляции, климатическое исполнение и т.п.) для предварительного выбора двигателя.

Следующим шагом является проверка применимости и соответствия предварительно выбранного двигателя (двигателей). Конкретный двигатель позволяет найти $J_S = J_{\text{ов}} + J_{\text{м.пр}}$, следовательно, $M_{\text{дин}} = J_S dw/dt$ и $M = M_c + M_{\text{дин}}$, а нагрузочная диаграмма двигателя $M(t)$ - хорошая основа для ответа на вопросы: обеспечит ли двигатель в рамках допустимых перегрузок нужные динамические режимы привода и будет ли допустимым и рациональным, т. е. близким к номинальному его тепловой режим.

Ответ на первый вопрос обычно не вызывает трудностей: надо сравнить M_{max} из нагрузочной диаграммы с $M_{\text{дон}}$ двигателя (разумеется, речь идет о моменте, допустимом кратковременно, на время переходного процесса), проанализировать результат и сделать выводы.

Для оценки соответствия теплового режима нужно получить представление о тепловой модели двигателя.

В тепловом отношении электрическая машина - очень сложный объект: она неоднородна по материалу, имеет рассредоточенные внутренние источники тепла, интенсивность которых зависит от режима, теплоотдача зависит от скорости и т. п. Именно эта сложность побуждает пользоваться на практике для относительно грубых оценок предельно простой моделью, построенной в предположении, что машина - однородное тело с постоянной теплоемкостью C , с одинаковой температурой во всех точках J , с теплоотдачей во внешнюю среду, пропорциональной разности температуры машины J и окружающей среды $J_{o,c}$, т.е. $A(J - J_{o,c}) = At$. Примерная методика расчета тепловых режимов в электроприводе дана в приложении А.

2.2 Оценка энергетической эффективности электропривода

В процессе разработки, исследования и проектирования систем электропривода, в магистерских диссертациях, необходимо обратить внимание на энергетические аспекты выбора технического решения, поскольку один и тот же алгоритм функционирования, одни и те же технические показатели можно реализовать при существенно различных затратах энергии, т.е. при различных ее потерях, что очень важно с точки зрения современных требований к энергосбережению. Если учесть, что электропривод потребляет более 60 % всей вырабатываемой электроэнергии, то очевидно как велика цена ее неоправданных потерь и как важна оценка технических решений по энергетическим критериям. Исследование основных факторов, влияющих на энергетическую эффективность электроприводов, может быть полезным при написании магистерской диссертации. В приложении Б приведены методики расчетов коэффициента полезного действия и коэффициента мощности электроприводов, способы воздействия на них.

Обобщенный критерий энергетической эффективности. Устранить неопределенность при расчете энергетической эффективности можно, условившись о равноправности всех режимов в цикле, если они необходимы для осуществления технологического процесса и, следовательно, полезны. Так, к тормозным режимам в транспортном средстве не ниже (а иногда и ощутимо выше) режима пуска. Удержание руки робота в нужном месте какое-то время - тоже очень важное и необходимое действие.

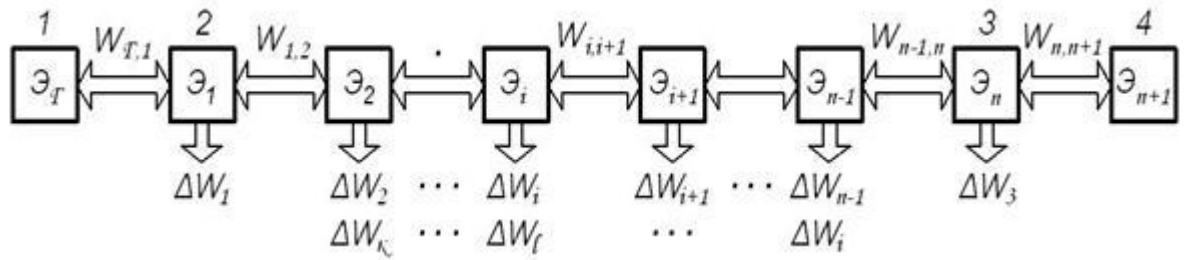
Если принять, что разнополярный график $P(t)$ необходим, то естественно перейти к определению полезной энергии W по следующему выражению:

$$W = \int_0^t |P(t)| dt. \quad (1)$$

Именно это принципиальное обстоятельство положено в основу обобщенного критерия энергетической эффективности, позволяющего однозначно и недвусмысленно оценить энергетическую плату за некоторый полезный по условию энергетический процесс.

В указанном критерии использованы еще три уточнения: точно определено место (сечение) энергетического канала, где оценивается эффективность, точно указаны элементы, потери в которых учитываются, и, наконец, точно определен интервал времени (период или его любая часть), для которого справедлива оценка.

Для энергетического канала (см. рисунок 8), состоящего из источника энергетической энергии \mathcal{E}_r , силовых передающее - преобразовательных элементов электропривода $\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_i, \dots, \mathcal{E}_n$, включающих питающую линию \mathcal{E}_i



1- источник энергии; 2 - линия; 3 - электропривод; 4 - технологический объект и рабочий орган \mathcal{E}_n , технологического объекта \mathcal{E}_{n+1} , взаимодействующего с электроприводом.

Рисунок 8 - Энергетический канал электропривода

Обобщенный критерий энергетической эффективности определится тогда следующим образом:

$$H_{i,k-l}^{t_1, \tau} = \frac{W_{i,i+1}^{t_1, \tau}}{W_{i,i+1}^{t_1, \tau} + \sum_{j=k}^l \Delta W_j^{t_1, \tau}},$$

(2)

где в соответствии с (1)

$$W_{i,i+1}^{t_1, \tau} = \int_{t_1}^{t_1 + \tau} |P_{i,i+1}(t)| dt;$$

(3)

$$\Delta W_j^{t_1, \tau} = \int_{t_1}^{t_1 + \tau} \Delta P_j(t) dt.$$

Внешняя громоздкость (3) не должна смущать - это выражение несколько не сложнее (1), однако в нем указаны место оценки - между i -м и $(i+1)$ -м элементами канала; элементы, в которых учтены потери, - от k -го до l -го (у потерь специально введен свой индекс суммирования j) и время τ , отсчитываемое от некоторого момента t_1 .

