

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна

На правах рукописи

Афанасов Андрей Михайлович

УДК 629.423.31-048.24

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

05.22.09 – электротранспорт
05.22.12 – промышленный транспорт

Диссертация на соискание научной степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Гетьман Геннадий Кузьмич

Днепропетровск – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 7 |
| | |
| РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА..... | 20 |
| 1.1 Цель и особенности приёмо-сдаточных испытаний электрических машин тягового подвижного состава..... | 20 |
| 1.2 Аналитический обзор работ в области разработки систем нагружения электрических машин постоянного тока..... | 23 |
| 1.3 Системы взаимного нагружения электрических машин постоянного тока общепромышленного назначения..... | 27 |
| 1.4 Системы взаимного нагружения электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава..... | 37 |
| 1.5 Общий характер энергообменных процессов при взаимной нагрузке электрических машин постоянного тока..... | 41 |
| 1.6 Динамическое нагружение тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока..... | 50 |
| 1.7 Выводы по разделу 1..... | 61 |
| | |
| РАЗДЕЛ 2 СИНТЕЗ СИСТЕМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА | 62 |
| 2.1 Электромеханические аналогии физических величин и понятий для систем взаимного нагружения тяговых электромашин..... | 62 |
| 2.2 Энергетические принципы взаимного нагружения электрических машин постоянного тока..... | 67 |
| 2.3 Электромеханические принципы взаимного нагружения электрических машин постоянного тока..... | 78 |
| 2.4 Принципы синтеза систем взаимного нагружения электрических машин постоянного тока..... | 84 |
| 2.5 Определение схемных решений системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока..... | 90 |
| 2.6 Классификация систем взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока..... | 106 |
| 2.7 Выводы по разделу 2..... | 108 |
| | |
| РАЗДЕЛ 3 УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА..... | 110 |
| 3.1 Принципы регулирования небалансной электромагнитной мощности взаимно нагруженных тяговых электромашин..... | 110 |

| | | |
|---|--|-----|
| 3.1.1 | Регулирование небалансного электромагнитного момента испытываемых электромашин..... | 117 |
| 3.1.2 | Регулирование небалансной э. д. с. испытываемых электромашин..... | 123 |
| 3.2 | Определение основных характеристик управления режимом взаимного нагружения тяговых электромашин..... | 130 |
| 3.2.1 | Регулирование разности токов испытываемых электромашин 130 | |
| 3.2.2 | Регулирование разности угловых скоростей испытываемых электромашин..... | 133 |
| 3.2.3 | Регулирование разности магнитных потоков испытываемых электромашин..... | 136 |
| 3.3 | Определение диапазона регулирования токов возбуждения взаимно нагруженных тяговых электромашин..... | 150 |
| 3.3.1 | Регулирование возбуждения при электрическом способе компенсации потерь холостого хода..... | 150 |
| 3.3.2 | Регулирование возбуждения при механическом способе компенсации электрических потерь..... | 155 |
| 3.3.3 | Определение необходимой разности токов возбуждения взаимно нагруженных тяговых электромашин..... | 160 |
| 3.4 | Моделирование магнитных характеристик тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока..... | 173 |
| 3.5 | Принципы автоматического управления системами взаимного нагружения тяговых электрических машин..... | 183 |
| 3.5.1 | Прямой способ компенсации электрических потерь..... | 185 |
| 3.5.2 | Прямой способ компенсации потерь холостого хода..... | 186 |
| 3.5.3 | Косвенные способы компенсации электрических потерь 187 | |
| 3.5.4 | Косвенные способы компенсации потерь холостого хода 189 | |
| 3.5.5 | Компенсация потерь холостого хода источником напряжения, включенным параллельно..... | 190 |
| 3.6 | Выводы по разделу 3..... | 193 |
| РАЗДЕЛ 4 АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПРИ ИХ ИСПЫТАНИИ НА НАГРЕВ МЕТОДОМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ..... | | |
| 4.1 | Потери мощности в тяговых электрических машинах при испытании..... | 194 |
| 4.1.1 | Электрические потери..... | 194 |
| 4.1.2 | Магнитные потери..... | 196 |
| 4.1.3 | Механические потери..... | 205 |
| 4.2 | Влияние видов потерь мощности на превышение температуры обмоток тяговых электрических машин при их испытании..... | 213 |

