

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Энергетический факультет  
Кафедра «Автоматизированный электропривод»  
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**ВЫПУСКНАЯ  
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ  
РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Рецензент, должность

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_/ И.О. Фамилия /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой  
автоматизированного электропривода,  
д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_/ М.А. Григорьев /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ЭЛЕКТРОННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ  
КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

(наименование темы работы)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
ПО ПРОГРАММЕ МАГИСТРАТУРЫ  
«ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ»  
ЮУрГУ–13.04.02.2020.181 ВКР**

Консультант, доцент, к.т.н.

**В.И. Смолин** \_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Руководитель, доцент, к.т.н.

**А.Е. Бычков** \_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы,

бакалавр группы П–286

**Е.А. Никифорова** \_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер, должность

**Т.А. Функ** \_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск 2020

## АННОТАЦИЯ

Никифорова Е.А. Тяговый электропривод с электронным измерителем крутящего момента. – Челябинск: ЮУрГУ, Э; П - 286, 2020, 125 с., 57 ил., 18 табл., библиографический список – 67 наим., 2 листов чертежей ф. А3

Целью выпускной квалификационной работы является решение задачи повышения точности определения крутящего момента электрических машин тягового электропривода до уровня (2.5...3)% приведенной погрешности при отсутствии внешнего датчика момента.

В ВКР рассмотрено назначение и область применения тягового электропривода с измерителем момента (ТЭП с ИМ). Описаны существующие методы и устройства измерения крутящего момента ТЭП и способы его управления. Выбран энергетический метод управления электрическими машинами тягового электропривода на основе теории обобщенного энергетического потока, включающий разработку модели потерь мощности ТЭП. Проведено исследование и выбор двигателя на основе технических характеристик ТЭМ зарубежных фирм-производителей. Произведена настройка и моделирование параметров электрической машины и исследован уровень точности определения погрешностей измерения крутящего момента для заданной модели. Разработана функциональная схема информационно – измерительной системы ТЭП и функциональной схемы ТЭП с ИМ, позволяющая обеспечивать распределение крутящего момента между отдельными двигателями с приведенной погрешностью, не превышающей  $\pm 3\%$ .

Полученные результаты свидетельствуют о реализуемости предъявляемых точностных требований к информационно – измерительной системе ТЭП.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Никифорова</i>			<i>Тяговый электропривод с электронным измерителем крутящего момента</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Бычков А.Е.</i>					4	125
<i>Реценз</i>		<i>Гниденко Р.В.</i>				<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Функ Т.А.</i>				<i>Кафедра «АЭП»</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Григорьев М.А.</i>						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР: НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИЗМЕРИТЕЛЕМ МОМЕНТА .....	9
1.1. Область применения ТЭП с ИМ в металлургических общепромышленных комплексах и автомобилестроении. ....	15
2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	31
2.1. Устройства измерения крутящего момента ТЭП .....	32
2.2. Методы измерения крутящего момента .....	46
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ МАШИН ПО ТЕХНОЛОГИИ ОБОБЩЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТОКА	54
3.1. Анализ информационно-измерительной системы автомобильного ТЭП.....	54
3.2. Алгоритмы обработки измерительной информации по технологии обобщенного энергетического потока.....	61
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ.....	71
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ТЭП .....	80
5.1. Моделирование погрешности измерения активной мощности .....	80
5.2. Моделирование погрешности измерения тока .....	82
5.3. Моделирование погрешности измерения крутящего момента ТЭП .	83
6. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ТЭП .....	87
7. НАСТРОЙКА АЛГОРИТМОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ТЭП С ИМ.....	91
7.1. Методика настройки математической модели электрической машины по техническим данным двигателя .....	91
7.2. Выбор способа настройки математической модели.....	95

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

7.3.Настройка модели по методу наискорейшего спуска .....	98
8. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ТЭП С ИМ .....	101
8.1.ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ И МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ИНФОРМАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	103
8.1.1.Выбор датчиков тока .....	105
8.1.2.Выбор датчиков напряжения .....	107
8.1.3.Выбор датчиков углового перемещения .....	108
8.1.4.Выбор микроконтроллера .....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	117
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	119

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</b>	Лист
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

## ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие тяговый электрический привод получил значительное развитие. Во многом это взаимосвязано с постоянным усовершенствованием электросиловых установок транспортных средств, в том числе частичной заменой двигателей внутреннего сгорания электрическими или гибридным их аналогом. Главной координатой управления в тяговом электроприводе является крутящий момент. Поэтому точное его измерение и управление является приоритетной задачей в области тягового электропривода [1]. Недостаточная точность управления электромагнитным состоянием электрических машин не позволяет в полной мере реализовать потенциал синхронных машин при глубоком регулировании по углу нагрузки в пиковых режимах и энергетическую эффективность асинхронных машин при глубоком амплитудном регулировании до (30...50)% номинала в длительных режимах частичных нагрузок [2].

Актуальность данной темы заключается в необходимости повышения точности распределения момента между двигателями в многодвигательных взаимосвязанных либо групповых силовых установках автотранспортных средств и однодвигательных агрегатах, область применения которых обширна: технологические процессы металлургического производства, непрерывная транспортировка сыпучих материалов, производство рулонной продукции различного назначения [3]. Электрический привод с измерителем крутящего момента облегчает решение задачи контроля вязкости, влажности и однородности исходного материала в производстве хлебной продукции, глиняного, песочно-цементного и других растворов в производстве строительных материалов. начиная от намоточных устройств однодвигательных электроприводов и заканчивая многодвигательными электроприводами автотранспортных систем и промышленных конвейеров. Стоит отметить, что на данный момент, тяговый электропривод является одним из основных узлов электротранспортных средств, незаменим в металлургии.

										Лист
										7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ					

Характеристики ТЭП во многом определяют характерные черты транспортного средства. Развитие ТЭП находится на границе между высокими экономическими требованиями, экологичностью и технической эффективностью оборудования [4].

Проблема недостаточного качества управления тяговым электрическим приводом связана с тем, что существующие методы управления не обеспечивают необходимую точность определения крутящего момента и распределение его по осям, в следствие чего снижается общий уровень надежности и безопасности транспортных средств. Кроме того, это может привести к нарушению технологического процесса, возникновению ударных нагрузок и бракованной продукции.

Целью ВКР является разработка электронного измерителя крутящего момента электрических машин в тяговом электроприводе на основе двигателей переменного тока, позволяющая минимизировать погрешность определения момента до уровня приведенной погрешности не более  $\pm 3\%$ . Более того, предполагаемое программное обеспечение измерителя крутящего момента и системы контроля и диагностики тягового электропривода имеет во многом совпадающую информационную и алгоритмическую основу. Данный фактор повышает актуальность разработки предлагаемого продукта.

# 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР: НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИЗМЕРИТЕЛЕМ МОМЕНТА

В настоящий момент наиболее часто встречающимся средством приведения в движение рабочего органа (РО) является электрический двигатель. Большая часть всей механической энергии, потребляемой промышленным производством, а также в сельском хозяйстве производится при помощи устройств преобразования электрической энергии в механическую, питание которых осуществляется от источника электрической энергии.

В задачу этих устройств входит управление потоком мощности, производимого машинами, которые реализованы электрическим способом, с помощью электропривода.

В ГОСТ Р 50369-92 электропривод определяется как электромеханическая система, которая состоит из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих, информационных и измерительных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса [5].

Электропривод, предназначенный для тяги, называется тяговым электроприводом (ТЭП). За последнее десятилетие тяговый электрический привод получил усиленное развитие. Это связано с непрерывной разработкой электросиловых установок и технологических процессов комплексов общепромышленного назначения: многоприводных транспортеров сыпучих материалов, металлургических станов малой мощности, производственных линий рулонной продукции, испытательного [6, 7] и учебного оборудования, транспортных средств и частичной заменой тепловых двигателей электрическими или гибридными для электрификации мобильного парка с целью улучшения экологической ситуации в городах.

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ				





основным является продолжительный режим работы двигателя, т.е. номинальным. Вторым режимом является пиковый, т.е. режим максимальной нагрузки. Так как главным параметром тяговых двигателей является момент, то в пиковом режиме проявляется высокая кратность критических моментов, достигающая в асинхронных двигателях 3-х кратных показателей, а в синхронных даже 5-ти кратных и более. В настоящее время на электроподвижном составе (ЭПС) применяют в основном тяговые двигатели постоянного и пульсирующего тока. Однако все чаще при проектировке прибегают к созданию электровозов с асинхронными и вентильными двигателями.

**Вспомогательными машинами** называют электродвигатели, служащие для привода компрессоров, обеспечивающих питание сжатым воздухом:

- тормозных систем и электропневматических приводов тяговых аппаратов, вентиляторов;
- расщепители фаз;
- делители напряжения;
- генераторы служебного тока;
- двигатель-генераторы.

Мотор-вентиляторы используются для охлаждения тяговых двигателей и выпрямительных установок.

Расщепители фаз предназначены для преобразования однофазного тока в трехфазный, которым питают асинхронные двигатели других вспомогательных машин.

Делители напряжения (двухколлекторные машины) делают для питания двигателей других вспомогательных машин с напряжением, вдвое меньшим напряжения контактной сети.

Генераторы служебного тока предназначены для получения электроэнергии напряжением 50...1100 В для питания цепей управления и сигнализации.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11



передачи между валом двигателя и рабочим органом механизма. Такие электроприводы называют безредукторными, при этом возрастают габариты и масса приводного двигателя, поскольку эти параметры при одной и той же мощности обратно-пропорциональны номинальной скорости электродвигателя.

Системой управления электропривода является часть, обеспечивающая статические и динамические свойства привода. К устройствам управления относятся функционально связанные электрические аппараты защиты и управления, редукторы тока и скорости, построенные на типовых аналоговых и цифровых модулях или микроконтроллерах. Сюда можно отнести усилитель сигнала модуля управления.

Информационное устройство служит для сбора, обработки и передачи информации о работе управляемого объекта. К ним относят различного рода датчики скорости, температуры, микроконтроллеры и т.д. Важной функцией информационно-управляющей структуры является реализация технологического процесса с минимальными затратами электрической энергии и высокими показателями качества измерения параметров системы.

По способу передачи механической энергии от двигательной к рабочей части привода, тяговые электроприводы можно разделить на три группы: групповой электропривод, одиночный и взаимосвязанный (рисунок 1.2).

В групповом электроприводе только один электродвигатель приводит в движение 2 или более рабочие машины, которые соединены с ним с помощью механической трансмиссии. Наличие механической трансмиссии плохо влияет на общий КПД данного типа электропривода, а также снижает надежность системы. В последнее время использования групповой схемы электропривода всё менее популярно, из-за стремления промышленности и транспорта к увеличению энергоэффективности электропривода.





отличительной особенностью таких установок является общая нагрузка, и проблема обеспечения ее равномерного распределения между двигателями является одной из важнейших для многодвигательных электроприводов. Наиболее точное выравнивание нагрузки обеспечивается в многодвигательных системах с индивидуальными взаимосвязанными электроприводами, выполненными по схеме Ведущий-ведомый.

Взаимосвязанный электропривод в установках большой мощности позволяет уменьшить нагрузку каждого двигателя и тем самым облегчить передачу энергии к рабочему органу. Однако при недостаточной увязке применяемых двигателей общие затраты мощности могут оказаться значительно выше, чем при установке однодвигательного привода [10]. С целью обеспечения надежной эксплуатации привода запасы мощности рекомендуется принимать трехкратными [11], что приводит к необходимости повышения запаса прочности элементов конструкции и, как следствие, увеличению параметров оборудования, потерь энергии, эксплуатационных затрат и пр. При недостаточной согласованности взаимодействия нагрузки отдельных двигателей параметры многомоторных электроприводов могут превысить допустимые значения и вызвать преждевременный выход двигателей из строя.

При переменных значениях момента  $M$  (тока двигателя  $I$ ) каждый двигатель должен выбираться в соответствии с его эквивалентной нагрузкой. Таким образом, общая расчетная мощность привода составит

$$P_{об} = \sum_{k=1}^n \omega_n \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_{ki}^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}} \quad (1)$$

где  $\omega_n$  – номинальная скорость двигателя;  $t$  – время;  $k = 1, 2, \dots, n$  – индексы соответствующие нумерации двигателей;  $i = 1, 2, \dots, m$  – индексы нумерации нагрузок.

При совместной работе двигателей в установившихся режимах минимально затрачиваемая мощность эквивалентна мощности однодвигательного привода, приравненная мощности многодвигательного или однодвигательного приводов.

Данное условие может быть выполнено лишь в том случае, когда режимы нагружения каждого из двигателей будут соответствовать общему характеру изменения нагрузок. При этом двигатели могут иметь различные мощности, при этом синхронность скоростей обеспечивается за счет механических связей, соединяющих общий вал привода. Еще одним важным критерием при распределении момента является согласование жесткостей многодвигательной системы, при этом магнитный поток прямо пропорционален жесткости характеристики. Даже при незначительном изменении магнитного потока возможен большой перепад нагрузок. В таком случае, если двигатели одинаковой мощности, вся нагрузка будет воспринимается только одним двигателем. Второй из двигателей переходит в генераторный режим и создает дополнительную нагрузку (перегрузка двигателя превышает 100 %). Причиной изменения магнитного потока может стать различие температур нагрева двигателей, оказывающих значительное влияние на магнитную проницаемость среды. Следует заметить, что даже при равномерном распределении нагрузок условия охлаждения двигателей могут отличаться вследствие неравенства воздушных зазоров, различия вентиляции, коэффициентов полезного действия. Указанные причины особенно при жестких механических характеристиках могут приводить к наблюдающемуся изменению настройки системы.

Нужно учитывать, что согласование только жесткостей без выравнивания скоростей холостого хода не приводит к пропорциональному распределению нагрузок. С изменением угловой скорости привода изменяется и пропорциональность распределения моментов [12].

Чаще всего алгоритмы выравнивания нагрузки заданы в микроконтроллерных системах преобразователей частоты на базе асинхронных электроприводов многодвигательных систем. Начнем рассмотрение с линеаризованной механической характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя при питании его от сети.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		17

При рассмотрении естественной механической характеристики при питании от сети скорость двигателя уменьшается по мере увеличения нагрузки. Жесткость механической характеристики определяется параметром скольжения, который зависит от типа и характеристик двигателя (рисунок 1.3).

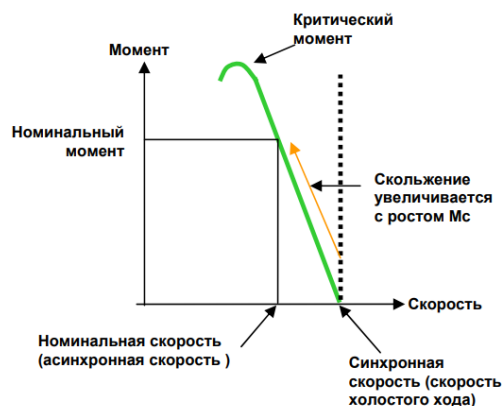


Рисунок 1.3 – Естественная механическая характеристика АД.

Распределение нагрузки в двухдвигательных электроприводах при питании от сети значительно отличается от предыдущего варианта. При параллельном включении двигателей, имеющих равные скорости идеального холостого хода и связанных общим механическим валом, нагрузка между ними распределяется пропорционально жесткости их механических характеристик. Двигатель с более жесткой характеристикой будет перегружен и, как видно из рисунка, тем больше, чем больше нагрузка (рисунок 1.4).

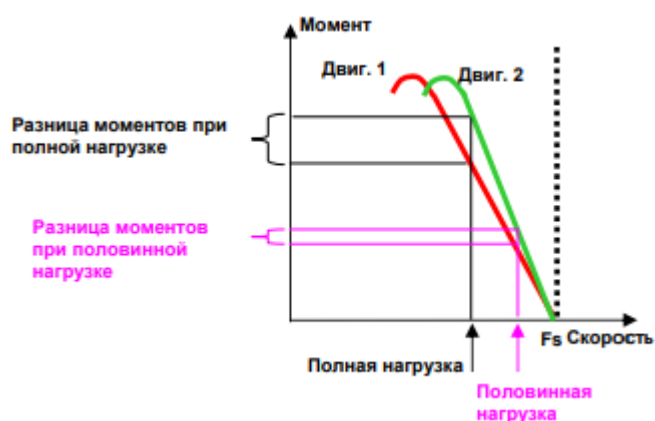


Рисунок 1.4 - Распределение нагрузки в двухдвигательном приводе при питании от сети.

Выравнивание нагрузки в частотно-регулируемых приводах.



При проектировании или модернизации многодвигательных приводов могут быть рассмотрены различные варианты их построения, базирующиеся на применении общего (группового) или индивидуального регулируемого электропривода. В обоих случаях должно быть обеспечено равномерное распределение нагрузок между двигателями. И если для группового электропривода степень равномерности распределения нагрузки зависит от идентичности параметров двигателей, то для индивидуального регулируемого электропривода выравнивание нагрузки зависит от принятой структуры многодвигательной системы. Рассмотрим три наиболее распространенных способа выравнивания нагрузки в ПЧ:

- Выравнивание нагрузки с помощью компенсации скольжения двигателя.
- Выравнивание нагрузки.
- Выравнивание нагрузки по принципу Ведущий-ведомый.

Выравнивание нагрузки с помощью скольжения двигателя. При питании двух двигателей, связанных общим механическим валом, от одного ПЧ «естественное» распределение нагрузки между ними получается при отсутствии компенсации скольжения (рисунок 1.5). При полной идентичности характеристик обоих двигателей нагрузка между ними будет распределяться поровну. Однако практически вследствие разброса параметров они будут загружены неравномерно по аналогии с распределением нагрузки в двухдвигательном приводе при питании от сети. Работа при таком режиме возможна только при использовании скалярного и векторного управления по напряжению.

Преимуществами такого варианта являются низкая стоимость, простота и надежность. Недостатком такого способа будет необходимость использования идентичных двигателей для получения наиболее оптимальных характеристик. Также выравнивание нагрузки между неидентичными двигателями будет ухудшаться с увеличением нагрузки. Кроме того, возникает необходимость



примером применения будет являться многодвигательные привода конвейеров и центрифуг.



Рисунок 1.6 – Принцип выравнивания нагрузки.

Конфигурация Ведомый-ведущий. Такая система применяется для автоматического выравнивания нагрузки в случаях, когда два или более двигателей, питаемых от индивидуальных ПЧ, связаны кинематически друг с другом и, следовательно, вращаются принудительно с одинаковой скоростью. Она может также применяться для улучшения характеристик многодвигательного привода при наличии упругой кинематической связи между двигателями. Оба привода получают одинаковое задание скорости. Кроме того, Ведомый ПЧ получает также от Ведущего ПЧ сигнал задания пропорциональный моменту. Ведомый ПЧ будет управлять двигателем таким образом, чтобы равномерно распределять нагрузку между двигателями.

При управлении моментом Ведомый ПЧ может управлять скоростью в соответствии с заданным значением (одинаковым для обоих приводов) в пределах настраиваемой зоны нечувствительности. При достижении внутреннего или внешнего ограничения преобразователь переходит автоматически к регулированию скорости (положение ограничения) (рисунок 1.7).

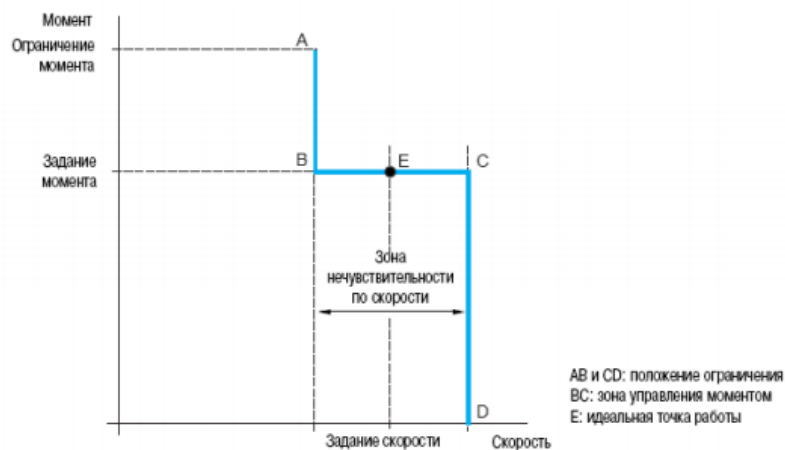


Рисунок 1.7 – График распределения нагрузки по принципу Ведомый – ведущий.

Преимуществами такого принципа распределения нагрузки будет относительное быстроедействие и точное выравнивание нагрузки между двигателями и автоматическое выравнивание нагрузки в системе. Однако основным и немаловажным минусом системы является необходимость в надежной механической взаимосвязи приводов, что несомненно приводит к удорожанию конструкции. Управление такого типа находит применение в системах подъемно-транспортного оборудования, лебедках, конвейерах большой протяженности, лифтах, т.е. в любых механизмах, в которых два или более двигателей работают на общий вал.

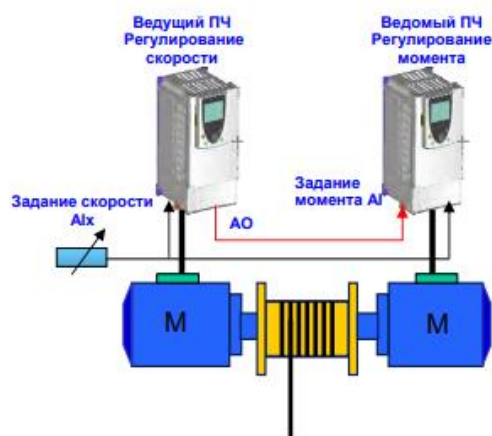


Рисунок 1.8 – Принцип выравнивания нагрузки Ведомый – ведущий.