Легко обнаружить, что из (3) без всякого труда получаются известные выражения, однако обобщенный критерий может дать значительно большую информацию. Например, если выбрать местом оценки сечение $0,1$ и учесть потери во всех элементах от 1 до n , то при $P_{0,1} > 0$ критерий даст оценку эффективности потребления энергии от источника на интервале t независимо от процессов на входе. Оценка будет работать и

при $W_{n,n+1} = 0$, т.е. при отсутствии электромеханического преобразования энергии. При оценке в сечении $n, n+1$ критерий отразит эффективность преобразования энергии, т. е. меру потерь, которыми сопровождается полезная механическая работа, и т. п.

2.3. Оценка надежности электропривода

Надежность, как обязательное свойство любого устройства или системы имеет исключительную важность. Отдельные технические решения, предлагаемые в диссертации необходимо оценить с точки зрения надежности, без строгих оценок и без строгого определения самого понятия «надежность», трудно провести эти работы. Уточним представления о надежности и возможности оценивать ее количественно, самых простых, но важных случаях. Надежностью в строгом - математическом смысле принято называть вероятность того, что при работе в заданных условиях устройство или система будет удовлетворительно выполнять заданные функции в течение установленного промежутка времени. Неспособность устройства или системы выполнить заданную функцию называют отказом. Отказы бывают внезапными, когда они возникают мгновенно, к примеру (разрыв камеры в колесе автомобиля), и параметрическими, когда какое-либо свойство ухудшается постепенно (прокол камеры). Примерная методика оценки надежности устройств приведена в приложении В.

Обеспечение надежности в процессе разработки. В более полном виде эти вопросы изложены во многих книгах по надежности, вместе с тем очевидно, что оценки надежности - лишь средство что-то узнать об этом важнейшем свойстве любой системы; проблема обеспечения надежности несоизмерима и шире.

Надежность - категория технико - экономическая, поскольку обеспечивается техническими средствами. Высокая надежность дорого стоит, а низкая ведет к большим убыткам. Обеспечить оптимальный уровень надежности – задача непростая.

Решением повышенной надежности в электроприводе могут служить преобразователи для работы в тяжелых условиях, выполненные в виде моноблоков, быстро заменяемых при неисправности оперативным персоналом без недопустимого простоя основного оборудования.

Создание надежных систем - своего рода искусство, но искусство, базирующееся на глубоких знаниях и высокой квалификации разработчиков.

Современная электронная техника позволяет во многих случаях совершенно по новому, эффективно решать проблему надежности за счет построения специальных диагностических систем и т. п.

2.4 Экономические аспекты исследований

В составе критериев, используемых в процессе исследования, разработки и проектирования, обязательно присутствуют критерии экономические. Соискателю необходимо учесть что, любое техническое решение будет неубедительным, неполным, а иногда и просто неверным, если в процессе разработки на всех ее стадиях не проявлено должного внимания к экономической стороне вопроса.

Экономические оценки, как и оценки функциональных свойств и надежности, должны сопровождать техническую разработку, начиная с постановки задачи. Осмыслив и сформулировав технические требования и условия, соискатель степени может ясно и полно определить, на какие вопросы экономического характера он должен уметь отвечать.

Каждая имеющая смысл техническая разработка преследует, как неоднократно отмечалось, вполне конкретные цели – технические и экономические. В подавляющем большинстве случаев она имеет аналоги, характеризующие технический и экономический уровень, который достигнут или может быть достигнут известными средствами.

Если конечным итогом разработки является технический эффект, т. е. повышение каких - либо свойств или показателей, по сравнению с достигнутыми, то на каждом этапе его получения разработчик должен стремиться к наиболее экономичным решениям, а в конце должен уметь определить, какова цена достигнутого эффекта.

Такая постановка задачи, как отмечалось ранее, не является единственной - разработка может предполагать получение прежнего технического эффекта, но с меньшими затратами. И в этом случае каждый ее этап сопровождается экономическими оценками, а в конце строго определяется достигнутая экономия в натуральном и денежном выражении.

Правильные и емкие экономические оценки технических решений предполагают творческий подход к делу с ясной постановкой каждой задачи и строгим анализом условий, в которых она решается. Недопустимы шаблон, работа по непонятным рецептам, даже если они, как это часто бывает, облечены в форму методик, которыми где-то пользуются. Уверенность в результате появляется лишь тогда, когда он полностью понятен.

Особенности экономических оценок. Характер экономической оценки должен соответствовать стадии разработки: очевидно, неуместно пытаться получить точные оценки на стадии, когда намечены лишь общие контуры решения; недопустимо, разумеется, пользоваться приближенными оценками на стадии, когда техническое решение осуществлено и начало использоваться.

Неопределенность, сопровождающая оценки, связана с двумя различными причинами: первая - неточное знание на ранних стадиях разработки параметров, коэффициентов и т. п.; именно эта составляющая неопределенности уменьшается в процессе разработки и полностью исключается после ее осуществления; вторая - разнообразие режимов и условий, в которых будет функционировать устройство (изменение сортамента обрабатываемого материала, заготовок или деталей, неопределенность в нагрузочных диаграммах электроприводов крановых механизмов, лифтов, насосов и т.п.). Эта составляющая неопределенности остается и после реализации разработки и должна учитываться в финальных оценках.