| | | |
|--|---|-----|
| 4.3 | Определение расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей взаимно нагруженных тяговых электромашин..... | 222 |
| 4.4 | Определение расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения взаимно нагруженных тяговых электромашин..... | 229 |
| 4.5 | Выводы по разделу 4..... | 236 |
| | | |
| РАЗДЕЛ 5 ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ..... | | 237 |
| 5.1 | Определение необходимой суммарной мощности источников питания системы взаимного нагружения..... | 237 |
| 5.2 | Понятие энергетической эффективности процесса испытания тяговых электрических машин методом взаимного нагружения | 247 |
| 5.3 | Определение показателей энергетической эффективности испытаний тяговых электрических машин..... | 252 |
| 5.3.1 | Энергетическая эффективность системы взаимного нагружения тяговых электрических машин..... | 252 |
| 5.3.2 | Энергетическая эффективность механического способа компенсации электрических потерь..... | 257 |
| 5.3.3 | Энергетическая эффективность электрического способа компенсации потерь холостого хода..... | 267 |
| 5.3.4 | Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электрических машин..... | 276 |
| 5.4 | Выводы по разделу 5..... | 287 |
| | | |
| РАЗДЕЛ 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ И РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ПРИЁМО- СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ..... | | 289 |
| 6.1 | Определение характеристик источников и преобразователей мощности систем взаимного нагружения тяговых электромашин | 289 |
| 6.1.1 | Определение параметров источников электрической мощности..... | 290 |
| 6.1.2 | Определение параметров источников механической мощности..... | 293 |
| 6.1.3 | Определение параметров преобразователей напряжения и механического момента..... | 296 |
| 6.1.4 | Определение параметров регулятора тока возбуждения..... | 298 |
| 6.2 | Выбор рациональных схем взаимного нагружения электрических машин тягового подвижного состава..... | 300 |
| 6.2.1 | Определение рационального количества источников мощности..... | 302 |
| 6.2.2 | Выбор типа источника мощности..... | 305 |

| | | |
|--|---|-----|
| 6.2.3 | Выбор типа преобразователя мощности..... | 307 |
| 6.2.4 | Выбор способа регулирования возбуждения тяговых электрических машин..... | 312 |
| 6.2.5 | Определение ряда рациональных альтернатив..... | 315 |
| 6.3 | Анализ схемных решений рациональных вариантов..... | 317 |
| 6.4 | Определение рациональных режимов нагружения тяговых электромашин..... | 322 |
| 6.5 | Выводы по разделу 6..... | 334 |
| ВЫВОДЫ | | 336 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | | 339 |

ВВЕДЕНИЕ

Анализ инвентарного парка тягового подвижного состава железных дорог и промышленных предприятий Украины показывает, что наибольшая его часть приходится на тяговые средства, в которых используются коллекторные тяговые двигатели постоянного или пульсирующего тока. В настоящее время обновление парка тягового подвижного состава железных дорог Украины осуществляется локомотивами и электропоездами как с асинхронным, так и коллекторным тяговым приводом. Электропривод тягового подвижного состава промышленных предприятий практически весь коллекторный. Такая тенденция, обусловленная, прежде всего, относительной дешевизной коллекторного тягового электропривода, будет сохраняться, по-видимому, и в дальнейшем.

Требования соответствующих стандартов и правил ремонта тягового подвижного состава предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой вновь изготовленной или вышедшей из ремонта тяговой электромашин. Эти испытания представляют собой важную и неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта тяговой электромашин, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции.