Такие системы чаще всего реализованы через преобразователи частоты, имеющие дополнительный функционал по управлению режимами работы электроприводов [13] (рисунок 1.8).













асинхронном двигателе, необходимо учитывать точность системы измерения основных показателей электрической цепи, таких как ток, напряжение, мощность, угловое перемещение. Это связано с тем, что в асинхронных двигателях момент имеет квадратичную зависимость от напряжения, а, в синхронных, прямую зависимость от тока.

В основном диапазоне мощностей 20...70 кВт наибольшее развитие получили асинхронный электропривод (АЭП) и электропривод с синхронным двигателем на основе постоянных магнитов (СЭППМ). Отметим, что в настоящее время отсутствует методика корректного сопоставления двигателей различных типов. АЭП характеризуется наилучшим соотношением цена/качество. СЭППМ имеет некоторое преимущество в КПД, но стоит дороже. В АЭП работа с ограничением мощности обеспечивается при ограничении напряжения питания двигателя за счет соответствующего ослабления поля. В синхронном приводе с постоянными магнитами поле практически не регулируется, что приводит к необходимости завышения установленной мощности преобразователя в 3-10 раз. Для приводов легких транспортных средств это приемлемо; для средних и тяжелых транспортных средств это приводит к недопустимому удорожанию системы привода.

Тяговый теплоэлектрический привод автомобиля относится к электроприводам с однотипной энергетической установкой. В настоящее время, он проектируется для многих транспортных средств, в том числе: автосамосвалов и автопоездов, многоосных автомобилей повышенной проходимости с активным приводом прицепов, специальных автомобилей и автомобилей для пассажирских перевозок средней грузоподъемности.

Для электромобилей функциональная схема тягового электропривода имеет вид, изображенный на рисунке 1.13.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		28





Подобные прогрессивные конструкторские решения наталкивают на мысль о непрерывном развитии индустрии электромобильного производства и актуальности темы выпускной квалификационной работы.

В связи с этим представляется необходимым измерение и управление косвенным методом такой важной в электрическом приводе координатой как крутящий момент. На данный момент наиболее распространенными в промышленности являются скалярный и векторный системы управления. Рассмотрим поподробнее каждый из них.

Вывод по разделу один. Рассмотрена структура тягового электропривода и элементы, образующие основную функциональную схему. Проведен аналитический обзор существующих типов двигателей, применяемых в тяговом электроприводе. Замечена четкая тенденция развития тяговых машин в сторону электродвигателей переменного тока. Отмечены основные способы распределения нагрузки в многодвигательных тяговых электроприводах.

## 2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В работе поставлена задача разработки электронного измерителя крутящего момента в составе тягового электропривода, повышающего точность определения электромагнитного момента  $M_{ЭМ}$ . Это достигается по средствам энергетического метода управления тяговым электроприводом, изложенного в многочисленных статьях [18, 19, 20] и являющегося прототипом для технологии определения мгновенного электромагнитного момента тягового электропривода [21], применительно к асинхронным двигателям средней и высокой мощности. В его основу положено уравнение мгновенного баланса активной мощности электрических машин. Энергетический метод позволяет учесть недостатки алгоритмов векторного управления и повысить точность определения  $M$  в 3-4 раза. Достижение вышеуказанного уровня точности возможно при выполнении ряда определенных условий. Во-первых, прямое измерение мгновенной активной мощности  $P_{1Н}$  и угловой скорости  $\omega_H$

										Лис
										31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ					









акустических волн (ПАВ). В основу принципа измерения положено свойство проводника при относительных изменениях сопротивления пропорционально изменять удлинение (скручивание) проводника. Это точная, но очень сложная методика, требующая применения ВКУ или устройств беспроводной передачи данных между тензодатчиком на вращающемся валу и окружающим миром. Однако разница между теорией тензометрических измерений и практикой использования таких датчиков колоссальна. Тензометрическим датчикам присуще иметь большие температурные коэффициенты и свойство отрываться от поверхности измерения при ухудшении условий измерения. Определение крутящего момента с помощью тензодатчиков или датчиков ПАВ целесообразно в лабораторных условиях, но для большинства промышленных применений совершенно не реалистично. Датчики, измеряющие электрический угол поворота ротора имеют ещё одну проблему. Она состоит в том, что для измерения крутящего момента используется определение величины скручивания материала вала, порог чувствительности которого начинается с достаточно значительных цифр. Это может привести к использованию мягких торсионных конструкций, которые не позволяют осуществлять движение двигателя на высоких скоростях, используя лишь медленные измерительные процессы.

Серийно выпускаемый датчик крутящего момента с вращающимся валом и статическим телом (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 - Датчик крутящего момента серии М425.



одного компенсирующего элемента. Это позволяет легко интегрировать его в систему.

Таблица 2.2 - Технические данные датчика крутящего момента серии TF.

Модель	Номинальный крутящий момент	Допустимая перегрузка	Класс точности*, %	Максимальная частота вращения	Жесткость на кручение	Угол деформации	Момент инерции
	Н·м	% от ном.зн.		об/мин	Н·м/рад	°	кг·м <sup>2</sup>
TF 209	20	200	0.1	14000	$3.82 \cdot 10^4$	0.03	$2.92 \cdot 10^{-3}$
TF 211	100	200	0.1	14000	$1.25 \cdot 10^5$	0.046	$3.17 \cdot 10^{-3}$
TF 213	500	200	0.1	8000	$7.16 \cdot 10^5$	0.04	$7.8 \cdot 10^{-3}$
TF 214	1000	200	0.1	8000	$9.55 \cdot 10^5$	0.06	$7.82 \cdot 10^{-3}$
TF 216	5000	200	0.1	4000	$7.16 \cdot 10^6$	0.04	$47,4 \cdot 10^{-3}$
TF 217	10000	±150	0.1	4000	$1.25 \cdot 10^7$	0.04	$47,1 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2.3 – Дополнительные данные преобразователя данных в составе датчика момента серии TF.

<b>ИЗМЕРЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА</b>	
Максимальный крутящий момент без повреждения (допустимый предел)	400% от ном. зн.
<b>ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ</b>	
Разрешение	14 бит
<b>ВНЕШНИЕ УСЛОВИЯ</b>	
Рабочий температурный диапазон	+10°C ÷ +85°C
Допустимая температура хранения	-25°C ÷ +85°C
Расширенный температурный диапазон (опция)	-30°C ÷ +125°C
Влияние температуры на нуле	0.01%/°C
Класс защиты	IP42 (опция IP54)
<b>ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ СИГНАЛЫ</b>	
Напряжение питания	24 В ± 10%, max 350mA
Выходной сигнал по моменту (номин./max)	±5 В / ± 10 В
Выходной сигнал по частоте вращения	TTL (частота импульсов соответствует количеству зубьев)
Частотный диапазон	0 ± 1 кГц (-3 Дб)

Телеметрическая система датчика крутящего момента TF не дает возможность передавать высокоточный сигнал. Усилитель сигнала, установленный в измерительном фланце, модулирует его в высокочастотный



Муфты не изменяют вращающего момента и направления вращения. Некоторые типы муфт предназначены для поглощения вибрации и толчков, а также предохраняют машину от аварий при перегрузках.

Еще один интересным вариантом является одноканальная 12-битная телеметрическая система TEL1-PCM-IND, которая реализует беспроводную передачу сигналов с вращающихся валов (рисунок 2.4). Аналоговые датчики (тензометрические ( $\Rightarrow 350 \text{ Ом}$ ) с полно- и полумостовой конфигурацией, термопары, термосопротивления, вольтовые  $\pm 10\text{В}$ , токовые  $0(4)\dots 20 \text{ мА}$ , потенциометрические) подключаются к разъемам энкодера под «пайку». Полученные данные проходят через низкочастотный фильтр (1200 Гц), усиливаются с заданным коэффициентом (250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000), оцифровываются (12 бит) и передаются в формате импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) на индукционную обмотку вала. Магнитное поле данной обмотки обеспечивает питание всей системы и передачу сигнала с катушки на индуктивную приемную головку. Оттуда сигнал передается по кабелю (5 м) на приемник (декодер). Максимальное расстояние между катушкой передатчика и головкой – 35 мм.

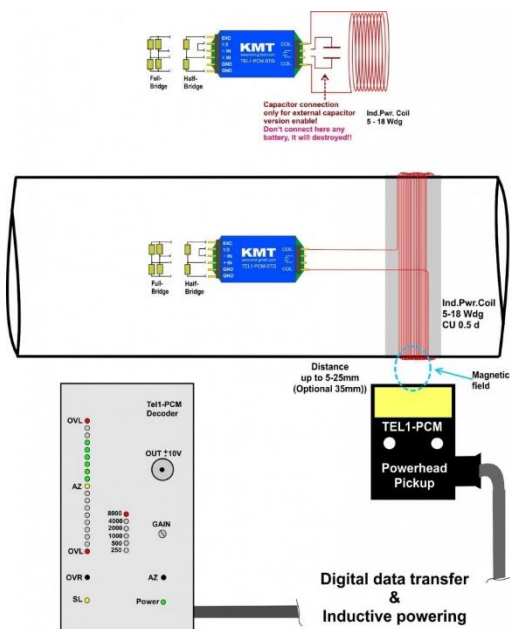


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема подключения телеметрического датчика момента.



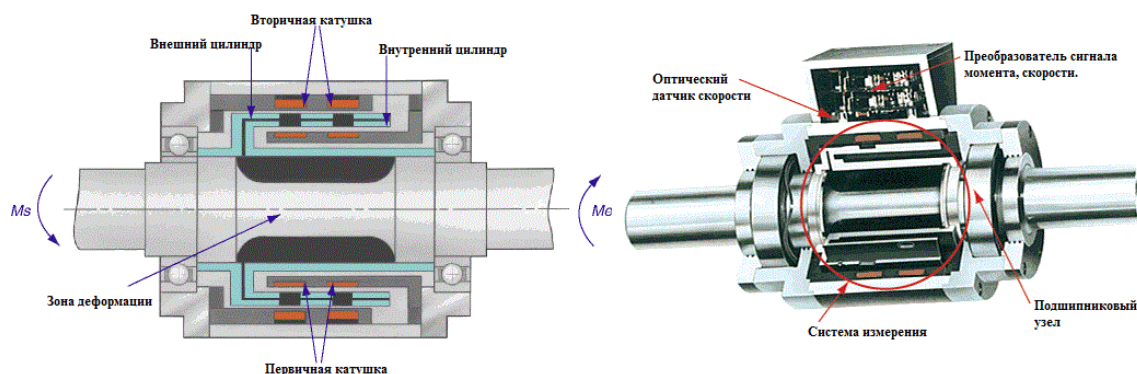


Рисунок 2.5 – Принцип работы датчика крутящего момента и его внешний вид.

Таблица 2.4 – Технические данные датчика крутящего момента серии ТМ.

Номинальный крутящий момент	Серия ТМВ		Серия ТМ		Серия ТМНС		Выходной конец вала	
	Класс точности, %	Максимальная частота вращения, об/мин*	Класс точности, %	Максимальная частота вращения, об/мин*	Класс точности, %	Максимальная частота вращения, об/мин*	гладкий	шлицевой
50	≤0.15	4 000	<0.1	10 000	<0.1	32 000	х	
100	≤0.15	4 000	<0.1	10 000	<0.1	32 000	х	
500	≤0.15	4 000	<0.1	10 000	<0.1	24 000	х	х
1 000		н/д	<0.1	7 000	<0.1	16 000	х	х
5 000		н/д	<0.1	5 000	<0.1	12 000		х
10 000		н/д	<0.1	5 000	<0.15	12 000		х

Оба цилиндра по окружности имеют совпадающий ряд пазов и вращаются вместе с валом внутри катушек. Через первичную катушку непрерывно протекает переменный ток с частотой 20 кГц. Когда прикладывается усилие, пазы на двух цилиндрах начинают смещаться. При этом зона деформации подвергается угловой деформации, а пазы начинают перекрываться. Таким образом, во вторичной катушке возникает ЭДС пропорционально прикладываемому крутящему моменту.

Обрабатывающая электроника преобразует ЭДС в напряжение от +10 до -10В в зависимости от направления крутящего момента. Измерение скорости интегрировано с помощью оптического датчика частоты вращения,







оборудовании, образовании, производстве, при контроле качества продукции, так и в силовых агрегатах различной мощности, начиная от сельского хозяйства и ветряных генераторов в возобновляемой энергетике и заканчивая контролем крутящего момента в буровых вышках бурильных колонн и даже кораблестроении (при измерении момента гребного вала судна). Ниже, более подробно, представлены только некоторые сферы их применения в различных областях энергетики и электротехники.

Таблица 2.5 – Сферы применения датчиков крутящего момента.

<b>Образование</b>	<b>Научные исследования, Разработка изделий, Испытания</b>	<b>Производство, контроль качества, Мониторинг продукции</b>	<b>Прочие применения</b>
<b>Электродвигатели</b> Характеристические кривые Мощность Крутящий момент <b>Двигатели внутреннего сгорания</b> Мощность Крутящий момент	<b>Испытательные стенды</b> Роликовые испытательные стенды Электродвигатели Двигатели внутреннего сгорания Коробки передач Генераторы Вентиляторы Насосы <b>Реология</b> Реометр <b>Датчики крутящего момента, встроенные в автомобиль</b>	<b>Системы управления и регулирования</b> Момент затяжки болтовых соединений <b>Выравнивание, Балансирование</b> Предварительная нагрузка подшипников Предварительное натяжение пружин Зазор <b>Винтовая техника</b> Момент затяжки Момент расслабления <b>Проверка функционирования</b> Момент вращения кривошипа Генераторы Компрессоры Насосы Вентиляторы Транспортировочная лента Электродвигатели <b>Реология</b> Реометр <b>Стенды для</b>	<b>Ветряные генераторы</b> Мощность Крутящий момент <b>Буровые вышки</b> Крутящий момент в бурильной колонне <b>Сельское хозяйство</b> Машины управляемые крутящим моментом <b>Кораблестроение</b> Гребной вал судна

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ

Лист

44

		<b>долгосрочных испытаний</b> Ручной инструмент Бытовая техника Автомобиль Двигатели внутреннего сгорания	
--	--	--	--

Измерение крутящего момента по средствам вышеупомянутых датчиков имеет ряд преимуществ. Во-первых, данный способ отличается значительной точностью измерения крутящего момента. Во-вторых, такой комплекс может иметь возможность дополнения системы измерения для определения дополнительных параметров системы электропривода. Ну и в-третьих, благодаря дисковому ротору динамометр вращается с небольшим крутящим моментом и моментом инерции. Да и сам принцип измерения достаточно прост.

Однако, при использовании таких установок возникает ряд проблем и конструктивных сложностей. Цена таких систем измерения может достигать значительных сумм, так как имеет сложность в изготовлении. Кроме того, установка и обслуживание подобной конструкции требует точности и профессионализма от обслуживающего персонала. Размеры подвида динамометров - моментометров многократно превышают размеры двигателя, что приводит к ряду затруднений (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Сравнение размеров моментометра и обычного человека.

Поэтому можно сделать следующий вывод. Зачастую применение современного датчика угловых перемещений позволяет добиться требуемых показателей качества регулирования, но наличие измерительного прибора на валу двигателя приводит к усложнению установки, замены и эксплуатации оборудования и росту стоимости электропривода. В ряде случаев установка датчика на вал либо нецелесообразна из-за указанных недостатков (например, для электроприводов уличных транспортеров и др. [30]), либо принципиально невозможна по условиям технологического процесса, например, из-за наличия радиации, излучений, высоких температур, параметрической ограниченности пространства производственного помещения.

Так как электропривод переменного тока все чаще применяется в тяжелых эксплуатационных условиях, например, пыль, грязь, радиация, повышенная влажность, то класс защиты и стоимость оборудования играют особо важную роль. Более того, все чаще встречается тенденция использования оборудования и механизмов управления и диагностики, устанавливаемых непосредственно на механизме (например, на валу двигателя), но так, чтобы оно стояло не рядом или в отдельном помещении, как было сказано ранее про динамометры. Таким образом, целесообразнее использовать второй метод измерения и управления моментом – косвенный метод. Точность оценки крутящего момента двигателя в составе системы тягового электропривода определяется характеристиками используемого для оценки метода, качеством синтеза вычислителя, принципиальной возможностью в той или иной системе электропривода получать достоверную информацию по доступным для прямого измерения переменным, а также параметрами вычислительной аппаратуры. В тяговых электроприводах наибольшее применение нашли именно косвенные методы определения крутящего момента.

## 2.2. Методы измерения крутящего момента

### Скалярный метод управления

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		46











системы во вращающуюся называют преобразованием Парка. Оно выполняется по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_d &= A_\beta \sin\varphi - A_\alpha \cos\varphi \\ A_q &= A_\beta \cos\varphi - A_\alpha \sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Возможно также обратное преобразование Парка:

$$\left. \begin{aligned} A_\alpha &= A_d \cos\varphi - A_q \sin\varphi \\ A_\beta &= A_d \sin\varphi - A_q \cos\varphi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Как видно (3) и (4), для выполнения преобразований необходимо знать угол поворота системы, т.е. ротора двигателя, который нужно измерить или рассчитать.

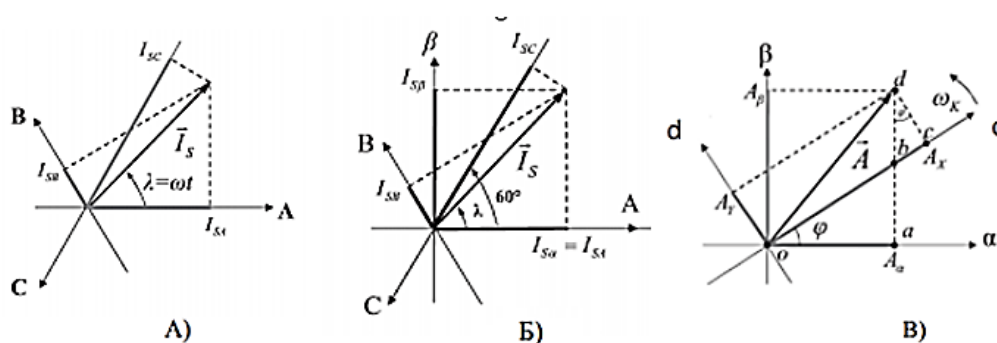


Рисунок 2.11 – Системы координат векторного управления.

Смысл вращающейся системы координат заключается в том, что система управления строится в координатах, вращающихся вместе с управляемым вектором. И поскольку управляемый вектор не вращается относительно системы координат, то его амплитуда и фаза определяется только двумя скалярными величинами – его проекциями на оси d и q. Система векторного управления является, по сути, системой регулирования момента двигателя. Ведь из уравнения механического равновесия двигателя известно, что вал двигателя вращается с постоянной скоростью в случае, если развиваемый двигателем момент и момент сопротивления нагрузки равны. В противном случае двигатель будет или разгоняться, или тормозиться. Момент двигателя

создается вследствие взаимодействия тока и потокосцепления статора. Для трехфазного двигателя момент определяется выражением:

$$M = \frac{3}{2} Z_p I_s \Psi_s, \quad (5)$$

где  $Z_p$  – число пар полюсов;  $I_s$  – статорный ток двигателя;  $\Psi_s$  – потокосцепление статора.

Или переход к осям dq:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (I_{sq} \Psi_d - I_{sd} \Psi_q). \quad (6)$$

Потокосцепление можно выразить через индуктивность статора по соответствующим осям:

$$\Psi_d = L_{sd} I_{sd} + \Psi_f, \quad (7)$$

$$\Psi_q = L_{sq} I_{sq}. \quad (8)$$

С учётом этих выражений можно переписать уравнение момента в следующем виде:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (I_{sq} \Psi_f + I_{sd} \Psi_{sq} (L_{sd} - L_{sq})). \quad (9)$$

Будем рассматривать управление двигателем с неявнополюсным ротором. Как известно, у такого двигателя индуктивности статора по осям d и q равны. Следовательно, выражение для момента такого двигателя упростится:

$$M = \frac{3}{2} Z_p I_{sq} \Psi_f. \quad (10)$$

Из этого выражения видно, что при постоянном потоке ротора (постоянного магнита), момент двигателя зависит только от q-составляющей статорного тока. А d-составляющая является паразитной, не создает момент и только вызывает дополнительные потери. Таким образом, управлять моментом двигателя можно, управляя q составляющей статорного тока, поддерживая d-составляющую равной нулю [34, 35].





было изобрести внешнее коммутирующее устройство, позволяющее регулировать основные параметры привода. Причем, чем мощнее был двигатель, тем выше были токи фаз двигателя и серьезнее ощущалась необходимость в их коммутации. Однако только в последние десятилетия с развитием полупроводниковой техники наметился бурный рост систем управления тяговым электроприводом на базе двигателей переменного тока.

Выделим ключевые достоинства машин на переменном токе:

- отсутствие коммутатора в конструкции;
- редукция контакторно-релейной аппаратуры;
- повышение надежности конструкции в следствии отсутствия коллекторной части двигателя;
- улучшение тяговых способностей электропривода за счет более жесткой механической и электромеханической характеристик, что уменьшает склонность к пробуксовке;
- значительное уменьшение расхода меди в производстве тяговых двигателей за счет исключения якорной обмотки, т.е. при одном и том же моменте и частоте, объем меди сокращается в несколько раз;
- существенное снижение массогабаритных параметров тяговых двигателей, за счет уменьшения количества используемой меди;
- уровень развития современной техники позволяет автоматизировать процесс управления различными режимами работы двигателя.