Некоторый экономический показатель Y оказывается, таким образом, зависящим от эксплуатационных факторов $X_1, \dots, X_2, \dots, X_n$, т. е.

$$Y = F(X_1, \dots, X_2, \dots, X_n). \quad (4)$$

Если каждый из факторов X_i известен с погрешностью ΔX_i , то погрешность результата определится как

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial X_i} \Delta X_i \right)^2}. \quad (5)$$

Часто используемые экономические оценки, представленные разностью базовых и новых показателей

$$Y_{зф} = Y_{баз} - Y_{нов},$$

могут приводить к ошибочным результатам, если и $Y_{баз}$ определены с погрешностями, в том числе, как отмечалось, с объективно существующими.

Так, при известии $\Delta Y_{баз}$ и $\Delta Y_{нов}$ в соответствии с (5) имеем

$$\Delta Y_{зф} = \sqrt{(\Delta Y_{баз})^2 + (\Delta Y_{нов})^2}$$

т. е.

$$\frac{\Delta Y_{зф}}{Y_{зф}} = \frac{\sqrt{(\Delta Y_{БЭЭ})^2 + (\Delta Y_{НОЭ})^2}}{Y_{БЭЭ} - Y_{НОЭ}} \quad (6)$$

Приведенные краткие комментарии к экономическим аспектам проектирования ни в коей мере не исчерпывают эту обширную и интересную область. Оставляя ее для детального изучения в специальном курсе, напомним еще раз: никакая методика не может заменить здравого смысла и должна использоваться в обязательном с ним согласии.

В методическом указании к магистерским диссертациям приведены в основном материалы рекомендательного характера, знакомые студентам по изученным курсам, которые могут быть полезными при работе над диссертацией. Отдельные диссертации, выполняемые соискателями могут отличаться оригинальностью решения поставленных задач, в результате научных поисков и собственных разработок. В связи с этим не исключаются особые подходы к решению конкретных задач в исследовании и разработке систем управления и регулирования объектами автоматизированного электропривода.

Применение ЭВМ с использованием определенных редакторов, моделирование процессов, протекающих в исследуемых системах электропривода, обязательно при выполнении магистерских диссертации как в научно-педагогической магистратуре, так и в профильной.

Раздел может быть выполнен с использованием приложения Simulink/Matlab и аналогичных редакторов, обладающих библиотеками приложений для расчетов систем автоматизированного электропривода.

Список литературы

1. О.З. Рутгайзер «Магистерская диссертация», МУ к выполнению диссертации.- Алматы, 2006, -11с.
2. Ф.А. Кузин «Магистерская диссертация». Методика написания, правила оформления и порядок защиты. – М.: 1998.,- 304с.
3. Р. Шенфельд, Э. Хабигер «Автоматизированные электропривода». -Л.: Энергоатомиздат 1985. 483с.

Приложение А

Уравнение теплового баланса для некоторого интервала времени dt запишем в виде,

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau \quad (1)$$

Разделив обе части на $A dt$, получим

$$\frac{\Delta P}{A} = \tau + \frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt},$$

где $T_T = C/A$ — тепловая постоянная времени, с;

$\tau_{\text{кон}} = \Delta P/A$ - конечное значение превышения температуры, т. е. установившееся превышение при мощности потерь, выделяющихся в машине, ΔP , Вт, и теплоотдаче двигателя A , Дж/с.(С°).

$$\tau = (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{кон}}) e^{-t/T} + \tau_{\text{кон}}. \quad (2)$$

При

одном накопителе энергии, в данном случае тепловой, переменная, характеризующая ее запас, изменяется по экспоненте, являющейся решением (1):

Уравнение (14.1) позволяет представить динамическую тепловую модель двигателя в виде структурной схемы (см. рисунок 1, а).

Отметим, что постоянная времени T_m , вообще говоря, непостоянная: в

начальной части нагрева, когда греются лишь активные части, главным образом медь обмоток, и тепло не успевает распространиться по всему

телу машины, процесс идет быстрее, чем по (2), т. е. $T'_T < T_T$.

Для самовентилируемых машин теплоотдача зависит от скорости, уменьшаясь с ее уменьшением, т. е.

$T_{T\omega_{\text{ном}}} \neq T_{T\omega}$, причем разница может быть существенной в 2 - 4 раза.

Некоторое представление о порядке постоянных времени машин

при $\omega \approx \omega_{\text{ном}}$ дает рисунок 1, б.