Качество технического контроля, проводимого при приёмо-сдаточных испытаниях тяговых электромашин, в конечном счёте, определяет надёжность и безотказность всего тягового средства, а, следовательно, и экономическую эффективность железнодорожных перевозок магистрального и промышленного транспорта.

Актуальность темы

Анализ реального состояния станций для испытаний тяговых электрических машин показывает, что на большинстве предприятий по ремонту тягового подвижного состава оно не соответствует современным требованиям организации ремонта и технического контроля. На большинстве испытательных станций используются стенды взаимной нагрузки с низкой энергетической эффективностью, «ручными» способами регулирования режимом испытания, контроля и регистрации данных. В ряде локомотивных депо, выполняющих ремонт тягового подвижного состава в объёме ТРЗ, вообще нет стендов для проведения испытаний тяговых электромашин под нагрузкой.

Необходимость в модернизации существующих станций для испытания тяговых электрических машин в настоящий момент является очевидной. Однако вопрос о том, какой из вариантов системы нагружения будет наиболее рациональным для определённого типа испытуемых электромашин остаётся актуальным и до настоящего времени. Даже поверхностный анализ параметров существующего типового ряда тяговых электромашин и известного количества вариантов схем взаимного нагружения электромашин указывает на то, что данная проблема требует

более глубокого исследования.

В настоящее время на станциях для испытания тяговых электромашин наиболее часто применяется схема взаимной нагрузки с использованием вольтдобавочной машины и линейного генератора. Как известно, это не единственный вариант системы взаимного нагружения, который в своё время получил широкое распространение благодаря относительной простоте технической реализации при использовании электромашинных преобразователей, а также – из-за возможности отдельного «ручного» регулирования напряжения и тока нагрузки испытуемых электромашин. В современных условиях эти преимущества уже могут быть оспорены.

Замена электромашинных преобразователей на статические, целесообразность которой на сегодняшний день у многих не вызывает сомнений, тем не менее, требует обоснования выбора параметров источников питания, алгоритмов управления и способов защиты от аварийных режимов. Опыт такой замены на некоторых предприятиях показал, что без решения перечисленных вопросов модернизация испытательных станций крайне неэффективна. Возможно, в ряде случаев будет целесообразным применение специальных электромашинных преобразователей с более высокой энергетической эффективностью по сравнению с существующими.

Порядок проведения приёмо-сдаточных испытаний электрических машин тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта регламентируется ГОСТ 2582-81, Правилами ремонта электрических машин электровозов и электропоездов, Правилами ремонта электрических машин тепловозов и дизель - поездов. Необходимо отметить, что требования данных документов в части режимов нагружения тяговых электромашин являются достаточно формальными и сформулированы для наиболее распространённого метода взаимного нагружения с использованием вольтдобавочной машины и линейного генератора.

Испытаниям электрических машин общепромышленного назначения посвящён ряд исследований, к основным из которых относятся работы таких учёных как Г. К. Жерве, В. Нюрнберг, Ф. Пунга, Р. Рихтер, Л. М. Пиотровский, Е. А. Паль, А. Б. Иоффе, А. Е. Алексеев, В. А. Винокуров, Н. Ф. Котеленец, Е. М. Коварский, О. Д. Гольдберг. Ряд вопросов, связанных с испытаниями тяговых электрических машин, освещён в работах Д. Д. Захарченко, М. Д. Находкина, А. С. Курбасова, И. П. Исаева, В. Е. Розенфельда, Б. Н. Тихменева, Л. М. Трахтмана.

Из современных исследований в области совершенствования технологии испытания тяговых электрических машин следует отметить работы О. Н. Синчука, А. Б. Бабанина, Д. Л. Сушко, В. В. Артёменко, Л. В. Дубинца, П. А. Лозы, И. И. Тальи. Результаты теоретических и экспериментальных исследований в области динамического нагружения электрических машин постоянного и переменного тока освещены в многочисленных работах Д. И. Родькина. Мониторингу параметров электрических двигателей электромеханических систем посвящены работы А. П. Чёрного.