Еще в середине 80-х гг. двадцатого века рассматривался вопрос создания электровозов либо с вентильными (синхронными) тяговыми двигателями, либо с асинхронными машинами [37].

Исходя из вышесказанного основными преимуществами, учитывающиеся в системе ТЭП с электронным измерителем крутящего момента, являются облегчение схемы управления и ее автоматизация. Действительно, система обладает возможностью автоматического регулирования параметрами двигателя за счет обратных связей по амплитуде входного сигнала через

инвертор напряжения и обратной связи по моменту и его управляющего воздействия по моменту. Задающий сигнал или функция  $Y_i$  определяет состояние электромагнитной системы и критерии управления внутренними параметрами двигателя (рисунок 3.1).

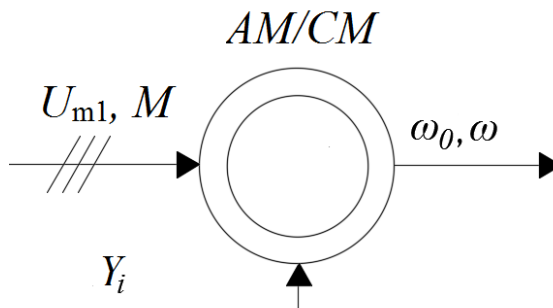


Рисунок 3.1 – Функциональная схема переменных управления.

ИИС ТЭП универсальна как для асинхронных, так и для синхронных машин. С блока источника питания ИП подается сигнал задания напряжения  $U_d$  на преобразователь частоты ПЧ, в котором происходит преобразование координат по заданным алгоритмам широтно-импульсной модуляции (рисунок 3.2). Далее через блок измерительных преобразователей, состоящих из датчиков тока и напряжения, измеряющих текущее состояние трехфазной системы, непосредственно на двигатель переменного тока (AM/CM). Непосредственно с валом двигателя (или через общий механический вал в случае многодвигательного привода) соединен рабочий орган электропривода, создающий момент сопротивления  $M_C$  и момент инерции нагрузки  $J$ . Непосредственно на вал ротора подсоединен датчик угловых перемещений, подающий информацию об угле поворота вала  $\alpha$  и угловой скорости ротора  $\omega$ . Информация о состоянии системы передается на монитор нагрузки, в котором происходит обработка данных электромагнитной системы привода на основе энергетического метода управления. При этом первые гармоники напряжений необходимо выделять в мониторе нагрузки путем аналого-цифровой фильтрации сигналов датчиков напряжений. По результатам единичного измерения массива токов и напряжений определяется мгновенное значение активной мощности  $P_1$  и момента  $M_{ЭМ}$ , а также друг параметров системы, таких

как мгновенные значения амплитуд  $U_{1m}, I_{1m}$ , реактивной мощности  $Q_1(T_i^*)$ , фазовых соотношений между гармониками напряжения и тока  $\cos\varphi_1(T_i^*), \sin\varphi_1(T_i^*)$ . Перечисленные данные необходимы для вычисления в мониторе нагрузки суммарных потерь мощности электрических машин. Так как электромагнитный момент является основной координатой управления тяговым приводом, то непосредственный сигнал подается на систему управления.

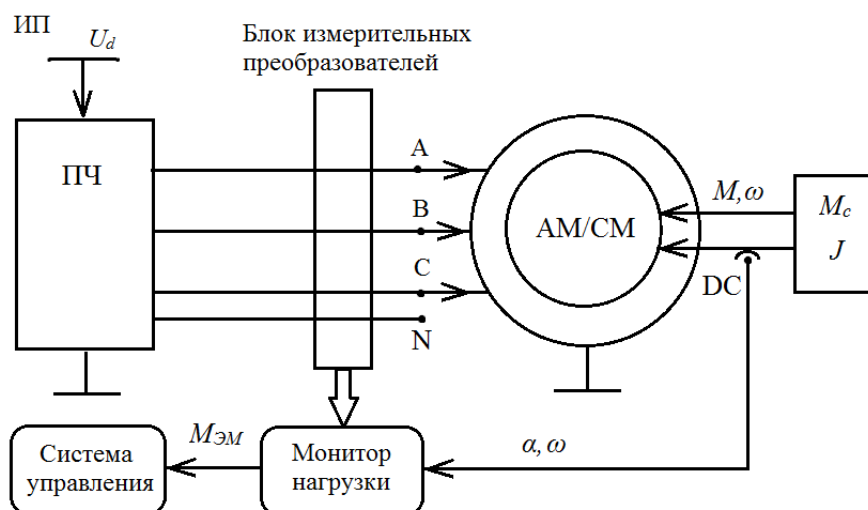


Рисунок 3.2 - Обобщенная функциональная схема информационно-измерительной системы тягового электропривода: ИП – источник питания; ПЧ – преобразователь частоты; AM/CM – асинхронная/синхронная машина; DC – датчик угла поворота  $\alpha$  и угловой скорости ротора  $\omega$ ;  $M_c, J$  – момент сопротивления и инерции нагрузки,  $M_{эм}$  – электромагнитный момент.

Основным носителем энергии между преобразователем частоты и электрической машиной являются первые гармоники токов и напряжений. Трехфазные токи, которые формируют ПЧ, близки по форме к синусоидальным. Однако, напряжения на выходе ПЧ имеют импульсно-модулированный характер [38]. Первые гармоники напряжений необходимо выделять в мониторе нагрузки путем аналого-цифровой фильтрации сигналов датчиков напряжений ДН. Более подробно эти вопросы рассмотрены в [39]. Будем считать, что задачи аналого-цифровой фильтрации первичной информации решены, поэтому обратимся к алгоритмам вычисления мощности  $P_1(t)$  по первым гармоникам токов и напряжений.

Предположим, что в момент времени  $T_i^*$  выполняется опрос трехфазной цепи с помощью датчиков тока и напряжения и в мониторе нагрузки формируется массив первичных данных в виде мгновенных значений первых гармоник линейных токов и напряжений

$$\begin{pmatrix} i_A & i_C \\ u_{CA} & u_{AB} \end{pmatrix}_{T_i^*} \quad (11)$$

Преобразуем его в массив фазных токов и напряжений:

$$\begin{pmatrix} i_A & i_B & i_C \\ u_{AN} & u_{BN} & u_{CN} \end{pmatrix}_{T_i^*} \quad (12)$$

Учитывая взаимосвязь линейных и фазных величин

$i_B = -(i_A + i_C)$ ,  $u_{AB} = u_{AN} - u_{BN}$ ,  $u_{BC} = u_{BN} - u_{CN}$ ,  $u_{CA} = u_{CN} - u_{AN}$ , формулы пересчета данных массива (3.2) имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{AN} &= \frac{u_{BC} + 2 \cdot u_{AB}}{3} \\ u_{BN} &= \frac{u_{CA} + 2 \cdot u_{BC}}{3} \\ u_{CN} &= \frac{u_{AB} + 2 \cdot u_{CA}}{3} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Выясним возможность определения параметров электрической цепи по результатам единичного измерения массива (12) первичных данных.

Линейные напряжения и токи представлены в численно-аналитическом виде

$$\left. \begin{aligned} u_{AB}^* &= U_{мл}^* \sin(2\pi\Delta i - \pi) \\ u_{CA}^* &= U_{мл}^* \sin(2\pi\Delta i - \frac{4}{3}\pi) \\ i_A^* &= I_{мф}^* \sin(2\pi\Delta i + \frac{5}{6}\pi - \varphi_1) \\ i_C^* &= I_{мф}^* \sin(2\pi\Delta i + \frac{\pi}{2} - \varphi_1) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где  $U_{мл}^*$  и  $I_{мф}^*$  - относительные амплитуды первой гармоники линейного напряжения и фазного тока;

$\Delta = \frac{\Delta t}{T}$  - шаг квантования;

$i = 1 \dots N$  - текущий номер расчетной точки;

$N$  - число расчетных точек в периоде  $T$ .

Расчеты выполнены при относительных единицах  $U_{мл}^*$  и  $I_{мф}^*$  и  $N = 1000$ .



Обработка данных массива (12) выполняется по технологии обобщенного энергетического потока трехфазных электромеханических преобразователей [40].

При преобразовании массива данных (12) и формул (14) получаем уравнения мгновенной информации трехфазной цепи АМ/СМ.

$$\left. \begin{aligned} u_{A1} &= U_{1m} \sin \omega_0 t \\ u_{B1} &= U_{1m} \sin(\omega_0 t - 120^\circ) \\ u_{C1} &= U_{1m} \sin(\omega_0 t + 120^\circ) \\ i_{A1} &= I_{1m} \sin(\omega_0 t - \varphi_1) \\ i_{B1} &= I_{1m} \sin(\omega_0 t - 120 - \varphi_1) \\ i_{C1} &= I_{1m} \sin(\omega_0 t + 120 - \varphi_1) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Уравнения основного энергоносителя (15) позволяют определять потребляемую мощность  $P_1(t)$  в системе тягового электропривода и вытекающие из этих вычислений параметры, которые мы рассмотрим ниже.

Таким образом, представляется очевидной актуальность данной выпускной квалификационной работы. Электрический привод с измерителем крутящего момента облегчает решение задачи контроля вязкости, влажности и однородности теста в производстве хлебной продукции, глиняного, песочно-цементного и других растворов в производстве строительных материалов. транспортных средств и частичной заменой тепловых двигателей электрическими или гибридными для электрификации мобильного парка с целью улучшения экологической ситуации в городах. Современный уровень развития силовой полупроводниковой техники и достижения в технологии производства постоянных магнитов позволяют создать тяговые регулируемые электроприводы для электромобилей, поездов и других транспортных средств на базе электродвигателей постоянного и переменного тока [41]. Привод переменного тока имеет ряд преимуществ и, по сравнению с приводом постоянного тока по надёжности и долговечности, меньшим габаритам. Несмотря на более сложную и дорогостоящую систему регулирования, использование его на электромобиле оказывается целесообразным [42]. Исходя из представленных ранее способов измерения и управления крутящим

моментом в тяговых электроприводах переменного тока, необходимо составить общую структуру управления электроприводом с электронным измерителем крутящего момента, который позволил бы осуществлять энергоэффективное, удобное, а главное точное измерение и регулирование параметров ТЭП.

Разработана функциональная схема и алгоритмы работы информационно-измерительной системы тягового электропривода, предназначенной для формирования обратной связи по электромагнитному моменту  $M_{ЭМ}$  для асинхронной электрической машины. Показано, что прямое измерение параметров трехфазной цепи с помощью блока первичных датчиков, осуществляемое между преобразователем частоты и электрической машиной, позволяет, при соответствующих алгоритмах обработки первичной информации, получить массив данных в виде мгновенных значений амплитуд первой гармоники напряжений и токов, их фазовых соотношений, суммарной, активной и реактивной мощности. Определены предполагаемые требования к измерительным устройствам с целью реализации обратной связи по электромагнитному моменту на прогнозируемом уровне (2,5...3) % приведенной погрешности.

Таким образом получаем информационно-измерительную систему с датчиками фазных токов В2-В4, линейных напряжений В10-В12, внешние датчики тока нагрузки В1 и напряжения нагрузки В5, идущих к инвертору, а также датчик скорости и угла поворота В9 (рисунок 3.3).

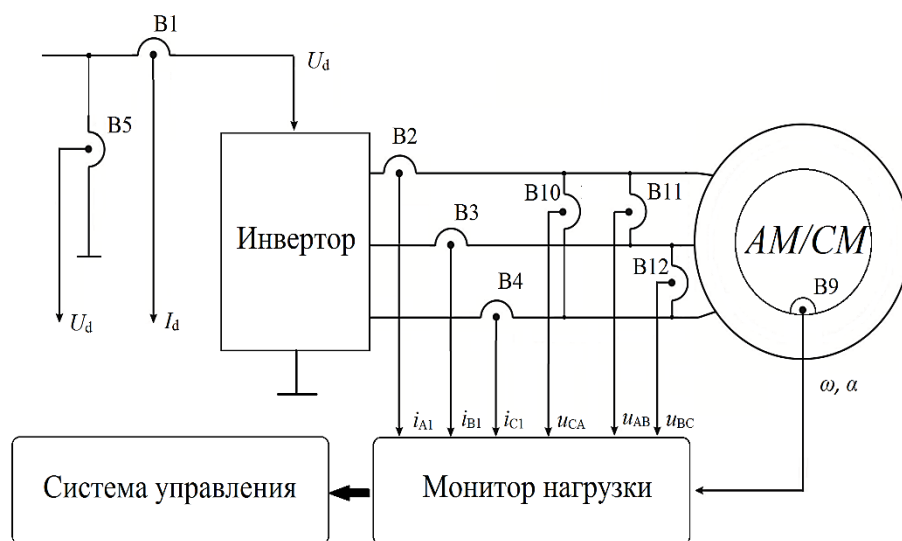


Рисунок 3.3 – Функциональная схема информационно-измерительной системы ТЭП: В1 и В5 – датчики тока и напряжения нагрузки, В2-В4 – датчики фазных токов, В10-В12 – датчики линейных напряжений, В9 – датчик скорости и углового перемещения.

### 3.2. Алгоритмы обработки измерительной информации по технологии обобщенного энергетического потока

Асинхронные (АМ) и синхронные (СМ) машины наиболее полно удовлетворяют требованиям к тяговому электроприводу по электромагнитной совместимости. Они могут обеспечивать теоретически идеальную плавность электромеханического преобразования энергии (рисунок 3.4) без вибрационных и шумовых возмущений салона автотранспорта и окружающей среды. Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) не обладают таким качеством и понадобился столетний путь развития конструкторской мысли, чтобы бензиновый мотор стал практически бесшумным, такими системами обладают, как указывалось ранее современные автомобили с системой TFTS с двойным впрыском. Машина постоянного тока близка к этому идеалу, если бы не искрение щеток, их изнашивание и пульсации в коллекторе двигателя. Вопрос превращения трехфазной электрической энергии в постоянную энергию механической нагрузки нуждается в более подробном анализе мгновенных энергетических преобразований [43].

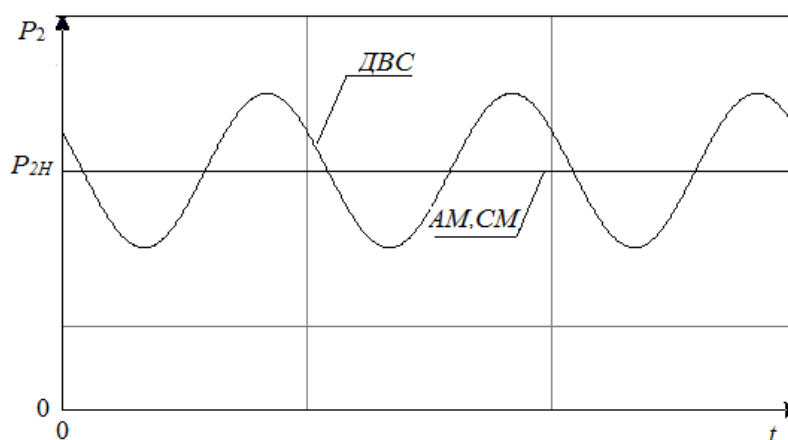


Рисунок 3.4 - Мгновенная выходная мощность в установившихся режимах.

Существует векторный метод управления, но он имеет недостатки, которые были описаны выше. Эти недостатки исключает энергетический метод управления тяговым электроприводом, основанном на теории обобщённого энергетического потока трёхфазных электромеханических преобразователей.

В трехфазных цепях электромеханических преобразователей нейтрального провода, как правило, нет. Это объясняется тем, что такие цепи симметричны. При необходимости, нейтральную клемму формируют искусственным способом. Блок информационно – измерительной системы тягового электропривода должен содержать как минимум: Блок измерительных преобразователей и измерительный наблюдатель.

Для повышения точности определения электромагнитного момента тягового электропривода необходимо определить алгоритм нахождения основных параметров системы, по которым непосредственно будет осуществляться ее контроль. Поэтому требуется выполнить задачу разработки алгоритмов, осуществляемых на базе энергетического метода, а также информационно – измерительной системы всего тягового электропривода. Кроме того, необходимо выяснить: возможно ли по результатам единичного измерения массива (12) первичных данных определить такие параметры электрической цепи как мгновенные значения амплитуд напряжения и тока  $U_{1m}, I_{1m}$ , реактивной мощности  $Q_1(T_i^*)$ , фазовых соотношений между гармониками напряжения и тока  $\cos\varphi_1(T_i^*), \sin\varphi_1(T_i^*)$ . Перечисленные данные необходимы для вычисления в мониторе контроллере нагрузки – эталонной модели суммарных потерь мощности электрических машин.

На рисунке 3.5 изображена иллюстрация обобщенного энергетического потока.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		62

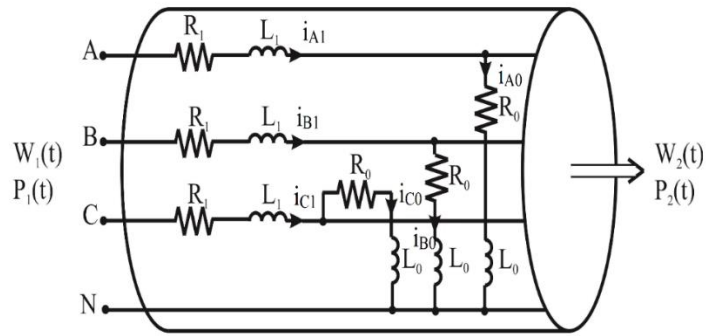


Рисунок 3.5 - Иллюстрация обобщенного энергетического потока.

В основу энергетического метода входит уравнение мгновенного баланса активной мощности. Будем считать, что задачи аналого-цифровой фильтрации первичной информации решены, поэтому обратимся к алгоритмам вычисления мощности  $P_1(t)$  по первым гармоникам токов и напряжений. Это уравнение для любой электрической машины в общем случае имеет следующий вид:

$$P_1(t) = M(t) \cdot \omega(t) + \sum \Delta P_i(t), \quad (16)$$

где  $P_1(t)$  - потребляемая электрическая мощность;

$M(t)$  и  $\omega(t)$  – вращающий момент и угловая скорость ротора электрической машины;

$\sum \Delta P_i(t)$  – суммарные потери мощности в процессе электромеханического преобразования энергии.

Заменив механический момент на электромагнитный, получаем

$$M_{эм}(t) = \frac{P_1(t) - \sum \Delta P_i(t)}{\omega(t)}. \quad (17)$$

Для того чтобы реализовать в электроприводе обратную связь по электромагнитному моменту  $M_{эм}$  в соответствии с алгоритмом (17), необходимо прямое измерение мощности  $P_1$  и угловой скорости  $\omega$ , а также косвенная оценка суммарных потерь  $\sum \Delta P_i(t)$ . Асинхронные электрические машины средней и большой мощности (30 - 315 кВт), применяемые в тяговом электроприводе, как было сказано ранее, имеют высокий номинальный КПД  $\eta_H = (90 \dots 95)\%$ .

Первые разработки алгоритма (17) относились к статике электромеханических преобразований [44, 45]. Момент определялся по эффективным величинам мощности и потерь. Для целей управления необходим динамический момент. Его получают по дифференциальным уравнениям баланса активной и реактивной мощности трехфазных электрических машин [46].

Механическая мощность  $P_2(t)$  (рисунок 3.5) образуется из трехфазной  $P_1(t)$  в результате мгновенного суммирования мощностей всех фаз. Учитывая, что КПД тяговых машин находится на уровне 95%, можно предположить, что  $P_1(t)$  обладает аналогичным качеством. Потребляемая мощность определяется в этом случае как мгновенная величина

$$P_1(t) = i_{A1}u_{A1} + i_{B1}u_{B1} + i_{C1}u_{C1} = 1,5I_{m1}U_{m1}\cos\varphi_1, \quad (18)$$

где  $i_{A1}$ ,  $i_{B1}$ ,  $i_{C1}$ ,  $u_{A1}$ ,  $u_{B1}$ ,  $u_{C1}$  – первые гармоники фазных токов и напряжений,  $I_1$  и  $U_1$  – их обобщенные величины:

$$I_1^2(t) = i_{A1}^2 + i_{B1}^2 + i_{C1}^2 = 1,5I_{1m}^2, \quad U_1^2(t) = u_{A1}^2 + u_{B1}^2 + u_{C1}^2 = 1,5U_{1m}^2, \quad (19)$$

где  $I_{1m}$ ,  $U_{1m}$  – амплитудные значения тока и напряжения трехфазной сети.