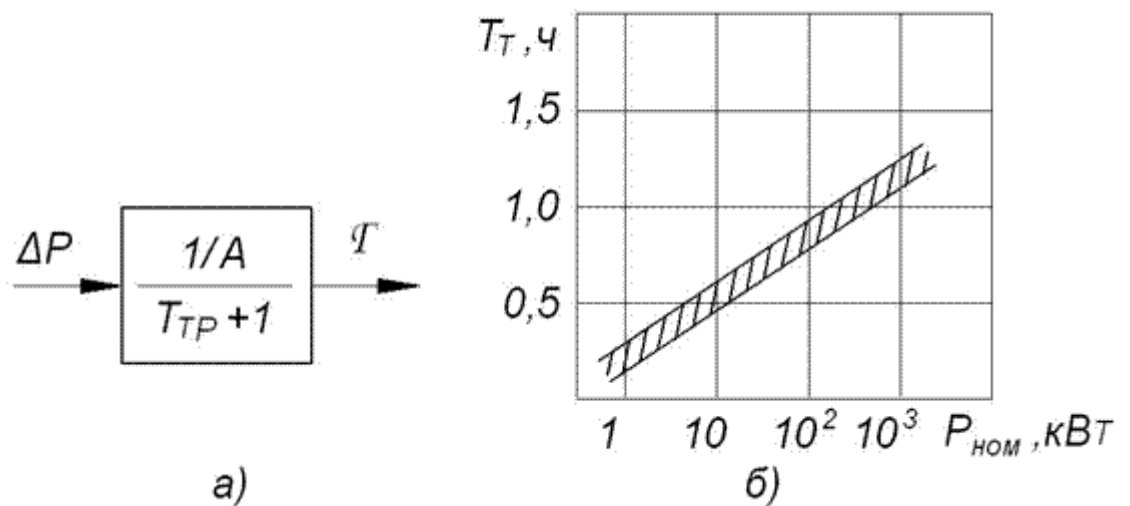
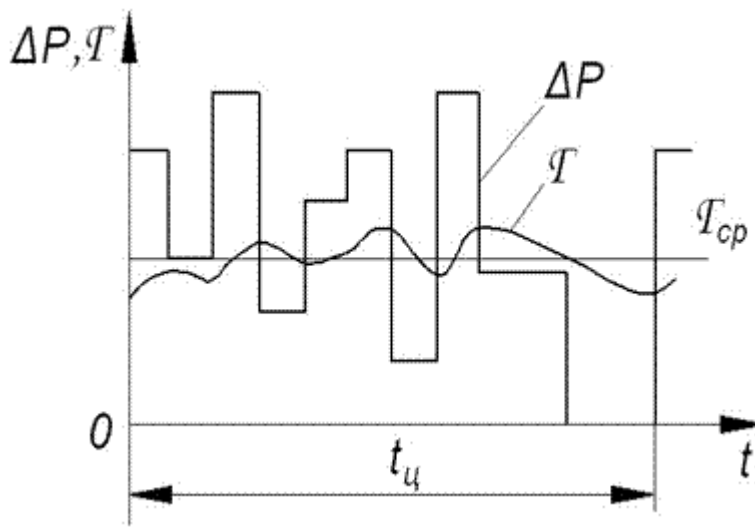
Итак, реакция машины на быстрые изменения потерь в ней – отрезки экспонент с относительно большими (минуты, даже часы для больших машин) постоянными времени. В установившемся

режиме $d\tau/dt = 0$ по (1) имеем в номинальном режиме по определению

$$\tau = \Delta P / A; \quad (3)$$

$$\tau_{\text{дон}} = \Delta P_{\text{ном}} / A.$$

и привод работает в циклическом режиме, и время цикла невелико (минуты), то даже при сильно меняющихся потерях ΔP , отклонение превышения температуры τ от среднего значения $\tau_{\text{ср}}$ не будет большим из-за значительной T_T (см. рисунок 2).



(а) модель двигателя, (б) примерная зависимость тепловой постоянной T_T от номинальной мощности машины.

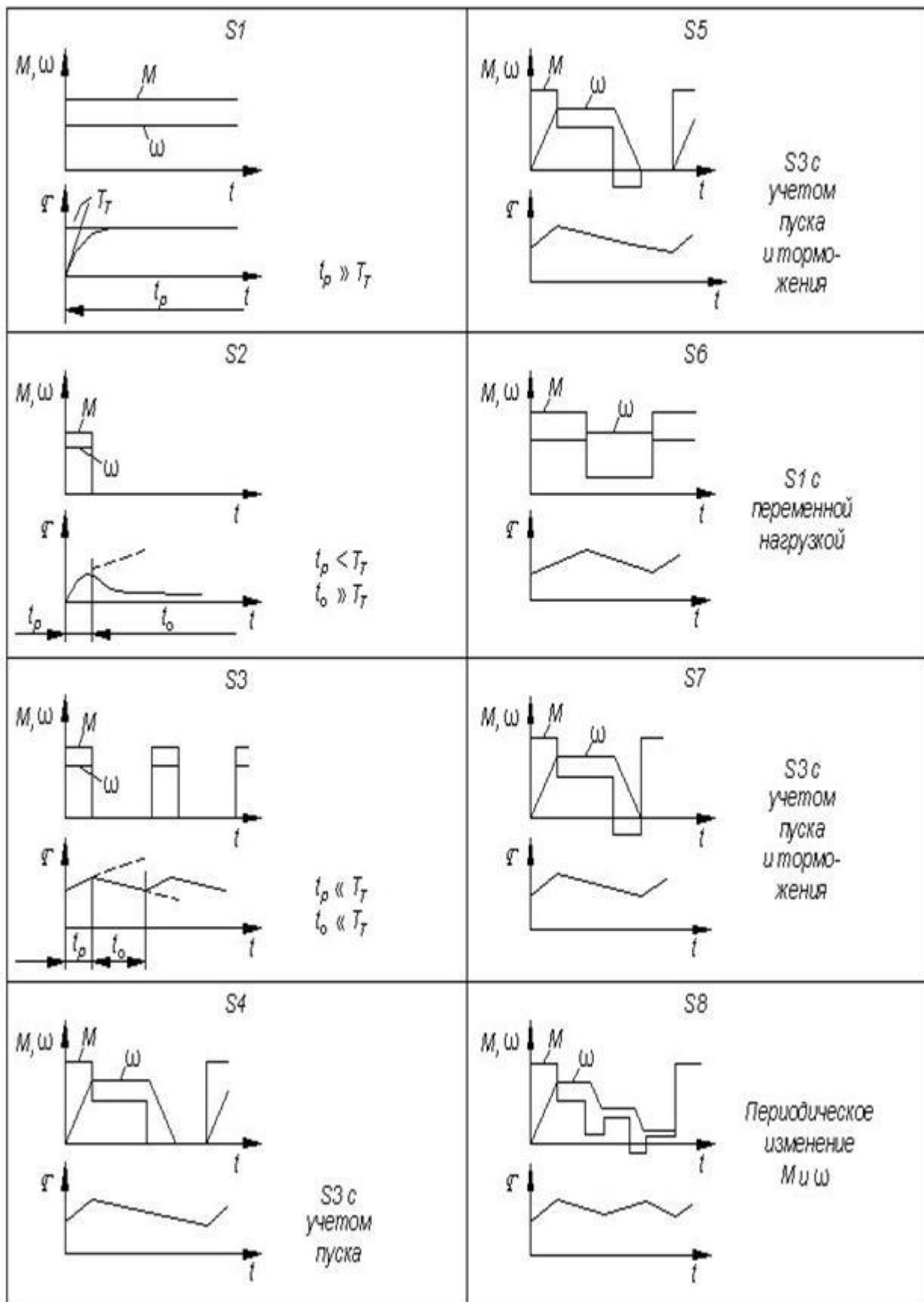
Рисунок 1 - Динамическая тепловая модель двигателя "