Во многих из данных работ, как правило, рассматриваются общие вопросы испытаний электромашин с упоминанием известных схемных решений системы взаимного нагружения. Однако до настоящего времени не определён и не систематизирован полный ряд возможных схемных решений, обеспечивающих взаимную нагрузку электромашин постоянного тока. Требуется более глубокого исследования вопрос возможности использования известных принципов взаимного нагружения электромашин постоянного тока общепромышленного назначения независимого возбуждения применительно к тяговым электромашинам последовательного возбуждения. Мало изучены вопросы, связанные с эквивалентными режимами испытаний тяговых электромашин и их влиянием на расход электроэнергии, а также качество испытаний.

В связи с изложенным выше, можно заключить, что исследования, направленные на развитие научных основ и усовершенствование энергоэффективных методов испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта являются актуальными.

Связь работы с научными программами, планами и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии со следующими государственными программами:

- Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 г., утверждённая Постановлением Кабинета Министров Украины от 15.03.2006 г. №145;
- Государственная целевая экономическая программа энергоэффективности и развития сферы производства энергоносителей с обновляемыми источниками энергии и альтернативных видов топлива на 2010-2015 годы, утверждённая Постановлением Кабинета Министров Украины от 01.03.2010 г. № 243;
- Постановление Кабинета Министров Украины от 23.04.1999 г. № 661 «О мероприятиях государственной поддержки железнодорожного транспорта».
- Программа энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины на период 1996-2010 г., утверждённая решением научно-технического совета Укрзалізничці от 26.06.1996 г.

Цель и задачи исследования

Целью работы является развитие научных основ и совершенствование энергоэффективных методов испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока путём обоснования новых принципов определения рациональных схем и режимов нагружения тяговых электромашин, обеспечивающих снижение суммарной мощности источников питания испытательной станции, повышение энергетической эффективности и качества испытаний.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

- выполнить анализ известных способов и режимов нагружения электрических машин постоянного тока, в результате которого определить перспективные направления усовершенствования энергоэффективных методов испытания электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта;
- обосновать и формализовать общие энергетические и электромеханические принципы взаимного нагружения электрических машин постоянного тока, на базе которых могут быть сформулированы принципы синтеза систем нагружения тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта;
- определить и систематизировать полный ряд принципиально возможных вариантов электромеханической схемы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока последовательного возбуждения, который может рассматриваться в качестве множества альтернатив при решении задачи выбора рациональной схемы нагружения для испытания тяговых электромашин;
- получить аналитические выражения для определения суммарной приведенной мощности источников питания испытательной системы, которая может рассматриваться как один из критериев выбора рационального варианта схемы взаимного нагружения испытуемых электромашин тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта;
- сформулировать и обосновать общие принципы регулирования режимов взаимного нагружения тяговых электрических машин при их испытании, на базе которых могут быть созданы функциональные схемы систем автоматического управления режимами взаимного нагружения испытуемых электромашин;
- обосновать показатели энергетической эффективности процесса испытания электромашин постоянного и пульсирующего тока, которые могут быть использованы в качестве критериев выбора рациональных схем и режимов нагружения при испытаниях электрических машин тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта;
- разработать и обосновать методы оценки степени расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей и обмоток возбуждения пары взаимно нагруженных испытуемых тяговых электромашин, которая определяет качество испытания и может быть использована как один из критериев выбора рационального варианта схемы взаимного нагружения;
- определить рациональные схемы и режимы взаимного нагружения электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового

подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, которые обеспечивают высокую энергетическую эффективность и качество приемо-сдаточных испытаний электромашин.

Объект исследования – процесс приёмо-сдаточных испытаний электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта.

Предмет исследования – характеристики систем и режимов взаимного нагружения электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта.