С учетом формул (19) мгновенная активная мощность может определяться как

$$P_1(t) = U_1(t)I_1(t)\cos\varphi_1(t) \quad (20)$$

Уравнение (18) и (19) позволяют определить мгновенный коэффициент мощности:

$$\cos\varphi_1(t) = \frac{P_1(t)}{I_1(t)U_1(t)}. \quad (21)$$

На рисунке 3.6 приведена информационно-измерительная система тягового электропривода асинхронной машины, обеспечивающая возможность прямого вычисления мощности  $P_1(t)$  и обобщенных переменных  $I_1(t)$  и  $U_1(t)$ . На рисунке 3.7 приведена трехфазная электромагнитная система синхронной машины и измерительный наблюдатель ее состояния.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</b>	Лис
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

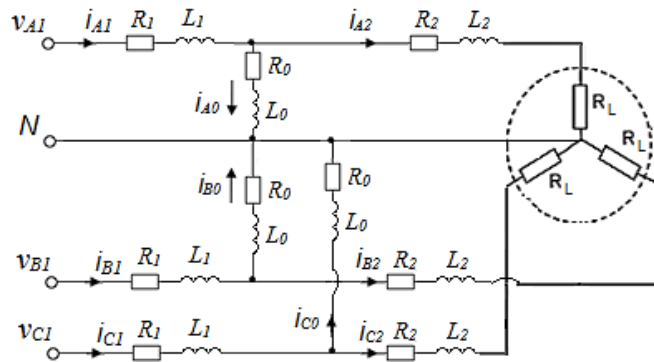


Рис. 3.6 - Трёхфазная схема замещения асинхронной машины.

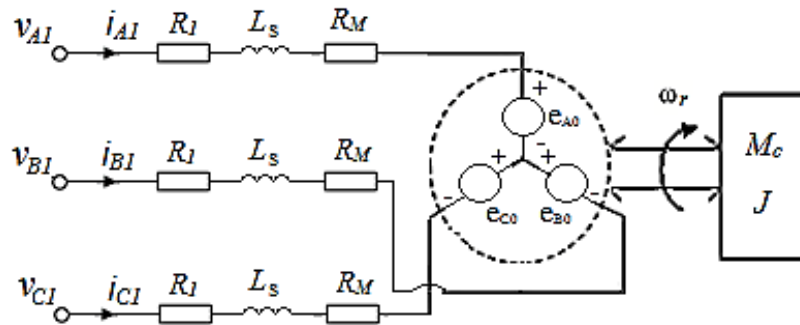


Рисунок 3.7 – Трёхфазная схема замещения синхронной.

Магнитные поля запасают в режимах пуска энергию намагничивания  $W_{Li} = L_i(i_{A1}^2 + i_{B1}^2 + i_{C1}^2)/2$ . Энергия и мощность этих компонентов определяется обобщенными токами и напряжениями, обладающими отмеченным ранее качеством.

Синхронная индуктивность  $L_s$ , изображенная на рисунке 3.7, равна сумме индуктивностей полей рассеивания и реакции якоря и представлена в обобщенном виде без разложения ортогональные составляющие  $L_d$  и  $L_q$ :

$$L_s = \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_q - L_d}{2} \cos 2\theta \quad (22)$$

где  $\theta$  – угол нагрузки. Приближенная аппроксимация  $L_s$  функцией (22) позволяет применять одну схему замещения фазы синхронного двигателя вместо двух, принятых в векторном управлении. Данный фактор обеспечивает единство математического описания энергетических процессов. Сопротивление  $R_m$  позволяет моделировать сумму магнитных потерь мощности статора и механических потерь ротора, обусловленных трением и вентиляцией.

Информационно-измерительный блок, представленный на рисунке 3.7 позволяет получить информацию о  $U_{1m}$ ,  $I_{1m}$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $\sin \varphi_1$  мгновенного состояния по данным единичного измерения токов и напряжений датчиками  $B_1 \dots B_6$ .

Токи  $I_i^2$  и напряжения  $U_i^2$  выполняют функцию обобщенных переменных суммарного энергопотока. Механизм преобразования синусоидальных величин в постоянные величины достаточно прост. Отдельные слагаемые уравнений (18 – 19) содержат постоянную составляющую и вторую гармонику. Вторые гармоники взаимно компенсируются в суммарном энергопотоке. Остаются постоянные составляющие в виде обобщенных переменных. Оставаясь векторными величинами в неподвижных координатах, токи  $I_1$  и напряжения  $U_1$  приобретают в квадратичных формах скалярный или скалярно-фазовый характер

$$\bar{I}_i x \bar{I}_i = I_i^2 \cos 0^\circ, \bar{U}_i x \bar{U}_i = U_i^2 \cos 0^\circ, \bar{I}_i x \bar{U}_i = I_i U_i \cos \varphi_i \quad (23)$$

Такой же результат достигается в векторном управлении при анализе процессов во вращающихся координатах [47].

Элементы  $L_M$  и  $R_M$  ветви намагничивания позволяют моделировать основной магнитный поток электрической машины. Но алгоритмы управления токами намагничивания оказываются в трехфазных координатах достаточно сложными. Трехфазную модель можно свернуть к однолинейной (рисунке 3.8 и рисунке 3.9) путем суммирования мгновенных токов и напряжений отдельных фаз. Такая задача решается в измерительном наблюдателе МО (рисунке 3.6 и рисунке 3.7) по алгоритмам обобщенного энергетического потока.

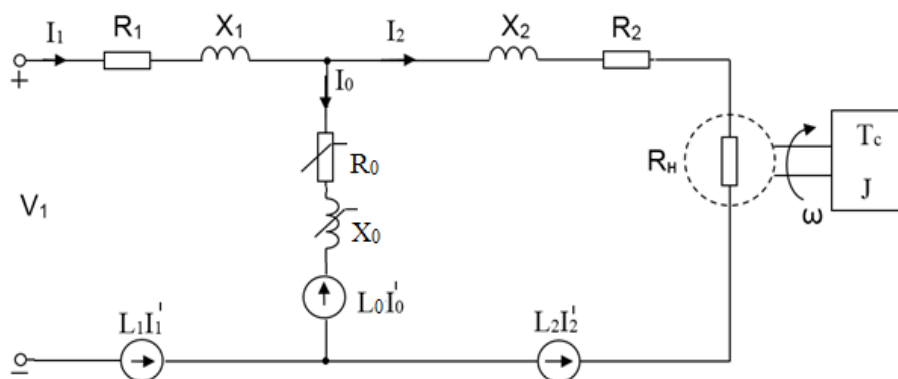




Рисунок 3.8 - Аналого-векторная модель асинхронной машины:  $R_H=R_2((1-s)/s)$ , штрихом отмечены производные токов.

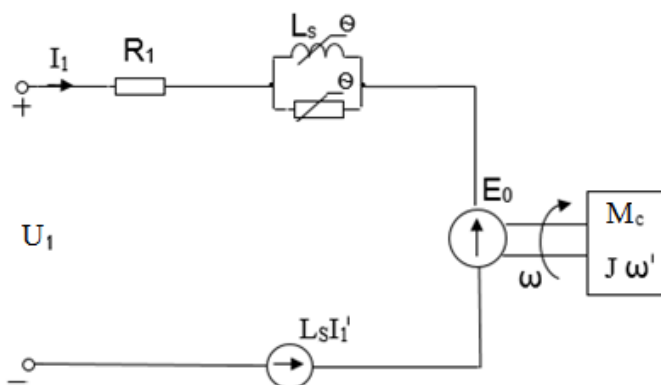


Рисунок 3.9 – Аналого–векторная модель синхронной машины:  $E_0^2 = e_{0a}^2 + e_{0b}^2 + e_{0c}^2$  – обобщённая ЭДС статора, штрихом отмечены производная тока статора и угловой скорости ротора.

Скалярный или скалярно-фазовый характер обобщенных переменных трехфазных машин позволяет провести аналогию с токами и напряжениями машин постоянного тока.

Возвращаясь к энергии магнитных, электрических полей и кинетической энергии механической нагрузки  $W_j = J\omega^2/2$ , отметим их важную роль в динамике электромеханических преобразований. Данные компоненты обобщенного энергопотока развивают в переходных режимах активную мощность

$$\sum P_{Li} = \sum L_i I_i \frac{dI_i}{dt}, \sum P_{Ci} = \sum C_i U_i \frac{dU_i}{dt}, P_J = j\omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (24)$$

Следует обратить внимание на двойное участие индуктивных и емкостных элементов в электромеханических процессах. Кроме активной мощности (24) LC-элементы являются источниками реактивной мощности

$$Q_L = \sum I_i^2 X_{Li}, Q_C = \sum \frac{U_i^2}{X_{Ci}} \quad (25)$$

где  $X_{Li} = \omega_0 L_i$  и  $X_{Ci} = 1/\omega_0 C_i$  - реактивные сопротивления на синхронной частоте  $\omega_0$  первой гармоники. Аппарат обобщенных переменных позволяет свернуть трехфазную электромагнитную систему (рисунок 3.6) в однофазную и представить математическую модель АМ и СМ в виде уравнений мгновенного

баланса активной, реактивной мощности и приведённой к ротору механической нагрузки:

$$P_1(t) = \sum R_i I_i^2(t) + \sum P_{Li} + P_2(t) \quad (26)$$

$$Q_1(t) = \sum X_i I_i^2(t) + Q_2(t) \quad (27)$$

$$P_2(t) = \omega(t)M_C(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (28)$$

где  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ ,  $Q_1(t)$ ,  $Q_2(t)$  – активные и реактивные мощности на входе и выходе электромагнитной системы,  $\omega(t)$  – угловая скорость,  $M_C(t)$  и  $J$  – статический момент и момент инерции нагрузки.

Конечной целью инвариантных преобразований является энергетическая модель асинхронной (рисунок 3.10) и синхронной (рисунок 3.11) машин, получаемая путем суммирования мгновенной мощности отдельных фаз в единый энергетический поток.

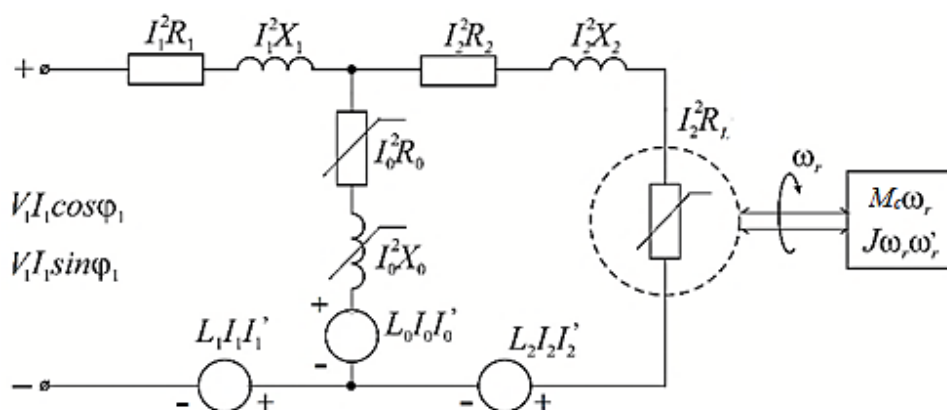


Рис. 3.10 - Энергетическая (скалярно – фазовая) модель асинхронной машины.

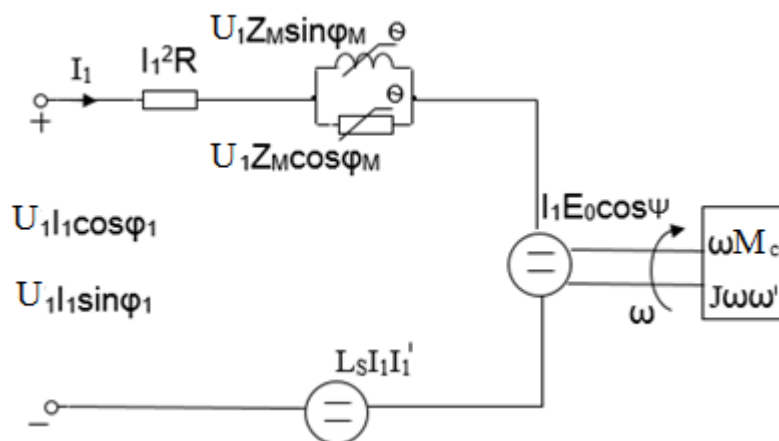


Рисунок 3.11 – Энергетическая (скалярно-фазовая) модель синхронной машины.

Схемный вариант модели имеет в значительной мере иллюстрационный характер.

Схемной модели соответствует математическая модель в виде уравнений баланса активной и реактивной мощности электромагнитной системы и нагрузки:

$$\begin{bmatrix} V_1 I_1 \cos \varphi_1 - I_1^2 R_1 - \Sigma P_{Li} \\ V_1 I_1 \sin \varphi_1 - I_1^2 X_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & R_2/S \\ X_0 & X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0^2 \\ I_2^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$M_e \omega = \frac{I_2^2 R_2 (1-s)}{s} = \omega (M_c + J \frac{d\omega}{dt}) \quad (30)$$

где  $M_e$  – электромагнитный момент,  $M_c$  и  $J$  – статический момент и момент инерции ротора и нагрузки,  $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ ,  $\omega_0$  – синхронная частота трехфазного напряжения.

Обобщенные токи и напряжения, вычисленные по первым гармоникам фазных величин, не содержат гармонических компонент частоты  $\omega_0$ . В этом смысле они являются аналогом постоянных токов и напряжений. Но их взаимосвязь в модели (рисунок 3.8 и рисунок 3.9) остается векторной. Энергетическая модель (рисунок 3.10 и рисунок 3.11) и уравнения баланса (29) и (30) имеют чисто скалярный характер. Векторные свойства трехфазной электромагнитной системы учитываются фазовыми соотношениями. Информационное обеспечение измерительного наблюдателя и данные каталога или испытаний электрической машины позволяют адаптировать энергетическую модель к реальным процессам, происходящим в ИМ и электроприводе.

Первые разработки алгоритма (29) относились к статике электромеханических преобразований. Момент определялся по эффективным величинам мощности и потерь. Для целей управления необходим динамический момент. Его получают по дифференциальным уравнениям баланса активной и реактивной мощности трехфазных электрических машин.

При соединении фаз статора в звезду, получаем взаимосвязь мгновенных величин с техническими данными синхронной и асинхронной машин, то есть с ее эффективными величинами

$$I_1 = \sqrt{3}I_{1\phi}, U_1 = \sqrt{3}U_{1\phi}, P_1 = 3P_{1\phi}, Q_1 = 3Q_{1\phi}. \quad (31)$$

Стоит отметить, что  $\cos\varphi_1$  и  $\sin\varphi_1$  совпадают и не требуют дополнительных преобразований. Сравнение мгновенных величин справедливо только для установившегося режима. Это объясняется изменением исходных величин по дифференциальному закону, расчет которых осуществляется более сложными способами, описанными, например, Ивановым А.С. [48].

Выбранный энергетический метод управления подразумевает возможность определения электромагнитного момента на уровне (2.5...3)% приведенной погрешности. Поэтому важным моментом в данной модели также является определение приведённых погрешностей токов  $I_1$ , напряжений  $U_1$  и допусков по мощности  $P_1$  и потерям мощности двигателя  $\sum \Delta P_i$ . Для этого важно обозначить параметры, влияющие на потери мощности в модели двигателя.

Выводы по разделу три. Рассмотрено информационное обеспечение и изложены алгоритмы управления с разработки информационного обеспечения и управления тяговым электроприводом, основанные на теории обобщенного энергетического потока трехфазных машин. Энергетические преобразования не чувствительны к системам отсчета, что позволяет рассматривать процессы в неподвижной системе координат. Обобщенный подход к анализу мгновенных преобразований позволил выявить дополнительные свойства и расширить информационное обеспечение электропривода. Энергетические модели электрических машин учитывают новые факторы, в частности, влияние энергии магнитных полей на динамику и алгоритмы управления. Скалярно-фазовый характер переменных управления позволяет приблизить функциональную схему электропривода переменного тока к электроприводу постоянного тока.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ

При разработке электронного измерителя крутящего момента в составе тягового электропривода целесообразным представляется проанализировать разнообразие существующих моделей электрических двигателей, конструктивно предусмотренных для электрокаров, поездов, прокатного и рулонного производства и т.п.

Особое место при разработке тяговой электроустановки и её функциональной схемы занимает правильный выбор тягового электродвигателя. Так как тяговый электродвигатель является составной частью электроприводной системы, на которую приходится значительные механические нагрузки, условия его работы близки к тяжелым. Это, к примеру, сильные вибрации, ударные нагрузки, воздействие воды и пыли, режимы пуска и торможения.

Производством тяговых электродвигателей за рубежом занимаются такие крупные компании как BorgWarner Inc. (REMY), BRUSA Electronic AG, General Electric, Tesla Motors Inc., Parker, Schabmüller, Bosch Rexroth и другие.

Компания Parker в числе интегрированных электрифицированных системных решений и компонентов для мобильной техники показала тяговый двигатель Global Vehicle Motor (GVM310) нового размера (рисунке 4.1). Он может использоваться как на грузовых машинах и внедорожниках, так и в гибридном автотранспорте.

Создатели рассчитывают, что высокая удельная мощность и эффективность двигателей переменного тока с постоянными магнитами (PMAС) в комбинации с согласованным инвертором GVI упростит выход новинки на рынок.

									Лис
									71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ				

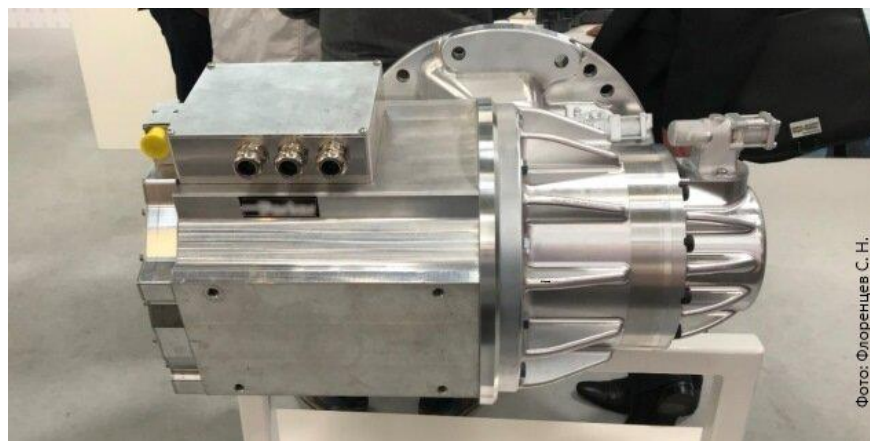


Рисунок 4.1 – Изображение тягового двигателя Global Vehicle Motor (GVM310).

Компания Schabmüller создает несколько типов электрических двигателей и генераторов для мобильной техники, включая высокоэффективные асинхронные, а также синхронные реактивные IPM. На рисунке 4.2а представлен синхронный электродвигатель с постоянными магнитами Schabmüller мощностью 250 кВт с масляным охлаждением. На рисунке 4.2б аналогичный двигатель мощностью до 105 кВт с охлаждением вода/этиленгликоль.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Синхронные двигатели компании Schabmüller: а) синхронный электродвигатель мощностью 250 кВт; б) синхронный двигатель мощностью до 105 кВт.

Еще одной компанией, занимающейся тяговыми двигателями является ZF. Концерном ZF был представлен 150 кВт тяговый привод (рисунок 4.3), предназначенный для различных автобусов и грузовиков для внутригородских

перевозок [49]. Он включает в себя электродвигатель, двухступенчатую односкоростную коробку передач с дифференциалом и силовой блок. Привод особенно подходит для транспортных средств с трансмиссиями, близкими тем, что используются в автомобилях с ДВС.

В компании считают, что подобные тяговые приводы будут пользоваться популярностью в сегменте коммерческих автомобилей с ограниченными характеристиками, которые могут ночью заряжаться в гараже.



Рисунок 4.3 – Тяговый электродвигатель компании ZF.

Фирма Bosch Rexroth представила на выставке Bauma 2019 года первые компоненты своего будущего портфеля электрификации мобильной техники. Новый 700 В двигатель будет доступен в низко- и высокоскоростной версиях и двух размерах. Двигатели первого размера — с внешним радиусом 130 мм (рисунок 4.4а) — обладают длительной выходной мощностью 75 кВт. Высокоскоростная версия — до 180 кВт. Двигатель второго размера — 200 мм (рисунок 4.4б) в самом мощном варианте развивает 250 кВт [50].



а)



б)

Рисунок 4.4 – Двигатели фирмы Bosch Rexroth: а) малого радиуса; б) большого радиуса.

Таблица 4.1 – Технические данные двигателя Bosch Rexroth EMS1H-13.

Технические данные двигателя	Значение низко- / высокоскоростной
Внешний радиус, мм	130
Номинальная мощность, кВт	До 75 / 180
Максимальная мощность, кВт	165 / 360
Номинальный момент, Нм	До 290
Максимальный момент, Нм	До 630
Максимальная скорость вращения, об/мин	6000 / 10000
КПД, %	97
Температура работы	-40 / +105
Класс защиты IP	IP69K

Электрические тяговые приводы имеют сходную геометрию и взаимозаменяемы с гидростатическими предшественниками. Редуктор eGFT 8000 оборудован дополнительной планетарной ступенью для приведения скорости вращения и крутящего момента к показателям гидравлического мотора. С eGFT 8000 используются электродвигатели серии Bosch SMG180 компании EM-motive GmbH — совместного предприятия Daimler и Bosch. Они могут работать как в двигательном, так и в генераторном режимах.





двигателей фирмы BorgWarner в продолжительных и пиковых режимах изображена на рисунке 4.6 [52].

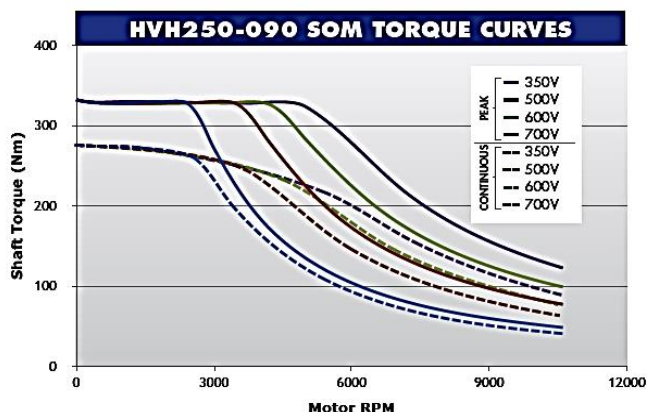


Рисунок 4.6 – Графики зависимости момента на валу двигателя от скорости в об/мин в продолжительных и пиковых режимах.