Рисунок 2 - Превышение температуры τ при сильно меняющихся потерях">

Это обстоятельство использовано в обычно применяемом при проверке двигателей методе средних потерь: из (3) следует

$$\tau_{cp} = \Delta P_{cp} / A,$$

Т а б л и ц а 1



$$\Delta P_{cp} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt$$
 где — средняя за цикл мощность потерь, и тогда при постоянной теплоотдаче A с учетом (3 а) $t_{cp} \leq t_{дон}$, если подчеркнем, что условием (4) можно пользоваться лишь при малых

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном} \quad (4)$$

Продолжительность цикла, когда $t_{\text{ц}} \ll T_{\text{т}}$. Но и в этом случае иногда обилие условий и допущений, сопутствующих изложенному приему, дает не очень точные результаты.

Именно из-за этого введена весьма детальная международная классификация режимов ($S_1 - S_8$) (см. таблицу 1), и в каталогах двигателя паспортизируются в соответствии с этими режимами. В ряде случаев условие (4) удается упростить, приспособить к конкретным особенностям применения. Так, если можно считать, что переменная составляющая мощности потерь пропорциональна квадрату тока при ($R = \text{const}$), то выражения (3,4) упрощаются.

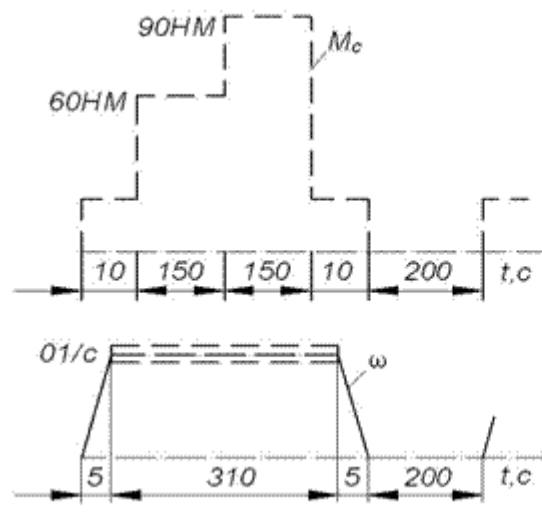
Если, кроме того, момент двигателя пропорционален току (это верно при $\Phi = \text{const}$), то

$$M_{\text{экв}} \leq M_{\text{ном}} \quad (5)$$

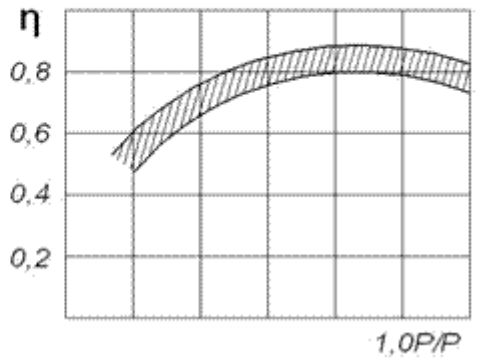
где,
$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} M^2(t) dt}$$
 - эквивалентный момент.

Приложение Б

Коэффициент полезного действия. Каждый полезный процесс передачи и преобразования энергии сопровождается неизбежными ее потерями. Передав или преобразовав энергию W , мы обязательно потеряем ΔW , и весь вопрос в том, как велика доля ΔW по отношению к W , т.е. каков КПД



$$\eta = W / (W + \Delta W).$$



(1)

Рисунок 1 - К выбору двигателя
– нагрузочная диаграмма и
тахограмма

Рисунок 2 - Зависимость
номинального КПД от нагрузки

Общее выражение КПД (1) в конкретных случаях может видоизменяться по форме, не меняясь, конечно, по сути. Так, если процесс неизменен во времени (см. рисунок 1, а), можно выразить КПД через мощности - полезную P и потерь ΔP :

$$\eta = P / (P + \Delta P).$$

(2)

Это выражение можно преобразовать, понимая под полезной мощностью мощность на выходе устройства $P = P_{\text{вых}}$, а под общей затраченной мощностью - мощность на входе $P + \Delta P = P_{\text{вх}}$. Тогда

$$\eta = P_{\text{вых}} / (P_{\text{вых}} + \Delta P) = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}.$$

(3)

Последнее выражение используется обычно при паспортизации различного рода устройств - указывается номинальный КПД $\eta_{\text{ном}} =$

$P_{\text{вых.ном}}/P_{\text{вх.ном}}$ и приводится кривая $\eta=f(P_{\text{вых.ном}}/P_{\text{вх.ном}})$, имеющая обычно экстремум в зоне $P_{\text{вых}}/P_{\text{вых.ном}}=0,8\div 1$ (см.рисунок 2).

Выражения (1) и (2) относятся к мгновенной мощности, к мощности в данный момент; переход к энергии при известных $P(t)$ и $\Delta P(t)$ и к выражению (3) в простых случаях - при однонаправленном потоке энергии (см. рисунок 1, б) - осуществляется через определение энергии, т. е. через интегрирование $P(t)$ и $\Delta P(t)$ по времени.