Методы исследований

Методологической основой диссертации являются общие теоретические положения и принципы системного подхода теоретической электротехники, теоретической механики, теории электрических машин и преобразователей. Обоснование энергетических и электромеханических принципов взаимного нагружения тяговых электромашин выполнено с использованием основ обобщения и систематизации физических величин и понятий, теории электрических цепей, теории механических систем, теории электрических машин. Для обоснования принципов регулирования режимов взаимного нагружения тяговых электромашин используются методы анализа электромагнитных и электромеханических процессов в электрических машинах, а также методы математического анализа. Анализ тепловых процессов и энергетических показателей системы испытания электромашин выполнен с использованием теории нагрева однородного твёрдого тела и известных методов расчёта тепловых схем. Обработка статистических данных выполнена с использованием методов теории вероятностей и математической статистики. При разработке функциональных схем систем автоматического управления режимом взаимного нагружения электромашин использованы основные принципы теории автоматического управления. При решении задачи выбора рациональных схем и режимов нагружения испытуемых электромашин использованы основы теории принятия решений.

Достоверность полученных результатов определяется корректностью принятых допущений, обеспечивается использованием в теоретических исследованиях известных методов анализа, а в расчётах – ПЭВМ. Результаты теоретических исследований диссертации подтверждены экспериментально.

Научная новизна полученных результатов

Впервые:

– формализованы общие энергетические и электромеханические принципы взаимного нагружения электрических машин постоянного тока, представленные в виде условия компенсации потерь мощности во взаимно

нагруженных электромашинах, а также множеств условий протекания тока нагрузки и условий вращения роторов, что позволило определить полный ряд возможных схемных решений системы взаимного нагружения электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта;

- введено понятие небалансной электромагнитной мощности взаимно нагруженных электрических машин, а также обоснованы общие принципы регулирования режимов взаимного нагружения путём изменения небалансного электромагнитного момента и небалансной э. д. с., на основании которых разработаны функциональные схемы систем автоматического управления режимами взаимного нагружения электрических машин тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта;

- энергетическая эффективность процесса испытания тяговых электромашин на нагрев представлена в виде зависимости от коэффициентов энергетической эффективности системы взаимного нагружения и процесса нагревания, что позволяет рассматривать решение задачи повышения энергетической эффективности испытания в двух независимых направлениях, одно из которых – повышение к. п. д. источников и преобразователей мощности, а второе – выбор рациональных режимов нагружения;

- введено понятие и получены аналитические выражения для определения энергетической эффективности нагревания обмоток испытуемой тяговой электрической машины, представленной в виде отношения изменения суммарной термической энергии электромашины к суммарной энергии потерь в ней, что позволило обосновать возможность повышения энергетической эффективности испытания на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального железнодорожного транспорта за счёт повышения тока нагрузки до пускового значения;

- научно обоснована целесообразность проведения испытаний на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава промышленного железнодорожного транспорта при токе нагрузки пятнадцатиминутного режима, что обеспечивает повышение энергетической эффективности испытаний и соответствующее уменьшение общего расхода электроэнергии на приемо-сдаточные испытания;

- получена универсальная характеристика магнитных потерь в тяговых электрических двигателях постоянного и пульсирующего тока, представляющая собой зависимость приведенных магнитных потерь от частоты перемагничивания якоря при постоянном напряжении на коллекторе, использование которой существенно упрощает проведение обобщённого анализа зависимости магнитных потерь в испытуемых тяговых двигателях от режимов их нагружения.