Для исследуемой системы выбран асинхронный двигатель компании BRUSA ASM1-6.17.12. Данная модель обладает высокими энергетическими характеристиками, более высокой скоростью работы, надежным и компактным дизайном. Его использование будет особенно целесообразным в тех случаях, когда условия эксплуатации не только не позволяют использовать прямой метод измерения момента (устанавливая массивные датчики момента на вал двигателя), но крупногабаритные двигатели. Внешний вид двигателя представлен на рисунке 4.7.

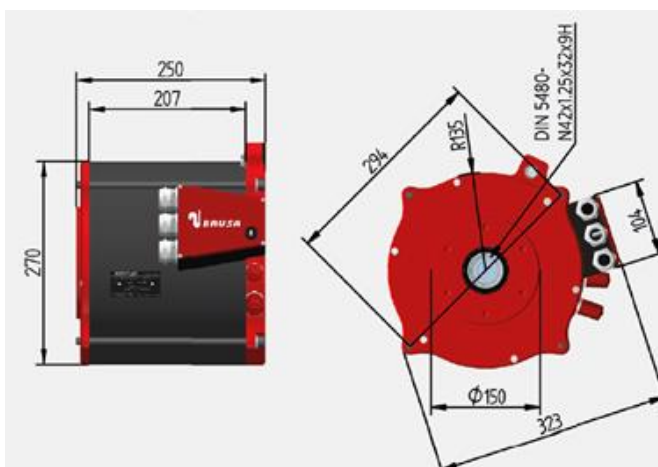


Рисунок 4.7 – Внешний вид двигателя ASM1-6.17.12.

ASM1-6.17.12 обладает степенью защиты IP67, что позволяет использовать его в пыльных (6 – пыленепроницаемое, пыль не может попасть в устройство; полная защита от контакта) и даже влажных помещениях (7 - кратковременное погружение на глубину до 1 м; при кратковременном погружении вода не попадает в количествах, нарушающих работу устройства; постоянная работа в погружённом режиме не предполагается). Технические характеристики двигателя представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики асинхронного двигателя ASM1-6.17.12.

Номинальная мощность, кВт	50
Номинальная скорость, об/мин (рад/с)	3300 (1780)
Номинальный момент, Нм	85
Максимальная скорость вращения, об/мин	11000
Рекомендуемое напряжение устройства, В	360 - 450
Коэффициент полезного действия, %	94
Количество пар полюсов	3
Скольжение, %	1
Класс изоляции	H
$\cos\phi$ в номинальном режиме	0,79
$I_1$ , А	190

Эксплуатационные механические характеристики двигателя при двузонном регулировании изображены на рисунке 4.8.

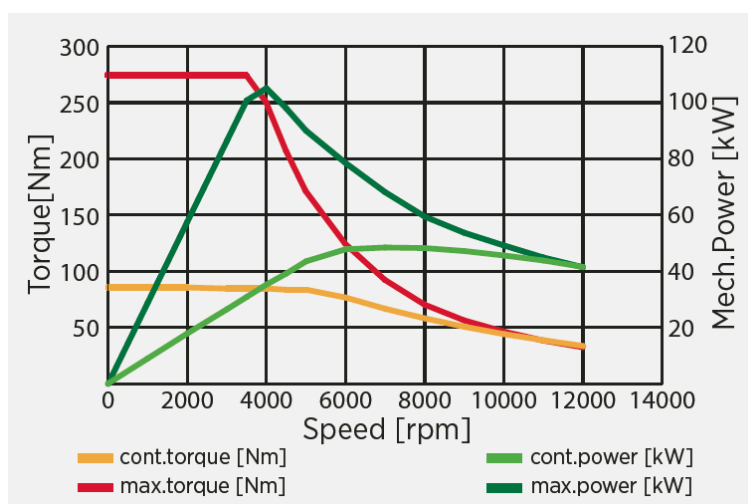


Рисунок 4.8 – Зависимость мощности и момента от скорости вращения двигателя в об/мин при двузонном регулировании в режимах продолжительных и пиковых нагрузок.

Несмотря на то, что первый электрический двигатель был изобретен уже довольно давно, до сих пор идет бурное развитие и совершенствование конструкторской мысли. Основными тенденциями в сфере современного развития электропривода являются ряд направлений.

Первой особенностью развития электропривода на современном этапе является расширение области применения регулируемого электропривода, главным образом, за счет количественного и качественного роста регулируемых электроприводов переменного тока. Успехи, достигнутые в совершенствовании тиристорных и транзисторных преобразователей частоты, дают основание предполагать, что в ближайшей перспективе развитие регулируемых электроприводов переменного тока, использующих двигатели более простой конструкции и с меньшей металлоемкостью, приведет к интенсивному вытеснению регулируемых электроприводов постоянного тока, которые на сегодняшний день имеют преимущественное применение.

Второй особенностью развития современного электропривода является повышение технологических требований к динамическим и точностным показателям электропривода, расширение и усложнение его функций,

связанных с управлением технологическими процессами, и соответствующее возрастание сложности систем управления электроприводами. Их развитие идет по пути создания систем числового программного управления и расширения использования современной вычислительной техники, создаваемой непосредственно для целей управления на базе микропроцессоров.

В качестве третьей тенденции современного этапа развития следует указать стремление к унификации элементной базы электропривода, созданию унифицированных комплектных электроприводов путем использования современной микроэлектроники и блочно-модульного принципа. На этой основе уже созданы серии комплектных тиристорных электроприводов постоянного тока и создаются системы частотного управления электроприводами переменного тока, обладающие техническими показателями, удовлетворяющими требованиям широкого круга исполнительных механизмов.

Все это дает понять, что использование электронных измерителей в современных системах электропривода становится неотъемлемой и своевременной тенденцией и для достижения высокого результата необходимо совершенствовать структурные элементы системы.

Выводы по разделу четыре. Рассмотрены современные модели тяговых электродвигателей. Из аналитического обзора выявлено, что наибольшую тенденцию развития получили именно тяговые электродвигатели переменного тока. Более того все большее количество производителей отдают предпочтение именно синхронным машинам с постоянными магнитами. Это связано с ростом уровня возможностей преобразовательной техники. Для дальнейшего моделирования информационно-измерительной системы выбран асинхронный электродвигатель компании BRUSA ASM1-6.17.12.

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ТЭП

Для определения допуска на модель потерь мощности по классу точности измерительных преобразователей и соответственно требуемой точности по моменту, необходимо произвести моделирование состояния системы в диапазонах возможных погрешностей на основные переменные управления.

Возвращаясь к рассмотренной ранее информационно-измерительной системе, необходимо оперировать следующими характеристиками датчиков и измерительных преобразователей (ИП):

$I_n, U_n$  – номинальные параметры ИП (предельные значения измеряемой величины);

$K_T = \frac{\Delta I_{max}}{I_n} \cdot 100\%$  – класс точности ИП, где  $\frac{\Delta I_{max}}{I_n} = \gamma_{пр}$  – приведенная погрешность ИП,  $\Delta I_{max}$  – максимальная абсолютная погрешность.

### 5.1. Моделирование погрешности измерения активной мощности

Уравнение активной мощности двигателя в номинальном режиме  $P_{1н} = U_{1н} I_{1н} \cos\varphi_{1н}$ , а  $\Delta U_1, \Delta I_1$  и  $\Delta \cos\varphi_1$  – абсолютные погрешности измерения.

В качестве исходных данных возьмем значения измерительных преобразователей с классом точности  $K_T = 0,5$  и  $1,0$ , а значения КПД электрической машины будут находиться в требуемых пределах  $\eta_n = 0,9 \dots 0,95$ .

Требуется выполнить моделирование точностных характеристик системы.

Для начала найдем погрешность измерения активной мощности. Для этого определим приведенную погрешность мощности в зависимости от каждого возмущения в отдельности.

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 &= P_1(U_1^*) - P_1 = (U_1 \pm \Delta U_1) \cdot I_1 \cos\varphi_1 = \pm \Delta U_1 I_1 \cos\varphi_1 \\ \Delta P_2 &= P_1(I_1^*) - P_1 = (I_1 \pm \Delta I_1) \cdot U_1 \cos\varphi_1 = \pm \Delta I_1 U_1 \cos\varphi_1 \\ \Delta P_3 &= P_1(\cos\varphi_1^*) - P_1 = (\cos\varphi_1 \pm \Delta \cos\varphi_1) \cdot I_1 U_1 = \pm \Delta \cos\varphi_1 I_1 U_1 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

По результатам вычислений находим приведенную погрешность мощности в зависимости от каждого  $i$ -го возмущения

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\Delta P_1}{P_{1H}} = \pm \gamma_U I_{1*} \cos \varphi_{1*} \\ \gamma_2 &= \frac{\Delta P_2}{P_{1H}} = \pm \gamma_I U_{1*} \cos \varphi_{1*} \\ \gamma_3 &= \frac{\Delta P_3}{P_{1H}} = \pm \gamma_{\cos} I_{1*} U_{1*} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

где  $\gamma_U = \frac{\Delta U_1}{U_{1H}}$ ,  $I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1H}}$ ,  $\cos \varphi_{1*} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_{1H}}$ ,  $\gamma_I = \frac{\Delta I_1}{I_{1H}}$ ,  $\gamma_{\cos} = \frac{\Delta \cos \varphi_1}{\cos \varphi_{1H}}$ .

Тогда суммарная погрешность с учетом случайного характера возмущений равна

$$\gamma_p = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2} \quad (34)$$

Стоит отметить, что численный анализ величин выполняется в относительных величинах.

Тогда для выбранных элементов измерительной системы получим

$$\Delta P_1 = 1,9 \cdot 190 \cdot 0,79 = 275,7$$

$$\Delta P_2 = 0,92 \cdot 380 \cdot 0,79 = 277,55$$

$$\Delta P_3 = 0,004 \cdot 190 \cdot 380 = 279,34$$

Приведенная погрешность по каждому возмущению равна

$$\gamma_1 = \frac{275,7}{55290} = 0,0049$$

$$\gamma_2 = \frac{277,55}{55290} = 0,00502$$

$$\gamma_3 = \frac{279,34}{55290} = 0,00505$$

Суммарная погрешность по активной мощности равна

$$\gamma_p = \sqrt{0,0049^2 + 0,00502^2 + 0,00505^2} = 0,0087$$

Такой прогноз возможен при максимальной точности приборов, используемых при измерении и расчете основных параметров системы. Для менее точных приборов с уровнем погрешности выше суммарная погрешность по мощности будет возрастать соответственно.

## 5.2. Моделирование погрешности измерения тока

Второй задачей определения точности системы является необходимость оценить погрешность измерения тока  $I_1$  и определить влияет ли на  $\gamma_I$  момент измерения системы  $\alpha$ .

Измерения проводятся в трехфазной системе координат, суммарный алгебраический ток в которой равен

$$I_1^2 = i_A^2 + i_B^2 + i_C^2, \quad (35)$$

где  $i_A = I_m \sin \alpha$ ,  $i_B = I_m \sin(\alpha - 120^\circ)$ ,  $i_C = I_m \sin(\alpha + 120^\circ)$  – фазные токи трехфазной системы.

Тогда номинальный ток на входе двигателя будет

$$I_{1н}^2 = 1,5I_{мн}^2 \quad (36)$$

Как было указано ранее, примем класс точности измерителей равным 0.5, то есть  $K_T = \frac{\Delta I_{max}}{I_{мн}} \rightarrow \Delta I_{max} = \pm 0,005I_{мн}$ .

При опросе датчиков трехфазной системы в блоке измерительных преобразователей получаем массив данных ее состояния. Для решения поставленной задачи произвольно выберем момент времени измерения  $\alpha_i$  и обратимся к массиву измеренных данных  $(i_A \pm \Delta I_{max}, i_B \pm \Delta I_{max}, i_C \pm \Delta I_{max})_{\alpha_i}$ .

Определим погрешность обобщенного тока от каждого возмущения в отдельности

$$\Delta I_i^2 = I_1^2(i_A^2, i_B^2, i_C^2)_{\alpha_i} - 1,5I_{мн}^2 \quad (37)$$

Тогда получим массив отклонений по каждому возмущению

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_1^2 &= (i_A^2 \pm \Delta I_{max})^2 + i_B^2 + i_C^2 - 1,5I_{мн}^2 \\ \Delta I_2^2 &= i_A^2 + (i_B^2 \pm \Delta I_{max})^2 + i_C^2 - 1,5I_{мн}^2 \\ \Delta I_3^2 &= i_A^2 + i_B^2 + (i_C^2 \pm \Delta I_{max})^2 - 1,5I_{мн}^2 \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Далее переходим к приведенным погрешностям по каждой составляющей обобщенного тока



$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\Delta I_1^2}{1,5I_{mH}^2} \\ \gamma_2 &= \frac{\Delta I_2^2}{1,5I_{mH}^2} \\ \gamma_3 &= \frac{\Delta I_3^2}{1,5I_{mH}^2} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Определяем вероятностную погрешность тока  $I_1$

$$\gamma_I = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2} \quad (40)$$

Предполагается, что суммарная погрешность по току в любой момент времени будет одинаковой. Для этого произведены расчеты массивов данных по току в двух различных моментах времени: если учесть, что один период для синусоиды с частотой 50 Гц равен 0,02 с, то возьмем два момента времени внутри периода – 0,01 с и 0,012 с. Результаты расчета представлены ниже в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результат расчета массива данных для тока  $I_1$ .

Параметр №	$\Delta I_1$	$\Delta I_2$	$\Delta I_3$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_I$
0,01 с	-127,36	256,64	-127,36	0,00332	0,00668	0,00332	0,0082
0,012 с	-223,23	207,75	27,4	0,00607	0,00541	0,00714	0,0082

Как можно судить по результатам расчета, суммарная погрешность на определение тока одинакова в любой момент времени измерения. Аналогичная логика справедлива и для измерений массива по напряжению.

### 5.3. Моделирование погрешности измерения крутящего момента ТЭП

Предполагая, что класс точности датчика скорости равен  $K_{T\omega} = 1$  или 0,01, определим приведенную погрешность по моменту от каждого возмущения, включая погрешность на ток, напряжение, коэффициент мощности, скорость и суммарные потери мощности. Такие величины как приведенные погрешности по току, напряжению и коэффициенту мощности, из которых была выведена погрешность по активной мощности, ранее уже были рассчитаны. Следовательно, определим их влияние на погрешность по моменту

предполагая, что суммарные потери мощности имеют допуск на определение в 10 – 15 %.

Из основного уравнения баланса активной мощности электрической машины

$$M_{ЭМ} = \frac{P_1 - \sum \Delta P_i}{\omega_r} \quad (41)$$

имеем уравнение зависимости суммарных номинальных потерь мощности от КПД

$$\sum \Delta P_i = P_1 \cdot (1 - \eta). \quad (42)$$

Примем, что класс точности и приведенная погрешность соответственно для всех элементов системы будет иметь вид

$$K_T(X_i) = \frac{\Delta I_{max}}{I_H} = \frac{\Delta U_{max}}{U_H} = \frac{\Delta M_{max}}{M_H} = \frac{\Delta(\sum \Delta P_i)}{(\sum \Delta P_i)_H} = \frac{\Delta \omega_r}{\omega_{rH}} \quad (43)$$

По уравнению момента (41) необходимо определить коэффициенты влияния  $\gamma_{M_p}, \gamma_{M_\omega}, \gamma_{M_\Sigma}$  активной мощности, угловой скорости и суммарных потерь мощности на электромагнитный момент по данным настроенной модели

Для настроенной модели последовательно дадим отклонение от номинальных значений по активной мощности, угловой скорости в заданных пределах  $\Delta P_1, \Delta \omega_r$  и суммарным потерям активной мощности электрической машины в пределах  $\Delta \sum \Delta P_i \pm 15\%$ . Это позволит определить чувствительность момента к данным показателям.

Тогда, определив изменения по электромагнитному моменту, получим

$$\gamma_{M_p} = \frac{\Delta M_p}{M_H} = \frac{89,578}{87} = 1,03$$

$$\gamma_{M_\omega} = \frac{\Delta M_\omega}{M_H} = \frac{87,97}{87} = 1,011$$

$$\gamma_{M_\Sigma} = \frac{\Delta M_\Sigma}{M_H} = \frac{87,88}{87} = 1,01$$

Уравнение среднеквадратичной погрешности по моменту имеет следующий вид

$$K_T(M) = \sqrt{\gamma_{Mp}^2 + \gamma_{M\omega}^2 + \left(\frac{1-\eta_H}{\eta_H}\right)^2 \cdot \gamma_{M\Sigma}^2} \quad (44)$$

Вычислим среднеквадратичную погрешность по электромагнитному моменту в процентах при отклонении взятых параметров на  $\pm 1\%$

$$K_T(M) = \sqrt{1,03^2 + 1,011^2 + \left(\frac{1-0,94}{0,94}\right)^2 \cdot 1,01^2} = 1,62.$$

Таким образом, при отклонении активной мощности в 0,87% и угловой скорости от номинала на  $\pm 1\%$ , а также суммарных номинальных потерь мощности на  $\pm 15\%$ , получим отклонение по моменту равное  $\pm 1,62\%$ . Данное значение отклонения по электромагнитному моменту оказывается меньше предполагаемого ранее значения отклонения в  $\pm (2,5 \dots 3)\%$ . Это говорит о высокой точности определения момента при использовании энергетического метода в совокупности с разработанной информационно - измерительной системой.

Полагая, что  $K_T(M) = \pm (2,5 \dots 3)\%$ , методом подбора определим допуск на определение суммарных потерь мощности  $\Delta \Sigma \Delta P_i$ .

Для  $K_T(M) = 2,5\%$  получим  $\Delta \Sigma \Delta P_i = 35,4\%$ , а для  $K_T(M) = 3\%$ , суммарные потери мощности равны  $\Delta \Sigma \Delta P_H = 45,1\%$ . Таким образом, для заданных техническим заданием границ точности определения электромагнитного момента в  $K_T(M) = \pm (2,5 \dots 3)\%$  имеем предполагаемо широкий допуск на определение суммарных номинальных потерь мощности на уровне 35 – 45%, что позволяет определять их косвенным методом.

Так как допуск на определение  $\Delta \Sigma \Delta P_H$  оказался достаточно широким, целесообразным является снижение этого показателя. Таким образом, предполагая, что погрешность на измерение активной мощности равна  $\pm 1\%$  (1,5%), а погрешность на определение момента находится на заданном уровне  $K_T(M) = \pm (2,5 \dots 3)\%$ , границы допуска на суммарные номинальные потери мощности будут находиться в пределах 34,3 – 44,2% (27,9 – 39,5%), что все равно дает возможность определять их косвенным способом.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</b>	Лис
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		85

Зависимость отклонения суммарных потерь активной мощности в функции КПД электрической машины  $\Delta \Sigma \Delta P_n = f(\eta_n)$  для различного класса точности измерительных приборов (ИП) представлена на рисунке 5.1, а поле допуска на модель потерь в функции класса точности ИП на рисунке 5.2.

Из представленных ниже графиков можно видеть прямую зависимость между этими величинами. Чем выше КПД и соответственно ближе к номинальному режиму работы электрической машины, тем больше допуск на отклонение суммарных потерь. Более того, на уровень допуска влияет и точность определения параметров и соответственно выше класс точности используемых приборов. При приведенной погрешности  $K_T$  в 0,5% достигается наибольший точностной потенциал измерительной системы.

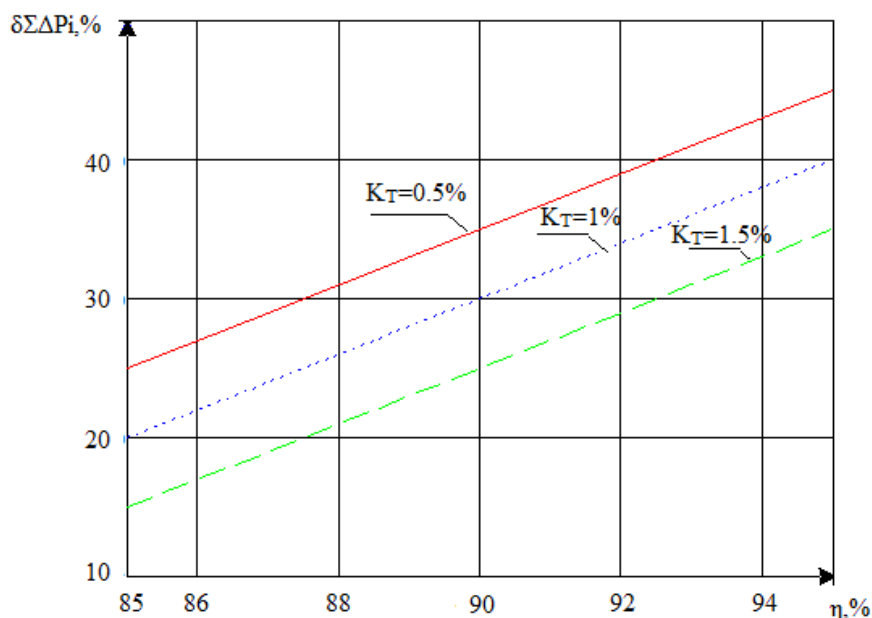


Рисунок 5.1 - Поле допуска на модель потерь в функции КПД электрической машины.