Так, если энергетический процесс циклический (см.рисунок 1), уместно говорить о КПД цикла

$$\eta_{\text{ц}} = W_{\text{ц}} / (W_{\text{ц}} + \Delta W_{\text{ц}}), \quad (4)$$

)

$$W_{\text{ц}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) dt$$

где — полезная работа за цикл, в примере это в основном работа, затраченная на деформацию прессуемого изделия;

$$\Delta W_{\text{ц}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt, \quad (5)$$

где $\Delta P(t)$ — потери энергии за цикл.

Подчеркнем, что КПД, вычисленные по (1) - (3), могут существенно, радикально различаться, поскольку оценки через мгновенные мощности характеризуют один определенный режим, а в цикле присутствуют разные режимы и при разных временных интервалах. В этой связи не имеет смысла и приводит к ошибкам, часто применяемое на практике, сравнение различных устройств или систем по номинальным КПД.

Отметим, в связи с изложенным, фактическая оценка экономичности или неэкономичности может быть сделана лишь при учете конкретных условий работы, режимов.

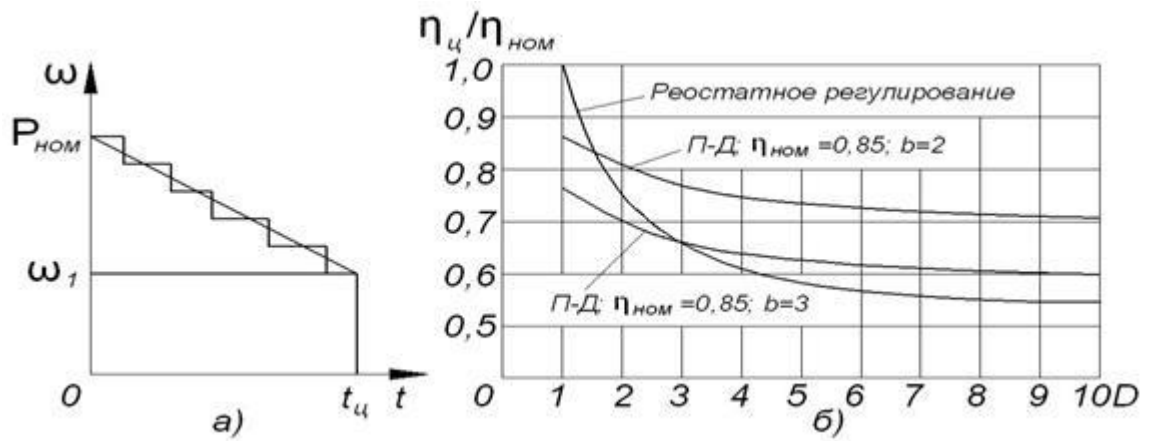


Рисунок 3 - Цикл (а) и зависимости относительного циклового КПД от диапазона регулирования скорости (б)

Найдем выражения цикловых КПД по (3) для двух случаев - реостатного регулирования, когда

$$\Delta P = M_{ном} \omega_0 s = M_{ном} (\omega_0 - \omega), \quad (6)$$

и регулирования в системе преобразователь - двигатель, когда потери на любой характеристике можно полагать неизменными:

$$\Delta P = M_{ном} \Delta \omega_{ном} b, \quad (7)$$

где $b = \Delta \omega / \Delta \omega_{ном}$ - коэффициент, учитывающий потери в преобразовательном устройстве. В первом случае будем иметь

$$\eta_{ц, реост} = \eta_{ном} \frac{D+1}{2D}, \quad (8)$$

во втором

$$\eta_{ц, п-д} = \eta_{ном} \frac{D+1}{2Db + (1+D-2Db)\eta_{ном}}. \quad (9)$$

Построив графики $\eta_{ц} / \eta_{ном} = f(D)$ (см.рисунок 3, б), убедимся, что даже при очень благоприятных условиях ($\eta_{ном} = 0,85$ и $b=2$) система преобразователь - двигатель имеет преимущество по цикловому КПД лишь при $D > 1,5$. Если $b=3$, что характерно, например, для системы генератор - двигатель, то последняя лучше при $D > 3$, причем даже при больших D разница, не очень велика - около 0,05. Для маломощных двигателей, с малым $\eta_{ном}$ и относительно большими потерями в преобразователе может оказаться, что система преобразователь - двигатель будет уступать двигателю с реостатом по цикловому КПД в рассматриваемых условиях при любых диапазонах регулирования. Разумеется, при этом не следует забывать о других ее преимуществах.

Случай неоднонаправленного потока энергии. Все изложенное выше, как отмечалось, относится к однонаправленному потоку энергии, когда мощность не меняет знак. Это позволяет просто определить энергию за цикл, цикловой КПД и т. п.

Вместе с тем нетрудно заметить, что даже в самых простых случаях (см.рисунок 1, в), когда направление потока энергии изменяется в цикле, изначальные представления о КПД становятся недостаточными. По существу это связано с нестрогим определением «полезной» энергии, а формально выражается в том, что интегрирование, например, за цикл мощности разного знака, приводит к ошибочным выражениям значения энергии.

Указанная неоднозначность в оценках энергетической эффективности процессов и устройств, характерная для электропривода, где постоянно используются различные энергетические режимы, т.е. изменяется направление потоков энергии, что приводит к нежелательным последствиям - нестрогим сравнениям, необоснованным решениям и т. п.