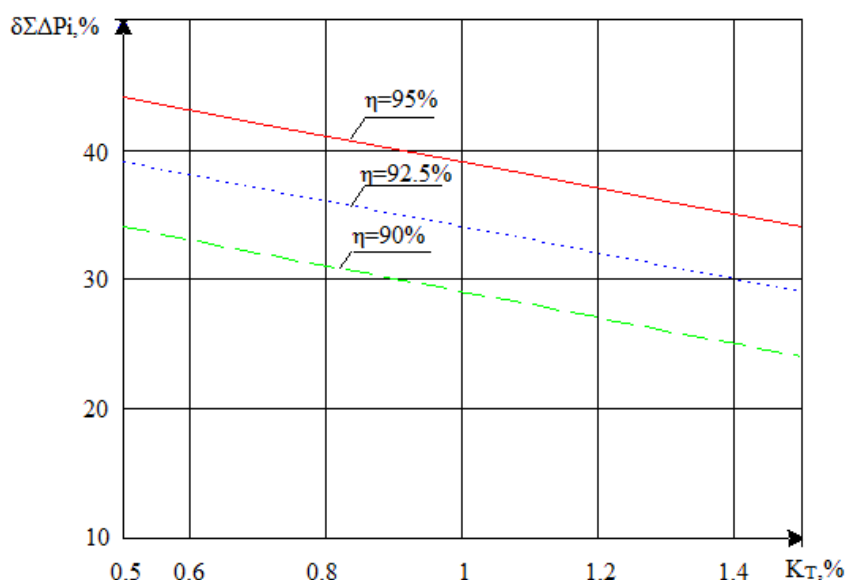


Рисунок 5.2 - Поле допуска на модель потерь в функции класса точности ИП.

В таком случае, возможно находить баланс между параметрами оборудования, используемого для системы электронного измерителя крутящего момента. Так, например, для менее энергоэффективного двигателя можно выбрать более точное измерительное оборудование и, наоборот, для двигателя с высоким коэффициентом полезного действия – измерительные преобразователи с меньшим запасом точности.

Вывод по разделу пять. Проведено моделирование погрешностей измерения крутящего момента ТЭП. Выявлено, что при применении ИИС на основе энергетического метода управления ТЭП, реализуемо определение крутящего момента на уровне (2,5...3)% приведенной погрешности. Это достигается использованием измерительных преобразователей с точностью измерения  $K_T = 0,5 - 1,5$ . При этом допуск на определение суммарных потерь мощности оказывается широким.

## 6. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ТЭП

Отличием энергетической модели управления электрическим двигателем, в отличие от того же векторного метода, является учет потерь электрической мощности. Он обеспечивает повешение точности измерения и управления

крутящим моментом. За счет повышенного запаса по точности в датчиках тока, напряжения и скорости, допуск на определение суммарных потерь мощности возрастает, обеспечивая точность определения момента предположительно на уровне (2,5...3)% приведенной погрешности. Необходимо уточнить из чего состоят суммарные потери мощности, чтобы в дальнейшем численно установить допуск на их определение.

Уравнение приведенной погрешности электромагнитного момента согласно (44) можно преобразовать в следующий вид:

$$M_{e*} = \sqrt{P_{1*}^2 + \omega_*^2 + \left(\frac{1-\eta_n}{\eta_n}\right)^2 \cdot (\sum \Delta P_i)_*^2}, \quad (45)$$

где  $M_{e*} = \Delta M / M_{ен}$ ,  $P_{1*} = \Delta P_1 / P_{1н}$ ,  $(\sum \Delta P_i)_* = \Delta(\sum \Delta P_i) / (\sum \Delta P_i)_н$ ,  $\eta_n$  - КПД. Индексом «н» отмечены номиналы переменных.

Модель потерь  $\sum \Delta P_i$ , входящая в уравнение (45), недоступна для прямого измерения и является многомерной функцией многих факторов. Общие потери мощности складываются из электрических (вырабатываемых на сопротивлении статора и ротора), магнитных (в стали и обмотках двигателя), механических (от трения вала ротора, подшипников и т.д.), динамических (зависящих от характера нагрузки) и высокочастотных помех ШИМ (определяемых как потери от влияния высших гармоник на резистивных элементах преобразователя, потери при переключениях).

Электрические потери определяются омическими сопротивлениями статора  $R_1$ , ротора  $R_2$  и соответствующими токами

$$\Delta P_e = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2. \quad (46)$$

Обобщенный ток ротора определяется аналогично току  $I_1$ . Магнитные потери зависят от синхронной частоты  $\omega_0$  трехфазного напряжения, а механические – от угловой скорости  $\omega$  ротора. Учитывая, что  $\omega_0$  и  $\omega$  изменяются почти синхронно, магнитные и механические потери целесообразно объединить в одну составляющую и аппроксимировать квадратичной зависимостью от  $\omega_0$ :

$$\Delta P_M = \Delta P_{MH} \frac{\omega_0 + K\omega_0^2}{\omega_{0H} + K\omega_{0H}^2}, \quad (47)$$

где  $K$  – постоянный коэффициент.

Учет магнитно-механических потерь выполняется сопротивлением  $R_0$  в ветви намагничивания:  $\Delta P_M = I_0^2 R_0$ . Неизвестное сопротивление  $R_0$  определяется с учетом (47) в следующем виде:

$$R_0 = \frac{\Delta P_{MH}}{I_0^2} \frac{\omega_0 + K\omega_0^2}{\omega_{0H} + K\omega_{0H}^2}. \quad (48)$$

Алгоритм вычисления обобщенного тока  $I_0$  ветви намагничивания аналогичен току  $I_1$ . Необходимость учета механических потерь на трение и вентиляцию объясняется следующими факторами. Электрические машины автомобильного тягового электропривода работают в широком диапазоне угловых скоростей до  $12 \cdot 10^3$  об/мин. Частота трехфазного напряжения многополюсных машин достает при этом (600...1000) Гц [53, 54]. Потери  $\Delta P_M$  оказывают на повышенных частотах наибольшее влияние на КПД.

Динамическая мощность (потери) обусловлена энергией намагничивания магнитных полей воздушного зазора, статора и ротора как указывалось ранее вычисляется через индуктивности двигателя  $W_{МП} = I_0^2 L_0 / 2 + I_1^2 L_1 / 2 + I_2^2 L_2 / 2$ , где  $L_0$ ,  $L_1$  и  $L_2$  – соответствующие индуктивности. В переходных режимах энергия  $W_{МП}$  развивает активную мощность

$$\sum \Delta P_{Li} = L_0 I_0 \frac{dI_0}{dt} + L_1 I_1 \frac{dI_1}{dt} + L_2 I_2 \frac{dI_2}{dt}. \quad (49)$$

Эта мощность входит в суммарные потери мощности в виде суммарных потерь и совместно с кинетической энергией нагрузки определяет динамику электромагнитного момента [55].

Потери мощности от высокочастотных гармоник ШИМ относятся к наименее изученным. Результаты моделирования, приведенные в [56], показывают на значительные потери мощности от высших гармоник при различных видах ШИМ. Экспериментальные данные КПД тяговых синхронных и асинхронных машин, полученные при шести-пульсном и высокочастотном

формированиях трехфазного напряжения, не подтверждают результаты моделирования.

Вывод по разделу шесть. Высокий КПД тяговых электрических машин обеспечивает широкое поле допуска на суммарные потери мощности и учета их достаточно простыми алгоритмическими средствами. Точность формирования обратной связи по электромагнитному моменту может быть повышена до уровня до (2,5...3)% приведенной погрешности. Электрическая машина может выполнять в тяговом электроприводе двойную функцию: исполнительного устройства и измерителя крутящего момента с относительно высокими метрологическими показателями.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		90





$R_0 = 0,311 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 0,025 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 0,016 \text{ Ом}$ ;  $X_0 = 4,094 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = 0,16 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 0,133 \text{ Ом}$ . Требуется уточнить параметры модели.

T – образная схема замещения асинхронного двигателя, необходимая для дальнейших расчетов, представлена на рисунке 7.1.

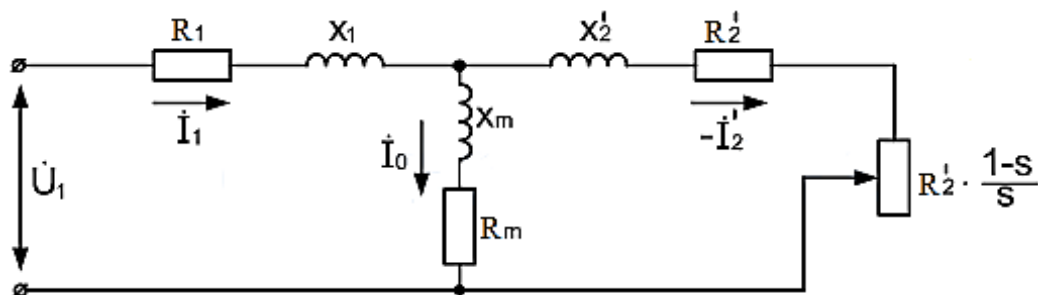


Рисунок 7.1 – T - образная схема замещения асинхронного двигателя.

Для начала найдем степень точности определяемых характеристик двигателя с использованием в расчете грубых значений параметров сопротивлений.

Для этого применим следующий алгоритм расчета.

1. Найдем полное сопротивление статора, ротора и намагничивающей части двигателя

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_2 &= \frac{R_2}{s_H} + jX_2 \\ Z_0 &= R_0 + jX_0 \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

Подставив значения сопротивлений, получим

$$Z_1 = 0,025 + 0,16j \text{ Ом}$$

$$Z_2 = 13778 + 0,133j \text{ Ом}$$

$$Z_0 = 0,311 + 43094j \text{ Ом}$$

Тогда напряжение  $U_0$  равно

$$\dot{U}_0 = \frac{U_{1H}}{1 + \frac{Z_1 + Z_1}{Z_0 + Z_2}} \quad (52)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{380}{1 + \frac{0,03025 + 0,316j}{0,3311 + 4,094j} + \frac{0,025 + 0,16j}{1,778 + 0,133j}} = 357,135 - 28,785j \text{ В.}$$

2. Ток в статоре найдем как сумму токов ротора и намагничивающей части двигателя

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2, \quad (53)$$

где токи ротора и намагничивающей части равны

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_0}{Z_2} \\ \dot{I}_0 &= \frac{\dot{U}_0}{Z_0} \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

А их модули соответственно

$$I_2 = 200 \text{ A}$$

$$I_0 = 87,265 \text{ A}$$

Тогда модуль тока статора равен

$$I_1 = 230,812 \text{ A}$$

3. Из формулы тока  $\dot{I}_1 = I_1 e^{j\varphi_1}$  найдем значение  $\cos\varphi_1$

$$\cos\varphi_1 = \frac{\operatorname{Re}(\dot{I}_1)}{I_1}. \quad (55)$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{198,151}{230,812} = 0,858$$

В таком случае угол  $\varphi_1 \approx 30^\circ$ .

4. Формулы для расчета активной и реактивной мощности выглядят следующим образом

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= U_1 I_1 \cos\varphi_1 \\ Q_1 &= U_1 I_1 \sin\varphi_1 \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Подставив значения получим

$$P_1 = 380 \cdot 230,812 \cdot 0,858 = 75,5 \text{ кВт}$$

$$Q_1 = 380 \cdot 230,812 \cdot 0,534 = 45,1 \text{ кВар.}$$

5. Произведем проверку баланса мощностей через оптимизированные значения сопротивлений по формулам

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= I_1^2 R_1 + I_0^2 R_0 + I_2^2 \frac{R_2}{s_H} \\ Q_1 &= I_1^2 X_1 + I_0^2 X_0 + I_2^2 X_2 \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

$$P_1 = 230,812^2 \cdot 0,025 + 87,265^2 \cdot 0,311 + 200,974^2 \cdot \frac{0,016}{0,009} = 75,5 \text{ кВт}$$

$$Q_1 = 230,812^2 \cdot 0,16 + 87,265^2 \cdot 4,094 + 200,974^2 \cdot 0,133 = 45,1 \text{ кВар.}$$

6. Активная мощность на валу двигателя равна

$$P_2 = I_2^2 \cdot R_2 \frac{1-s_H}{s_H}. \quad (58)$$

$$P_2 = 200,974^2 \cdot 0,016 \cdot \frac{1 - 0,009}{0,009} = 71,16 \text{ кВт.}$$

7. Суммарные номинальные потери в двигателе находятся по формуле

$$\sum \Delta P_H = I_1^2 \cdot R_1 + I_0^2 \cdot R_0 + I_2^2 \cdot R_2. \quad (59)$$

Подставив в формулу получившиеся значения получим

$$\sum \Delta P_H = 230,812^2 \cdot 0,025 + 87,265^2 \cdot 0,311 + 200,974^2 \cdot 0,016 = 4,346 \text{ кВт.}$$

8. Тогда электромагнитный момент

$$M_H = \frac{P_1 - \sum \Delta P_H}{\omega}, \quad (60)$$

где  $\omega_{rH} = \frac{\omega_0 \cdot (1-s_H)}{3} = 587,99$ , при  $\omega_0 = 1780$  рад/с.

$$M_H = \frac{75,5 - 4,346}{587,99} = 121,021 \text{ Нм.}$$

9. А коэффициент полезного действия равен

$$\eta_H = \frac{P_2}{P_1}, \quad (61)$$

Подставив значения активных мощностей в формулу получаем

$$\eta_H = \frac{71,16}{75,5} = 0,942.$$

Определим отклонение интересующих нас показателей.

$$\delta I_1 = \frac{230,812 - 190}{190} \cdot 100\% = 21,053\%$$

$$\delta \cos \varphi_1 = \frac{0,792 - 0,79}{0,79} \cdot 100\% = 0,253\%$$

$$\delta P_2 = \frac{71,16 - 55}{55} \cdot 100\% = 29,38\%$$

$$\delta \eta = \frac{0,942 - 0,92}{0,92} \cdot 100\% = 2,39\%$$

$$\delta M = \frac{121,021 - 85}{85} \cdot 100\% = 42,38\%$$

При этом уравнение невязки имеет следующий вид

$$\sum \Delta_i = \left( \frac{I_1 - I_{1н}}{I_{1нэ}} \right)^2 - \left( \frac{P_2 - P_{2н}}{P_{2н}} \right)^2 - \left( \frac{\eta - \eta_n}{\eta_{нэ}} \right)^2. \quad (62)$$

Тогда для грубой настройки параметров

$$\sum \Delta_i = \left( \frac{230,812 - 190}{190} \right)^2 - \left( \frac{71,16 - 55}{55} \right)^2 - \left( \frac{0,942 - 0,92}{0,92} \right)^2 = 0,133.$$

Полученные данные показывают достаточно сильные отклонения по таким параметрам как ток статора, полезная мощность и момент. Для уменьшения отклонения по представленным параметрам и повышения точности определения основных характеристик двигателя, воспользуемся методами оптимизации параметров системы.

## 7.2. Выбор способа настройки математической модели

Оптимизация – это по сути комплекс операций по нахождению экстремума (минимума или максимума) целевой функции в некоторой области конечномерного векторного пространства, ограниченной набором линейных и/или нелинейных равенств и/или неравенств.

В процессе проектирования обычно ставится задача определения наилучших структуры или значений параметров объектов. Такая задача называется оптимизационной. Если оптимизация связана с расчётом оптимальных значений параметров при заданной структуре объекта, то она называется параметрической оптимизацией. Задача выбора оптимальной структуры является структурной оптимизацией.

Стандартная математическая задача оптимизации формулируется таким образом. Среди элементов  $\chi$ , образующих множества  $X$ , найти такой элемент  $\chi^*$ , который доставляет минимальное значение  $f(\chi^*)$  заданной функции  $f(\chi)$ . Для того, чтобы корректно поставить задачу оптимизации, необходимо задать:

1. Допустимое множество-множество  $X = \{\vec{x} | g_i(\vec{x}) \leq 0, i = 1, \dots, m\} \in R^n$ ;

2. Целевую функцию - отображение  $f: X \rightarrow R$ ;

3. Критерий поиска (max или min).

Тогда решить  $f(\vec{x}) \rightarrow \min_{x \in X}$  задачу означает одно из:

1. Показать, что  $X = \emptyset$ ;

2. Показать, что целевая функция не  $f(\vec{x})$  ограничена снизу.

3. Найти  $\vec{x}^* \in X : f(\vec{x}^*) = \min_{x \in X} f(\vec{x})$

4. Если  $\nexists \vec{x}^*$  то найти  $\inf_{x \in X} f(\vec{x})$

Если минимизируемая функция не является выпуклой, то часто ограничиваются поиском локальных минимумов и максимумов: точек  $x_0$  таких, что всюду в некоторой их окрестности  $f(x) \geq f(x_0)$  для минимума и  $f(x) \leq f(x_0)$  для максимума.

Если допустимое множество  $X = R^n$ , то такая задача называется задачей безусловной оптимизации, в противном случае — задачей условной оптимизации.

Из курса математики известно, что направление наибольшего возрастания функции характеризуется ее градиентом. Если критерий оптимизации задан уравнением:  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , то его градиент в некоторой точке  $O(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$  (из области определения функции) определяется вектором:

$$\nabla f \equiv \text{grad} f(0) = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1}(0), \frac{\partial f}{\partial x_2}(0), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(0) \right) \quad (63)$$

Градиентный спуск — метод нахождения локального экстремума (минимума или максимума) функции с помощью движения вдоль градиента. Для минимизации функции в направлении градиента используются методы одномерной оптимизации, например, метод золотого сечения. Также можно искать не наилучшую точку в направлении градиента, а какую-либо лучше текущей.

В этом случае частные производные в точке  $O$  находят приближенными методами.

$$\frac{\partial f}{\partial x_1}(0) = \lim_{\Delta x_1 \rightarrow 0} \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_1, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n)}{\Delta x_1} \quad (64)$$

где  $\Delta$  - бесконечно малое приращение (1 - 5% от значения  $i$  - ой переменной).

Пусть функция  $f(x)$  такова, что можно вычислить ее градиент. Тогда можно применить метод градиентного спуска.

Наряду с определением градиентного вектора основным вопросом, решаемым в методах градиента, является выбор шага движения по градиенту. Выбор величины шага в значительной степени зависит от вида поверхности. Если шаг слишком мал, это потребует продолжительных расчетов. Если наоборот размеры шага слишком велики, можно проскочить оптимум.

Метод градиентного спуска делится на несколько видов:

- Метод градиентного спуска с постоянным шагом
- Метод градиентного спуска с дроблением шага
- Метод наискорейшего спуска

При использовании метода градиентного спуска в задачах оптимизации, главный объем вычисления приходится на вычисление градиента целевой функции в каждой точке траектории спуска. Поэтому целесообразно уменьшить количество таких точек без ущерба для самого решения. Это достигается в методе Коши (наискорейшего спуска). Согласно этому методу, после определения направления поиска оптимума в начальной точке, в этом направлении делают не один шаг, а двигаются до тех пор, пока происходит улучшение функции, достигая таким образом, экстремума в некоторой точке. В этой точке вновь определяют направление поиска (с помощью градиента) и ищут новую точку оптимума целевой функции и т.д. (рисунок 7.2а). В этом методе поиск происходит более крупными шагами, и градиент функции вычисляется в меньшем числе точек (рисунок 7.2б). Заметим, что метод наискорейшего спуска сводит многомерную задачу оптимизации к последовательности одномерных задач оптимизации, которые могут решаться, например, методом золотого сечения или половинного деления.

										Лист
										97
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ					

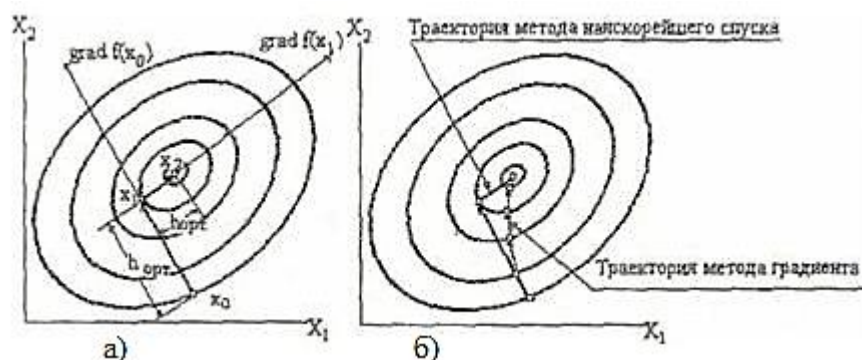


Рисунок 7.2 – Метод градиента поиска: а) поиск максимума с выбором оптимального шага; б) сравнение метода наискорейшего спуска с методом градиента с постоянным шагом.

### 7.3. Настройка модели по методу наискорейшего спуска

По результатам анализа приведенных методов нахождения оптимума, выявлено, что метод градиента с постоянным шагом не позволяет достаточно точно определить минимальное значение уравнения невязки и, как следствие, значения полученных параметров двигателя далеки от оптимального значения.

В связи с этим в работе выбран и промоделирован метод наискорейшего спуска, который позволяет при минимальном количестве операций, максимально быстро достичь требуемого уровня точности.

Применим метод наискорейшего спуска, используя следующий алгоритм.