Коэффициент мощности. Обобщенный критерий, рассмотренный выше, позволяет учитывать, дополнительные потери в сетях переменного тока, обусловленные сдвигом по фазе тока и напряжения ($\cos \varphi \neq 1$) и высшими гармониками тока. Эти потери характеризуются как известно коэффициентом мощности

$$\chi = P / UI = v \cos \varphi_{(1)}, \quad (10)$$

где P - активная мощность;

$v = I_{(1)}I$ - коэффициент искажений;

$U, I, I_{(1)}$ - действующие значения напряжения, тока и первой гармоники тока;

$\varphi_{(1)}$ - угол сдвига между первыми гармониками напряжения и тока.

При небольших искажениях $\nu \approx 1$, т. е.

$$\chi \approx \cos \varphi, \quad (11)$$

и при передаче по линии с некоторым активным сопротивлением заданной активной мощности P потери определяются как

$$\Delta P = \Delta P_{п.т.} / \cos^2 \varphi, \quad (12)$$

где $\Delta P_{п.т.}$ - потери при передаче той же мощности P постоянным током.

Не вдаваясь в детали, отметим, что поскольку линия, питающая электропривод, входит в энергетический канал (см. рисунок 8), выражение (17), примененное надлежащим образом при известных параметрах, позволяет решать любые задачи сравнения вариантов по энергетическому критерию, оценивать мероприятия, связанные с компенсацией реактивной мощности в конкретных условиях, и т. п.

Изложенные приемы оценки энергетической эффективности в целях сопоставления различных технических решений при проектировании основаны, разумеется, на глубоком анализе энергетических процессов в конкретном электроприводе, которые детально рассматривались в предыдущих главах. Эти приемы ни в коем случае не могут заменить анализ, а лишь помогают воспользоваться его результатами.

Приложение В

Методика расчета надежности систем

Одним из важнейших показателей надежности служит наработка до отказа T , т. е. время нормальной – безотказной - работы (иногда используется другая, более удачная в конкретных условиях величина - число циклов, путь или пробег и т. п.). Кроме того, в теории надежности широко используются такие показатели как время восстановления, ресурс и т. п. Совершенно ясно, что наработка до отказа T - случайная величина. Если бы мы специально испытывали или наблюдали в процессе эксплуатации n одинаковых объектов (устройств или систем) и фиксировали T для каждого из них, то получилась бы диаграмма, представленная на рисунке 1,а. К некоторому текущему моменту времени t часть устройств $n_{отк}$ уже отказала (отказы отмечены крестиками), часть $n_{раб}$ продолжают работать.

Соотношение $n_{отк}$ и $n_{раб}$, очевидно, зависит от t : если $t = 0$, - то отказавших объектов нет, т. е. $n_{отк} = 0$, $n_{раб} = n$; если, наоборот, $t \rightarrow \infty$, то элементы уже отказали, т. е. $n_{раб} = 0$ и $n_{отк} = n$.

Отношения $R = n_{раб}/n$ и $F = n_{отк}/n$ можно полагать вероятностями P , тогда,

$$P\{T > t\} = R(t), \quad (1)$$

$$P\{T < t\} = F(t), \quad (2)$$

- их функции распределения.

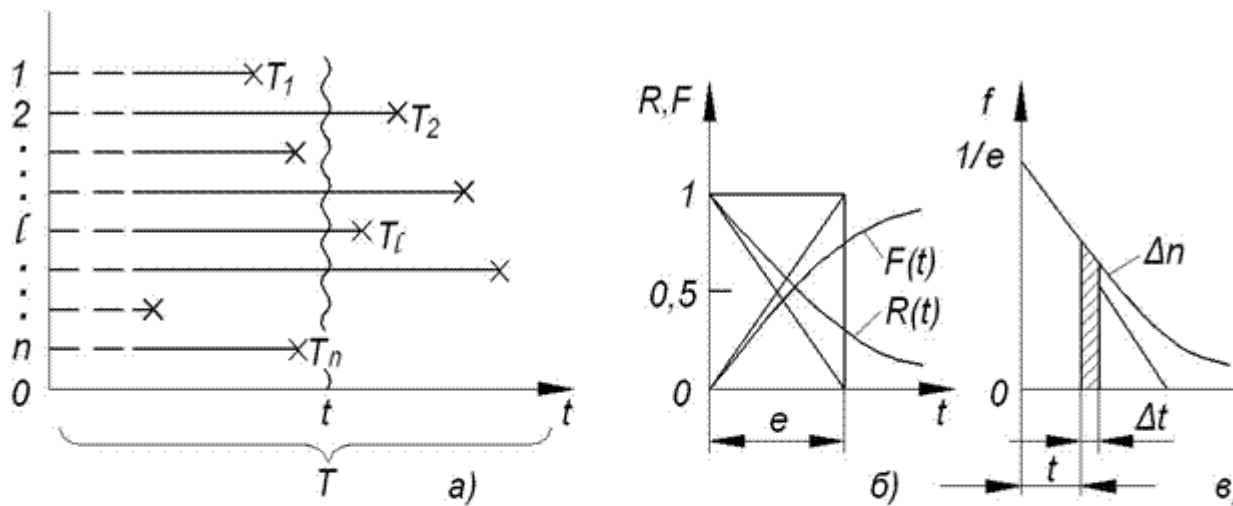


Рисунок 1 - Случайная величина (а), экспоненциальное распределение $K(t)$ и $P(t)$ (б), плотность распределения наработки до отказа (в), наработка до отказа T

По определению $R(t)$ - вероятность безотказной работы, т.е. надежность, $F(t)$ - вероятность отказа или функция распределения, наработки до отказа - «ненадежность». Очевидно, что

$$R(t) + F(t) = 1.$$

Постулируем вид зависимости $R(t)$:

$$R(t) = e^{-t/\theta},$$

(3)

т. е. будем полагать, что надежность имеет экспоненциальное распределение с постоянной θ (см. рисунок 1). Это распределение хорошо согласуется с рассмотренной ранее картиной процесса отказов и очень широко применяется на практике, хотя в теории надежности используются и другие распределения.

Из (3) и (2) следует, что

$$F(t) = 1 - e^{-t/\theta},$$

(4)

а плотность распределения наработки до отказа определяется как

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta}.$$

(5)

Эта величина вместе с тем представляет собой предел частоты отказов

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n}{n \Delta t},$$

(6)

где Δn - число отказавших объектов за интервал Δt (рисунок 1).

Зная частоту отказов, легко определять вероятность отказа в промежутке t_1-t_2 :

$$P\{t_1 < T < t_2\} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = F(t_2) - F(t_1) = R(t_1) - R(t_2),$$

(7)

а также решать другие аналогичные задачи.

Частота отказов $f(t)$ связана с другой похожей величиной, играющей очень важную роль в теории надежности, - с интенсивностью отказов $\lambda(t)$, под которой понимают число отказов в единицу времени, отнесенное к числу объектов $n_{\text{раб}}$, продолжающих работать к моменту t , т. е.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n}{n_{\text{раб}} \Delta t}. \quad (8)$$

Умножив и разделив отношение под знаком предела в (7) на $n_{\text{раб}}$, получим

$$\lambda(t) = f(t) / R(t). \quad (9)$$

Между количественными характеристиками надежности T , $R(t)$ и $\lambda(t)$ существует связь. Так, средняя наработка до отказа, т. е. среднее время безотказной работы,

$$\bar{T} = \left(\sum_{i=1}^n T_i \right) / n \quad (10)$$

связано с $R(t)$ следующим соотношением:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (11)$$

Подставив в (11) выражение для $R(t)$ из (14), получим после простых преобразований

$$\bar{T} = \theta,$$

т. е. постоянная в экспоненциальном распределении не что иное, как средняя наработка до отказа:

$$R(t) = e^{-t/\bar{T}}. \quad (12)$$

И, наконец, если проинтегрировать интенсивность отказов в пределах от 0 до t и учесть, что $f(t) = -[R(t)]'$, то получим

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t -\frac{[R(t)]'}{R(t)} dt = -\ln R(t) \Big|_0^t = -\ln R(t),$$

или

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt},$$

а при постоянной интенсивности отказов $\lambda = \text{const}$

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (13)$$

Сравнив (12) с (13), получим

$$\bar{T} = 1/\lambda. \quad (14)$$

Краткий экскурс в элементарную теорию надежности и знакомство с основными понятиями позволят соискателю делать простые расчеты. Параметр λ является основным содержанием справочников по надежности и приводится там для любых элементов с учетом условий их работы; найденные формулы определяют порядок его использования для единичного элемента или устройства.

Зная надежность или, точнее, параметр λ каждого элемента, входящего в некоторую систему, можно судить о надежности системы в целом. Поскольку, надежность - это вероятность, суждение о надежности системы при известных «сложностях элементов» следует, основывать на теоремах о действиях с вероятностями отдельных событий. Рассмотрим на простейшем примере некоторые типичные модели надежности. Пусть имеем двойной выключатель (см. рисунок 2).

Двойной выключатель и его модели надежности

При включении событие «включено» произойдет лишь в том случае, когда включится A и B , т.е. осуществится операция И. Этому будет соответствовать модель надежности в виде последовательного соединения элементов A и B (см. рисунок 2,б); неисправность - неисправность устройства. При отключении для события «выключено» достаточно

срабатывания либо A , либо B , т. е. осуществляется операция ИЛИ, чему соответствует модель в виде параллельного соединения элементов A и B (см. рисунок 2,б).

Таким образом, одному и тому же устройству могут соответствовать совершенно разные модели надежности, которые можно строить, руководствуясь изложенными выше принципами. Общая рекомендация – не резервированным системам соответствуют модели с последовательным соединением элементов, резерву – параллельное соединение.

К моделям типа приведенной на рисунке 2,б применима теорема об умножении вероятностей при независимых событиях: событие «система работоспособна» состоит в совместном выполнении событий «каждый элемент работоспособен», т. е. является произведением элементарных независимых событий:

$$R_{\text{сист}}(t) = \prod_{j=1}^k R_j(t). \quad (15)$$

Приняв в соответствии с (13)

$$R_j(t) = e^{-\lambda_j t},$$

получим

$$R_{\text{сист}}(t) = e^{-\lambda_{\text{сист}} t} = e^{-\left(\sum_{j=1}^k \lambda_j\right) t},$$

т.е.

$$\lambda_{\text{сист}} = \sum_{j=1}^k \lambda_j, \quad (16)$$

$$\bar{T}_{\text{сист}} = 1/\lambda_{\text{сист}} = 1/\sum_{j=1}^k \lambda_j.$$

или

В модели с параллельно соединенными элементами типа приведенной на рисунок 2,б событие «отказ системы» произойдет при совместном выполнении событий «каждый элемент отказал», и теорема об умножении вероятностей должна применяться к «ненадежностям», т.е. к $F(t)$:

$$F_{сист}(t) = \prod_{j=1}^k F_j(t) \quad (17)$$

или

$$R_{сист}(t) = 1 - \prod_{j=1}^k [1 - R_j(t)] \quad (18)$$

Содержание

1 Общие положения	3
1.1 Содержание диссертации	3
1.2 Требования к магистерской диссертации	3
1.3 Структура диссертации	4
1.4 Правила оформления магистерской диссертации	4
2 Сведение к выполнению диссертации	6
2.1 Возможные темы магистерской диссертации	6
2.2 Оценка энергетической эффективности электропривода	11
2.3 Оценка надежности электропривода	13
2.4 Экономические аспекты исследования	14
3. Список литературы	16
Приложение А	17
Приложение Б	21
Приложение В	25