1. Изменим заданные грубые значения сопротивлений на ~5% таким образом, чтобы суммарное отклонение изменялось в сторону его уменьшения. Получим значения, представленные в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Значения сопротивлений двигателя, с учетом отклонения.

$X_0$ , Ом	$R_0$ , Ом	$X_1$ , Ом	$R_1$ , Ом	$X_2$ , Ом	$R_2$ , Ом
4,104	3,253	0,27	0,019	0,152	0,0175

2. Определим коэффициент влияния каждого параметра равный отношению отклонения суммарного показателя к отклонению  $i$ -го параметра

$$k_i = \frac{\sum \Delta_{iH} - \sum \Delta_{iK}}{\Delta_i} \quad (65)$$



Полученные значения коэффициентов влияния представлены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Коэффициенты влияния параметров.

$k_{X0}$	$k_{R0}$	$k_{X1}$	$k_{R1}$	$k_{X2}$	$k_{R2}$
0,11	$2,14 \cdot 10^{-2}$	0,173	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,27	0,19

3. Найдем шаг изменения параметров системы с учетом направления движения в сторону уменьшения суммарного показателя. Для этого возьмем степень изменения параметров системы равную 0,1% и поделим ее на коэффициент влияния

$$\Delta k_i = \frac{0,001}{k_i} \quad (66)$$

Значения шагов для каждого показателя системы представлены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 - Значения шагов показателей системы.

$\Delta k_{X0}$	$\Delta k_{R0}$	$\Delta k_{X1}$	$\Delta k_{R1}$	$\Delta k_{X2}$	$\Delta k_{R2}$
$9.09 \cdot 10^{-3}$	$4.67 \cdot 10^{-2}$	$5.78 \cdot 10^{-3}$	$3.13 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$5.26 \cdot 10^{-3}$

4. Далее, к значениям сопротивлений из таблицы 7.1 последовательно прибавляем значение k-го шага из таблицы 7.3 до тех пор, пока значение  $\sum \Delta_i$  не приобретет минимальный показатель (экстремум) и снова не начнет увеличиваться. Конечный результат проделанных расчетов представлены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Значения базовых показателей двигателя для k-го шага.

n	$\sum \Delta_i$	$I_{1н}, A$	$\cos \varphi_{1н}$	$P_{2н}, кВт$	$\eta_n$	$M_n, Нм$
4	0,125	183,27	0,8	53,6	0,912	88,76
5	0,123	188,31	0,819	52,19	0,933	86,51
6	0,13	187,12	0,831	55,4	0,898	87,7



## 8. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ТЭП С ИМ

На основании разработанной технологии определения электромагнитного момента в тяговом электроприводе, в состав которого входит асинхронный двигатель (или несколько асинхронных двигателей) получим следующую функциональную схему тягового электропривода с эталонной моделью, представленную на рисунке 8.1.

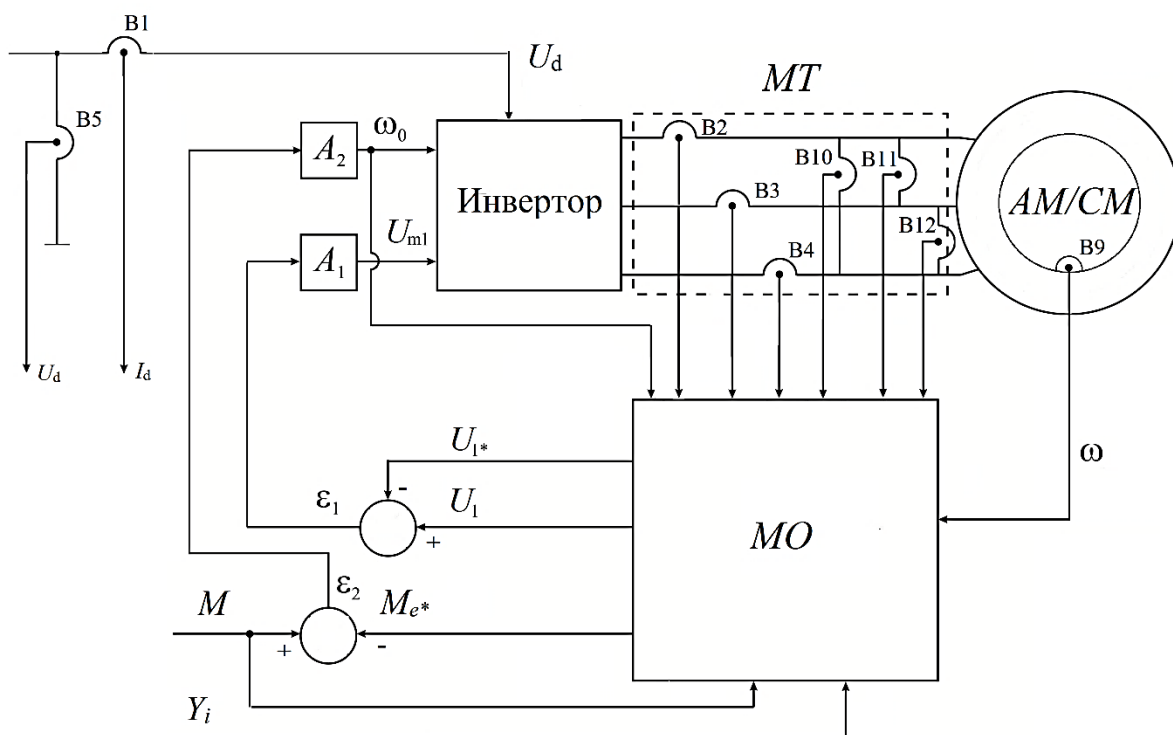


Рисунок 8.1 – Функциональная схема тягового электропривода: Базовые каналы управления электроприводом:  $A_1$  и  $A_2$  – регуляторы каналов управления амплитудой  $U_{m1}$  и синхронной частотой  $\omega_0$ ; МО - измерительный наблюдатель;  $M$  – управляющее воздействие;  $Y_i$  – константа или функция, определяющая состояние электромагнитной системы и критерии управления внутренними параметрами двигателя;  $U_1$  – измеренное напряжение;  $U_{1*}$ ,  $M_{e*}$  – адаптированные переменные;  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  – сигналы отклонения по амплитуде напряжения и моменту.

Энергетическая модель АМ, реализованная программно в измерительном наблюдателе МО, принципиально меняет стратегию управления тяговым электроприводом по сравнению с векторными системами. В электронный блок

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ

Лис

101

МО поступает информация в виде управляющего воздействия  $M$  и констант  $Y_i$  или функций, определяющих состояние электромагнитной системы и критерии управления внутренними параметрами АМ.

Обратная связь по крутящему моменту формируется в виде электромагнитного момента  $M_{e*}$ , вычисляемого в МО по энергетической модели. Качественное управление крутящим моментом двух- и многодвигательных агрегатов предполагает повышенную точность косвенного определения  $M_{e*}$  на уровне (2,5...3)% приведенной погрешности. Датчики класса точности 0.5 и повышенная точность модели позволяют прогнозировать такой результат. Синхронная частота  $\omega_0$  формируется по сигналу  $\varepsilon_2$  отклонения  $M_{e*}$  от  $M$  канала управления моментом. В результате этого угловая скорость  $\omega_r$  остается свободной координатой, зависящей от нагрузочного режима. Амплитуда  $U_{m1}$  трехфазного напряжения инвертора формируется по сигналу  $\varepsilon_1$  отклонения между адаптивным напряжением  $U_{1*}$  и напряжением  $U_1$ , полученным в результате прямого измерения. Контур защиты по току и угловой скорости на рисунке не показаны. Алгоритмы вычисления адаптивных переменных имеют вид:

$$V_{1*} = \frac{I_{0n}^2 \Delta + A_1 I_1^2 - X_2 s \sum P_{Li}}{I_1 B_0}, \quad (67)$$

$$T_{e*} = \frac{R_2 (U_1 I_1 A_1 - B_1 I_1^2 - X_0 \sum P_{Li})}{\omega_0 \Delta}, \quad (68)$$

где  $\Delta = R_2 X_0 - s R_0 X_2$ ,  $A_0 = R_2 X_1 - s R_1 X_2$ ,  
 $B_0 = R_2 \sin \varphi_1 - X_2 s \cos \varphi_1$ ,  $A_1 = X_0 \cos \varphi_1 - R_0 \sin \varphi_1$ ,  
 $B_1 = R_1 X_0 - R_0 X_1$ , методика вычисления  $I_1$ ,  $U_1$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $\sin \varphi_1$  рассмотрена ранее.

В электронный измеритель крутящего момента на основе информационно-измерительной системы входят: датчики тока, датчики напряжения, датчик углового перемещения  $B_{\omega}$ , инвертор напряжения и непосредственно сам

измерительный наблюдатель МО. Раскроем назначение и принцип действия каждого из этих элементов по отдельности.

### 8.1. Выбор измерительной аппаратуры и микроконтроллера информационно – измерительной системы тягового электропривода

Несмотря на то, что электронный измеритель крутящего момента – это прежде всего сама система обработки данных. Начиная от управления по задающему сигналу и заканчивая обратной связью по амплитуде и моменту. Но это также и структурные элементы системы такие как датчики тока, напряжения, углового перемещения и сама плата микропроцессора, осуществляющая запись и обработку получаемой из системы информации.

С учетом проведенного моделирования точностных характеристик на примере асинхронного двигателя произведем выбор измерительной аппаратуры, показатели точности измерений которых будут находиться на уровне, указанном в предыдущей главе, а также микроконтроллера достаточной производительности.

Информационно – измерительная система тягового электропривода должна включать в себя следующие компоненты:

- Датчики фазного тока;
- Датчики линейного напряжения;
- Датчик угловой скорости (перемещения);
- Микроконтроллер.

Все более жесткие требования к энергоэффективности и снижению выбросов CO<sub>2</sub> приводят к тому, что автопроизводители всё больше зависят от компонентов бортовой электроники. От электроусилителя рулевого управления и технологии старт-стоп, до бортовых навигационных и информационно-развлекательных систем, эти компоненты создают дополнительную нагрузку на электрические цепи и особенно на аккумуляторные батареи, что приводит к необходимости контроля генерируемого и потребляемого различными бортовыми системами тока. Однако наиболее важным остаётся рынок

гибридных и электрических транспортных средств, требующий точных измерений токов аккумуляторной батареи для определения доступной дальности пробега и стратегии перезарядки.

В гибридных и электрических транспортных средствах важно не только точно измерить ток аккумулятора, но ещё и точно контролировать работу электродвигателя, приводящего в движение автомобиль, для обеспечения плавности хода. Измерение фазовых токов электродвигателей и по сегодняшний день остаётся основным применением для датчиков тока. Различный спектр специализированных датчиков для измерения фазовых токов в двигателях и преобразователях постоянного тока, является неотъемлемой частью всех гибридных и электрических транспортных средств.

Для выбора измерительной аппаратуры проведем аналитический обзор существующих датчиков на основе эффекта Холла.

Принцип действия датчиков Холла достаточно прост. Они имеют конструкцию, предполагающую наличие щели между проводником тока и замкнутым кольцом проводимости конструкции. С одной стороны щели расположен полупроводниковый элемент, а с другой его стороны - постоянный магнит, подключаемый к источнику питания.

В магнитном поле на движущиеся электроны воздействует сила, вектор которой перпендикулярен направлению магнитной и электрической составляющих поля.

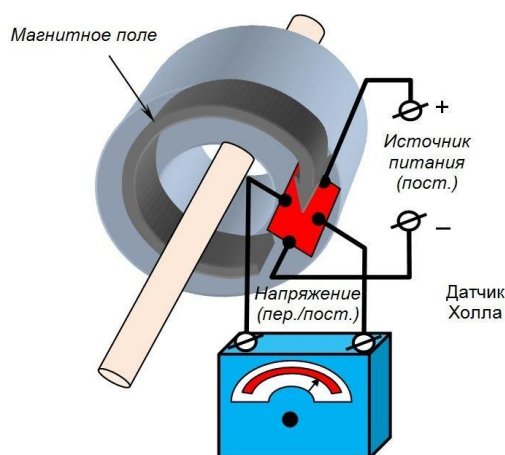


Рисунок 8.2 – Принцип действия эффекта Холла в датчиках.

Если внести в магнитное поле с индукцией  $B$  полупроводниковую пластинку (например, из арсенида индия или антимионида индия), через которую протекает электрический ток, то на боковых сторонах, перпендикулярно направлению тока, возникает разность потенциалов (см. рисунок 8.2). Напряжение Холла (ЭДС Холла) пропорционально току и магнитной индукции.

Между пластинкой и магнитом имеется зазор. В зазоре датчика находится стальной экран. Когда в зазоре нет экрана, то на пластинку полупроводника действует магнитное поле и с нее снимается разность потенциалов. Если же в зазоре находится экран, то магнитные силовые линии замыкаются через экран и на пластинку не действует, в этом случае разность потенциалов на пластинке не возникает.

Разность потенциалов между проводимыми элементами реализуется с помощью интегральной микросхемы. Она создается на пластинке, из указанных выше материалов, и преобразует эту разность в отрицательные импульсы напряжения определенной величины на выходе датчика. Другими словами, устройство служит для измерения напряжённости магнитного поля. Сегодня датчик Холла может быть, как аналоговым, так и цифровым.

Еще одним пунктом в пользу датчиков Холла является то, что они наиболее распространены и доступны, а также позволяют обеспечить требуемый уровень точности системы.

#### 8.1.1. Выбор датчиков тока

На основе вышеописанного принципа действия подобраны датчики тока Холла (таблица 8.2, рисунок 8.3). Выбор в их пользу определяется в сторону доступности подобных датчиков, распространенности на рынке и точности измерений при их использовании. В основу выбора так же положена область применения датчиков – общепромышленного и транспортного исполнения.

Таблица 8.1 – Технические характеристики датчиков тока [58, 59].

Производитель	$\pm I_{PN}$ А	$\pm I_p$ А	Технология	$U_c$ В	$V_{out}$ $I_{out}$ при $I_{PN}$	Хри $I_{PN}$ $T_A = 25^\circ$	$T_A$ $^\circ C$	№ рисунка	Тип
						%			
LEM	200	$\pm 300$	C/L	$\pm 12 \dots 18$	100 mA	$\pm 0.5$	-25...+70	4	LT 200-S/SP48
LEM	125	$\pm 200$	C/L	$\pm 15$	125 mA	$\pm 0.6$	-50...+85	7	LA 125-P/SP15
LEM	200	$\pm 400$	C/L	$\pm 24$	50 mA	$\pm 0.5$	-40...+85	110	LAC 300-S/SP8
LEM	300	$\pm 500$	C/L	$\pm 12 \dots 20$	150 mA	$\pm 0.3$	-40...+85	54	LF 305-S
LEM (авто-)	200	$\pm 250$	HAM	$\pm 12 \dots 18$	5 V	$\pm 1$	-40...+125	-	HAM



Рисунок 8.3 – Датчики тока фирмы LEM.



### 8.1.2. Выбор датчиков напряжения

Для настроенной модели асинхронного двигателя по аналогии с датчиками тока, основанными на принципе Холла, выбираем датчики напряжения. В таблице 8.2 и на рисунке 8.4 представлены датчики напряжения Холла различных фирм, подходящие по параметрам электрической системы электропривода.

Таблица 8.2 – Технические характеристики датчиков напряжения [58, 59].

Производитель	$\pm V_{PN}$ , V	$\pm V_P$ , V	$U_C$ , V	$I_{out}$ при $V_{PN}$ , mA	$X_G$ при $T_A=25^\circ C$	$T_A$ , $^\circ C$	Тип
					% от $V_{PN}$		
LEM	500	750	$\pm 15 \dots 24$	50	0.5	-40...+85	DVL 500
LEM	750	1125	$\pm 15 \dots 24$	50	0.5	-40...+85	DVL 750
NK Techno logies	600	2500	$\pm 20-45$	4–20	<0.5	-30...+60	VTD3



Рисунок 7.3 – Датчики напряжения фирмы LEM.

### 8.1.3. Выбор датчиков углового перемещения

Далее произведем выбор датчиков углового перемещения (скорости), который должен подключаться непосредственно к двигателю. Погрешность измерения для данного типа измерительной аппаратуры должна находиться в пределах  $\pm 1\%$  согласно указанным ранее условиям для возможности применения энергетического метода управления асинхронной машиной в составе тягового электропривода с указанной точностью определения электромагнитного момента.

В таблице 8.3 указаны датчики углового перемещения, подходящие под данные условия точности.

Таблица 8.3 - Технические характеристики датчиков углового перемещения [60, 61, 62].

Производитель	Напряжение питания	Точность системы	Инкрементальные сигналы		Абсолютные значения положения		Модель
			Выходные сигналы	Кол-во периодов сигнала на оборот	Кол-во позиций на оборот / допустимая скорость вращения	Интерфейс данных	
HEIDENHAIN	DC от 3,6 до 14 В	$\pm 1^0$	~ 1 В	32768	536870912 $\cong$ 29 бит /6000 об/мин	EnDat2.2/02	RCN8580
		$\pm 1^0$				EnDat2.2/22	RCN8510
		$\pm 1^0$	~ 1 В	36000	536871453 $\cong$ 29 бит /6000 об/мин	EnDat2.2/24	ROD 880
Novotechnik	До 42 В	$\pm 0,5^0$	~ 1 В	42000	10000 об/мин	Клеммы	P6500
IFM Electronic	4,5...30 DC	$\pm 0,5^0$	-	-	24 бит / 12000 об/мин	Интерфейс передачи данных SSI	RM8003
	4,75...30 DC	$\pm 0,1^0$	HTL (50 mA)	-	24 бит / 12000 об/мин	IO-Link (HTL; TTL)	RV3110

На рисунке 8.5 представлен внешний вид датчиков углового перемещения/ абсолютного и инкрементального энкодера фирмы HEIDENHAIN, Novotechnik и IFM Electronic.



Рисунок 8.5 – Датчики углового перемещения, абсолютный и инкрементальный энкодеры.

#### 8.1.4. Выбор микроконтроллера

И наконец произведем выбор последней составной части блока информационно – измерительной системы тягового электропривода. Ей является контроллер нагрузки – эталонная модель LC – RM. По сути, это микроконтроллер, на который записывается алгоритм уравнений энергетического метода управления, заданный в главе 3. К выбору данной аппаратуры предъявляется ряд требований. Основная цель выбрать наименее дорогой микроконтроллер (чтобы снизить общую стоимость системы), но в то же время удовлетворяющий спецификации системы, т.е. требованиям по производительности, надежности, условиям применения и т.д.

Для применения в тяговом электроприводе целесообразно будет применение 32-битных микроконтроллеров (МК). 32-разрядные микроконтроллеры содержат высокопроизводительный процессор, соответствующий по своим возможностям младшим моделям микропроцессоров общего назначения. В ряде случаев процессор, используемый в этих микроконтроллерах, аналогичен CISC- или RISC-

процессорам, которые выпускаются или выпускались ранее в качестве микропроцессоров общего назначения. Они находят широкое применение в системах управления сложными объектами промышленной автоматики (двигатели, робототехнические устройства, средства комплексной автоматизации производства), в контрольно-измерительной аппаратуре и телекоммуникационном оборудовании.

В качестве МК может быть использована достаточно дешевая микросхема 32-битного микроконтроллера STM32F405 (рисунок 8.6) производительностью до 210 MIPS со встроенными функциями цифровой обработки сигналов и с тремя 12-битными АЦП последовательного приближения с частотой преобразования до 2,4 МГц. При помощи встроенного многоканального мультиплексора, данные АЦП могут обрабатывать одновременно 24 сигнала. Применительно к используемой системе тягового электропривода, сигналы будут обрабатываться по два одновременно, а время задержки между ними не превысит 0,5 мкс. Они включают в себя высокоскоростную память (Flash до 1Мб, SRAM до 192Кб), до 4Кб резервной SRAM и расширенный диапазон I/O и периферии с подключением к шине AWP, трем шинам ANB и 32-битной матрице шин multi-ANB. Все устройства предлагают три 12-битных АЦП, два ЦАП, RTC малой мощности, двенадцать универсальных 16-битных таймеров и два ШИМ таймера для управления двигателями, два универсальных 32-битных таймера и генератор случайных чисел. Они так же оснащены стандартным и расширенным интерфейсами связи. В МК реализованы цифровые БИХ фильтры Баттерворта 5-го порядка с полосой пропускания 1 кГц, что обеспечивает подавление гармоник ШИМ не менее, чем на 130 дБ. Указанные фильтры вносят групповую задержку в выборки сигналов не более 10 отсчетов [63]. Контроллер нагрузки может быть реализован в указанном микроконтроллере, а преобразование цифровых сигналов, произведенных монитором, в аналоговый вариант можно выполнить с помощью встроенных в МК широтно – импульсных модуляторов ШИМ.

										Лист
										110
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ					

Конкурентоспособным вариантом также являются и другие микроконтроллеры серии STM. STM32L052K6T6 - это 32-разрядный микроконтроллер серии STM32 L0 со сверхнизким энергопотреблением, в котором реализована возможность подключения универсальной последовательной шины (без кристаллов USB 2.0) с высокопроизводительным ядром ARM Cortex-M0 + RISC, работающим на частоте 32 МГц. Он оснащен модулем защиты памяти (MPU), высокоскоростной встроенной памятью (32 КБ флэш-памяти программ, 2 КБ EEPROM данных и 8 КБ ОЗУ), а также широким спектром расширенных операций ввода-вывода и периферийных устройств. Это устройство обеспечивает высокую энергоэффективность для широкого спектра производительности. Это достигается благодаря большому выбору внутренних и внешних источников синхронизации, адаптации внутреннего напряжения и нескольких режимов пониженного энергопотребления. Кроме того, стоит отметить низкую стоимость подобных микроконтроллеров [64].

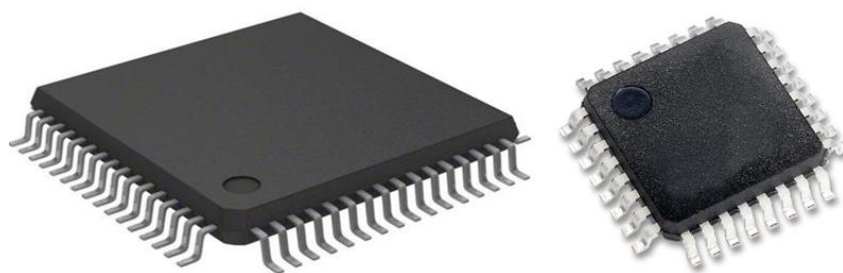


Рисунок 8.6 - Микросхема 32-битных микроконтроллеров серии STM32.

Сводная таблица данных изображена ниже [65].

Таблица 8.4 – Технические параметры микроконтроллеров серии STM32.

Название	STM32F405	STM32L052K6T6	STM32L431KCU6
Максимальное Напряжение Питания	3.6 В	3.6 В	3.6 В
Минимальное Напряжение Питания	1.8 В	1.65 В	1.71 В
Количество Выводов	32	32	32
Количество Бит	32	32	32
Количество I/O	25	27	26
Скорость ЦПУ	2,4 МГц	32 МГц	80 МГц
Размер Памяти	Flash до 1 Мб	32 КБ	256 КБ



частоты поля от скорости вращения вала. В других типах двигателей используются постоянные магниты, обмотки и т.д.

Для функциональной схемы, в общем случае, может быть выбран целый ряд асинхронных двигателей мощностью от 30 до 315 кВт, удовлетворяющих эксплуатационным условиям, заданным границам по коэффициенту полезного действия, скоростному режиму. Технические данные электродвигателей основного исполнения для синхронной скорости  $n = 12000$  об/мин и степенью защиты IP67 были представлены ранее. В состав тягового электропривода может входить несколько взаимосвязанных двигателей, то есть многодвигательные установки, в которых необходимо повышение точности распределения момента между каждым двигателем.

Наиболее применимым двигателем для электропривода общепромышленного производства является асинхронный двигатель. Это объясняется облегченной конструкцией, малыми размерами, отсутствием коллекторной части двигателя, надежностью и высоким КПД устройства. Но, как отмечалось ранее, для регулировки переменных двигателя необходима преобразовательная техника. Кроме того, асинхронные и синхронные двигатели имеют довольно тяжелый пусковой режим (большие токи асинхронного двигателя, необходимость подключения дополнительного двигателя для раскрутки синхронного двигателя). Использование исключительно механических устройств для регулировки приводит к снижению энергоэффективности и долговечности конструкции.

При использовании полупроводниковой техники, такой как преобразователь частоты с функцией широтно-импульсного модулирования (ШИМ) позволяет снизить пусковые токи в асинхронных двигателях в несколько раз и в отличие от схемы плавного пуска, дает возможность регулирования электроприводом по заданному алгоритму при помощи регуляторов  $A_1$  и  $A_2$ .

Применение ПЧ является более энергоэффективным способом управления, по сравнению с другими существующими техническими средствами. При этом

возникает возможность создания обратных связей между подобными приводами в системах многодвигательных установок, в том числе в тяговом электроприводе. Таким образом, возможна синхронизация и настройка оборудования привода в соответствии с установленными законами управления, что позволяет менять режимы работы всей системы в целом.

ПЧ с ШИМ представляет из себя инвертирующее устройство (т.е. преобразующее постоянный ток в переменный), используя двойное преобразование напряжения на входе. ШИМ или иностранный вариант PWM (широтно-импульсная модуляция, по-английски pulse-width modulation) – это способ регулирования подачи мощности к нагрузке системы [66]. Основа управления состоит в изменении длительности подаваемого на полупроводниковые элементы импульса при их постоянной частоте следования.

Применение ШИМ позволяет увеличить значение КПД электрических преобразователей, в том числе импульсных преобразователей.

Основа принципа преобразования напряжения заключается в первичном преобразовании сетевое напряжение и дальнейшее его выпрямление входным диодным мостом. После этого напряжение сглаживается и происходит фильтрация при помощи конденсаторов [67].

Сутью второго этапа является преобразование постоянного напряжения, с помощью микросхем управления и выходных мостовых и полевых IGBT ключей, с формированием ШИМ последовательности сигнала определенной частоты и скважности. На выходе частотного преобразователя происходит выдача прямоугольных импульсов по заданным периодам. Однако за счет индуктивности обмоток статора асинхронного двигателя, они преобразуются в напряжение близкое к синусоидальному (рисунок 8.7 и рисунок 8.8).





Рисунок 8.7 – Принципиальная схема преобразователя частоты для асинхронного электрического двигателя.

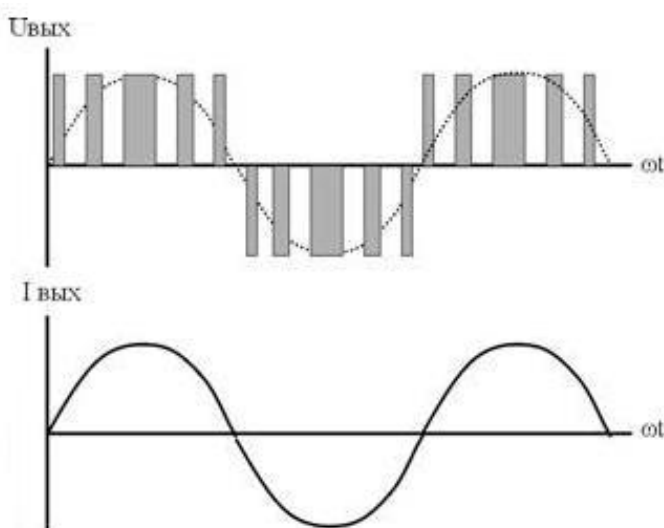


Рисунок 8.8 – График напряжения на выходе ПЧ с ШИМ.

Выводы по разделу восемь. Таким образом, разработана функциональная схема с электронным измерителем момента, состоящая из информационно – измерительного блока, двигателя переменного тока, инвертора (ПЧ с ШИМ), канала обратной связи по моменту и канала обратной связи по напряжению. В комплекс информационно-измерительного блока входят все датчики, используемые в комплексах тягового электропривода, измерительные преобразователи инвертора и дополнительные датчики напряжения. Были подобраны варианты основных аппаратных составляющих электронного измерителя крутящего момента: датчики тока, напряжения, углового перемещения, а также микроконтроллеры для эталонной модели. На данном этапе выбранная измерительная аппаратура соответствует заданным

требованиям по точности, а также производительности и быстродействию. Метрологическое обеспечение тягового электропривода должно решать широкий круг задач управления, диагностики, защиты, резервирования. Этим требованиям и соответствует разработанный информационный комплекс. Функциональная схема позволяет достаточно точно измерять крутящий момент тягового привода, позволяет использовать элементы даже в тяжелых эксплуатационных условиях. В отличие от существующих систем, имеет малые габариты и возможность измерять и управлять не только моментом, но основными технологическими параметрами системы, не требует дополнительных компенсирующих муфт, не зависит от изменения температуры. Кроме того, используемые в электронном измерителе уравнения управления моментом и уровень точности измерений современной преобразовательной техники, позволяют обеспечивать точность в (2,5...3)%.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лис</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		116

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ВКР рассмотрены существующие методы измерения в тяговом электроприводе, на основе которых сделан выбор в пользу косвенного измерения крутящего момента по средствам электронного измерителя. По средствам ИКМ исключаются такие недостатки прямого измерения моментом как крупные габариты, необходимость установки датчика на вал, в некоторых случаях даже точность измерения. Это позволяет использовать его даже в сложных эксплуатационных условиях. В его основу положен энергетический метод формирования электромагнитного момента, входящий в теорию обобщенного энергетического потока электрической машины. Он учитывает недостатки векторного управления и позволяет повысить точность определения электромагнитного момента в 3-4 раза. Раскрыт принцип построения электронного измерителя крутящего момента, в основу которого положены разработки информационно-измерительной системы электропривода.

Выполнена оптимизация математической модели асинхронного двигателя по критерию минимума среднеквадратичного отклонения базовых показателей, благодаря которой определены значения сопротивлений электрической машины, позволяющие с высокой точностью определять ее основные параметры.

Моделирование точностных характеристик подтвердило реализуемость предъявленных требований к точности определения электромагнитного момента на уровне  $\pm (2,5 \dots 3) \%$ . При этом определены допуски на определение суммарных номинальных потерь активной мощности и их зависимость от КПД и класса точности измерительных приборов, а также допуски на погрешности прямого измерения активной мощности, угловой скорости, тока и напряжения. Кроме того, произведен выбор измерительной аппаратуры и микроконтроллера, входящих в состав информационно – измерительной системы тягового электропривода, точность измерения которых учитывалась при моделировании.

Разработана общая функциональная схема тягового электропривода с электронным измерителем крутящего момента.

В результате проделанной работы получена универсальная система косвенного определения момента по средствам электронного измерителя тягового электропривода с требуемыми точностными характеристиками. Подтверждено, что данная система позволяет повысить точность определения крутящего момента до уровня  $\pm (2,5...3) \%$  приведенной погрешности, то есть в 3-4 раза по сравнению с векторным методом управления.

Данная работа является второй ВКР, выполненной мной в течение периода работы в научной группе по автомобильному тяговому электроприводу. В выпускной квалификационной работе использованы разработки и публикации коллектива научной группы с моим участием.

При выполнении выпускной квалификационной работы использовались такие программы как MathCAD и AutoCAD, при помощи которых производились такие расчеты как настройка математической модели электрической машины по техническим данным и моделирование точностных характеристик электрической машины, а также разработка функциональных схем как информационно – измерительной системы тягового электропривода, так и общей функциональной схемы электронного измерителя крутящего момента в составе тягового электропривода.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Peter Vas. Sensorless vector and direct torque control / Peter Vas. – М.: Oxford New York Tokyo, Oxford University Press, 1998- 729 с.
2. Smolin, V. Energy-Efficient Traction Induction Machine Control / Smolin, V., Gladyshev, S., Nikiforova, E., Sidorenko, N. // SAE Technical Paper 2019-01-0598. – 2019. – doi: 10.4271/2019-01-0598.
3. Smolin V.I. Measurements of a torque of the electrical machines according to their electrical parameters / Smolin V.I., Topolsky D.V., Gudaev N.N. // Power Electronics and Applications. – 1997. – P. 305-307.
4. Анучин А.С. Состояние и перспективы развития городского гибридного электрического тягового электропривода в России / Анучин А.С., Алямкин Д.И., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М., Остриров В.Н. // АЭП – 2014, Том 2. – 2014. – С. 24 – 28.
5. ГОСТ Р 50369-92 Электроприводы. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 35 с.
6. Gladyshev S. The microprocessor torque meter for car test stands with an induction motor as a load / Gladyshev S., Smolin V., Topolsky D., Topolskaya I. // SAE Technical Papers. – 2005, doi: 10.4271/2005-01-1037.
7. Gladyshev S.P. Dynamics of torque meter for car test stands / Gladyshev S.P., Smolin V.I., Topolsky D.V., Topolskaya I.G. // SAE Technical Papers № 1. – 2003, doi: 10.4271/2003-01-1034.
8. Богданов К.Л. Тяговый электропривод автомобиля / К. Л. Богданов. – М.: МАДИ, 2009. – 57 с.
9. Гринченко В. А. Обоснование базовой конструкции линейного электродвигателя / В. А. Гринченко // Theoretical & Applied Science, Т. 1. №11 (7). – 2013. – С. 58 – 60.
10. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / Чиликин М.Г., Сандлер А.С. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		119

11. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства / Бычков В.П. – М: Высшая школа, 1977. – 391 с.
12. Егоров С.В. Распределение нагрузок в многодвигательных электроприводах / Егоров С.В., Егоров В.Ф. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – С. 96-99.
13. Schneider Electric. Руководство пользователя. Выравнивание нагрузки с помощью ПЧ Altivar 71, 2009. – 18 с.
14. Студопедия.нет. Система активного распределения крутящего момента. - [https://studopedia.net/2\\_17977\\_sistema-aktivnogo-raspredeleniya-krutyashchego-momenta.html](https://studopedia.net/2_17977_sistema-aktivnogo-raspredeleniya-krutyashchego-momenta.html) (дата обращения: 1.02.2020).
15. Электробус Proterra Catalyst E2 – <https://mda-tech.ru/proterra-catalyst-e2/> (дата обращения: 15.01.2020).
16. И.П. Ксенович. Технологии гибридных автомобилей: состояние и пути развития отечественной автомобильной техники с комбинированными энергоустановками / И.П. Ксенович, А.А. Ипатов, Д.Б. Изосимов // Мобильная техника. № 2, 3. – 2003 г.
17. Stanislav N. Florentsev. From Russia with Automotive. AC electric drive of a hybrid city bus // Power System Design Europe. July/August 2009. – P. 50 – 51.
18. Смолин В.И. Теория обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей / В.И. Смолин, И.Г. Топольская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» - 2013. - №1 (13). – С. 128 –136.
19. Смолин В.И. Энергетический метод управления моментом тяговой синхронной машины / Смолин В.И., Топольская И.Г., Гладышев С.П. // SAE Technical Papers № 1. – 2018 г.
20. Smolin, V. Minimization of Electric Heating of the Traction Induction Machine Rotor / Smolin, V., Nikiforova, E., Gladyshev, S. // SAE Technical Paper 2020-01-0562. – 2020, doi: 10.4271/2020-01-0562.

21. Никифорова Е.А. Технология определения электромагнитного момента электрических машин тягового электропривода // Никифорова Е.А. – Челябинск: ЮУрГУ, 2018 г. – 85 с.
22. Никифорова Е.А. Информационное обеспечение тягового электропривода / Никифорова Е.А., Смолин В.И. // Молодой исследователь. Материалы 5-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов. – М: Издательский центр ЮУрГУ. – 2018 – С. 401-409.
23. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Далаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982 – 504 с.
24. BRUSA Electronic AG. Technical data and Start-up. Translation of the original German operating instructions, 2014. – 85 p.
25. ARADEX AG. Datasheet VM600M-1AW0318. Synchronous electric motors and generators for mobile applications optimized for maritime applications and perfectly matched to the VP600 inverter product line, 2018/08/14. – 3 p.
26. Король В.М. Особенности применения тягового асинхронного двигателя в составе рельсового транспорта / В.М. Король // МЕХАНИКА МАШИН, МЕХАНИЗМОВ И МАТЕРИАЛОВ, № 1 (18). – 2012. – С. 17 – 19.
27. Betz R.E. Instantaneous Power Control of Induction Machines / Betz R.E., Cook V.J. // Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, 21 №1. – 2001. – P. 57 – 63.
28. Nantong Industrious. Электромагнитные динамометры. - <http://qu-machine.ru/11-magnetic-dynamometer.html/164260/> (дата обращения:8.02.2020).
29. Промтекс. ДАТЧИКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА. - <https://www.promtex.org/catalog/datchiki/krutyashchiy-moment/> (дата обращения:8.02.2020).
30. Функ Т.А. Косвенное определение составляющих перемещения в электроприводе / Т.А. Функ, Н.М. Сапрунова, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев // «Электротехника» №12/2015. – 2015 г. – С. 38 – 41.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		121

31. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
32. Bial Akin. Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors. Application report. SPRABQ8 / Bial Akin, Nishant Garg. – Dallas, USA: Texas Instruments, 2013. – 25 p.
33. Cristian Busca. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application / Cristian Busca. – Aalborg, Denmark: Aalborg universitet. – 2012.
34. Ковальчук Д.А. Векторное управление синхронным электродвигателем / Ковальчук Д.А., Мазур А.В. // Национальная академия пищевых технологий, №17/2014. –2014. С. 71 – 75.
35. Toufouti, R. Direct torque control for induction motor using intelligent techniques / Toufouti, S. Meziane, H. Benalla // Journal of theoretical and applied information technology. - 2007. - P. 35-44.
36. Келлер А. Прямое измерение момента в электроприводе / Келлер А., Сергеевский Ю.Н. // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2014. – 2014 г. – С. 58-62.
37. Давыдов Ю.А. Тяговые электрические машины. Учебное пособие / Ю.А. Давыдов. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2013. – 127 с.
38. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учебное пособие / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издат. Центр «Академия», 2004. – 256 с.
39. Smolin V.I. The energy method for monitoring the instantaneous state and the information of a synchronous motor control variables / Smolin V.I., Topolskaya I.G., Volovich G.I. // The 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. 2016. – 2016, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911509.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		122



40. Smolin V.I. Amplitude control of the moment of a three – phase asynchronous drive based on generalized energy – flow principles / V.I. Smolin, I.G. Topol'skaya // Russian Electrical Engineering, vol. 85, № 4. – 2014. – P. 205 – 209.
41. ABB Ltd. Catalog. Process performance motors. Low voltage. ABB Motors and Generators, February 2020 – 150 p.
42. Smolin, V. Energy Method for Torque Control of a Synchronous Traction Motor / Smolin, V., Topolskaya, I., Gladyshev, S.P. // SAE Technical Paper 2018-01-0766. – 2018, doi: 10.4271/2018-01-0766.
43. Смолин В.И. Развитие энергетической теории управления автомобильным тяговым электроприводом / Смолин В.И., Никифорова Е.А. // 2020 Международная Конференция по Автоматизированному Электроприводу (АЭП — 2020), Санкт-Петербург, Россия, Октябрь 04-07. – 2020, в печати.
44. Бирюков В. В., Порсев Е. Г. Тяговый электрический привод: учеб. пособие для вузов / В. В. Бирюков, Е. Г. Порсев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 315 с.
45. Никитенко Г.В. Электропривод производственных механизмов: учебное пособие / Г.В. Никитенко. – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2012. – 240 с.
46. Эпштейн, И.И. Автоматизированный привод переменного тока / И.И. Эпштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 192 с.
47. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008. – 298с.
48. Иванов А.С. Переходные процессы в электрических машинах / А.С. Иванов, Ю.А. Мощинский – М: Издательство МЭИ, 2018. – 67 с.
49. ZF Friedrichshafen AG. Catalog. Efficient and dynamic. Transmission technology from ZF, 09/2017. – 11 p.
50. Bosch Rexroth AG Electric Drives and Controls. Project Planning Manual. Rexroth 1MB Frameless Spindle Motors. R911264277, Edition 02, 2003. – 180 p.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		123

51. John Deere Power Systems. Industrial Drivetrain Specifications. Funk™ F25R Planetary Drive (17-01), 2017. – 1 p.
52. BorgWarner Inc. HVH250-115 Electric Motor, Product Sheet 3-16, 2016. – 2 p.
53. Parker Hannifin Corporation. GVM Global Vehicle Motor. Permanent Magnet (PMAC) Motors and Generators for Traction, Electro-Hydraulic Pumps (EHP) and Auxiliary Systems”. 192-300108N7, 03/2019. – 2019. – 24 p.
54. TECO Electric & Machinery Co., Ltd. (Europe) Standard IE2/IE3 Motor Catalogue AESV-AESU. APR. 14 / TA-6401, 2014. – 28 p.
55. Никифорова Е.А. Модель потерь мощности асинхронной машины тягового электропривода / Никифорова Е.А., Смолин В.И., Литвинова Е.В. – М: Издательский центр ЮУрГУ. – 2020, в печати.
56. Казаков Ю.Б. Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при конструктивных и режимных вариациях: учебное пособие для вузов / Ю.Б. Казаков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 152 с.
57. Виноградов И.М. Математическая энциклопедия. Серия «Энциклопедии, словари, справочники». В 5 томах. Том 1. / Под ред. И.М. Виноградов. – М.: Советская энциклопедия, 1977. – 576 с.
58. LEM International SA. Catalog of current and voltage sensors, 2013.–104p.
59. NK Technologies. Производитель измерительной аппаратуры. - <https://www.nktechnologies.com/> (дата обращения:10.04.2020).
60. HEIDENHAIN. Каталог. Датчики угловых перемещений со встроенными подшипниками, Март 2015, 2015. – 64 с.
61. Novotechnik. Standard Potentiometers, Series P6500, 05/2010, 2010. – 2 p.
62. IFM Electronic gmbh. Каталог энкодеров RM8003 RMS4096-S24/L2U и RV3110, 2014. – 3 и 2 с.
63. STMicroelectronics. Catalog Doc ID 022152 Rev 2, STM32F405xx, January 2012, 2012. – 167 p.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		124

64. STMicroelectronics. Catalog DocID025936 Rev 6, STM32L052x6, March 2016, 2016. – 136 p.

65. STMicroelectronics. Catalog DocID028800 Rev 2, STM32L431xx, June 2017, 2017. – 207 p.

66. Школа Электрика. Принцип работы частотного преобразователя и критерии его выбора для потребителя. - <http://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/726-princip-raboty-chastotnogo.html> (дата обращения: 14.05.2020).

67. Danfoss. Преобразователи частоты. - <https://drives.ru/stati/chastotnye-preobrazovateli/> (дата обращения: 14.05.2020).

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2020.181.01ПЗ</b>	Лис
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		125