Получили дальнейшее развитие и усовершенствованы:

- систематизация и классификация систем взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока, в основу

которых заложены как энергетические, так и электромеханические принципы взаимного нагружения, что позволило увеличить количество признаков разбиения множества альтернатив при решении задачи выбора рациональных схем нагружения испытуемых электромашин;

- представление о влиянии на режим взаимного нагружения пары тяговых электромашин степени расхождения их магнитных характеристик, что позволило получить аналитические выражения для определения приведенной суммарной мощности источников питания испытательной системы и коэффициента запаса этой мощности с учётом нормируемого максимально допустимого отклонения частоты вращения электромашин в номинальном режиме;

- метод аналитического определения весовых коэффициентов влияния на превышение температуры обмотки якоря электрических и магнитных потерь, использование которого позволяет оценить влияние режимов взаимного нагружения испытуемых тяговых электромашин на степень расхождения тепловых нагрузок обмоток их якорей;

- метод моделирования магнитных характеристик тяговых электрических двигателей, который позволяет определить коэффициенты аппроксимирующей зависимости удельной э. д. с. от тока возбуждения только по коэффициенту магнитного насыщения и типовым номинальным данным электромашин;

- понятие и метод определения энергетической эффективности системы взаимного нагружения тяговых электрических машин, отличающийся учётом в нем к. п. д. источников и преобразователей мощности, а также введенных понятий энергетической эффективности косвенных методов компенсации потерь.

Практическая значимость полученных результатов

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в диссертации, позволили:

- определить рациональные схемы систем взаимного нагружения, использование которых обеспечивает снижение себестоимости новых и материальные затраты на модернизацию существующих станций для испытания электрических машин тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта в полтора – два раза;

- определить рациональные режимы взаимного нагружения тяговых электрических машин, которые позволяют снизить расходы электроэнергии на проведение их испытаний на нагрев на 20 – 30% и сократить время испытаний на нагрев в три – четыре раза;

- разработать функциональные схемы систем автоматического управления стендами для испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока, которые выполнены по рациональным электромеханическим схемам;

- разработать метод определения параметров источников и преобразователей мощности системы взаимного нагружения, в котором учитываются как типовые данные испытуемых тяговых электромашин, так и допустимая степень расхождения их магнитных характеристик;
- предложить способ оценки качества приемо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин, в котором учитывается степень расхождения тепловых нагрузок обмоток пары испытуемых электромашин.

Личный вклад соискателя

Постановка проблемы диссертационного исследования выполнена совместно с научным консультантом. Теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых приведены в диссертации, проведены автором самостоятельно. Все опубликованные научные работы по теме диссертации написаны автором лично.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: 69-й Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, 2009 г.), III Международной научно-практической конференции «Электрификация транспорта “Трансэлектро – 2009”» (Мисхор, 2009 г.), IV Международной научно-практической конференции «Электрификация транспорта “Трансэлектро – 2010”» (Мисхор, 2010 г.), III Международной научно-практической конференции «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте» (Днепропетровск, 2010 г.), V Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортных систем у условиях реформирования железнодорожного транспорта: управления, экономики и технологии» (Киев, 2011 г.), Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании» (Днепропетровск, 2011 г.), II Международной научно-практической конференции «Энергосбережения на железнодорожном транспорте» (Ждениево, 2011 г.), V Международной научно-практической конференции «Электрификация транспорта “Трансэлектро – 2011”» (Днепропетровск, 2011 г.), VI Международной научно-практической конференции «Электрификация транспорта “Трансэлектро – 2012”» (Мисхор, 2012 г.).

Диссертация в полном объёме докладывалась на научном семинаре кафедры «Электроподвижной состав железных дорог» и межкафедральном научном семинаре Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

Результаты диссертационных исследований внедрены в учебный процесс Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна в курсе «Теория электропривода», приняты к рассмотрению на предмет их внедрения в локомотивном хозяйстве

«Укрзалізниця» и в ЧАО «Запорожский электровозоремонтный завод».

Публикации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 42 научных работах, среди которых: одна монография, 21 статья в специализированных научных журналах, две статьи в других научных изданиях; 10 тезисов докладов на научно-технических конференциях; 6 патентов; два заключительных отчета по НИР.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

1.1 Цель и особенности приёмо-сдаточных испытаний электрических машин тягового подвижного состава

К основным показателям, характеризующим техническое состояние тягового подвижного состава, относятся: процент неисправных единиц подвижного состава; количество происшествий, инцидентов и нарушений; количество неплановых ремонтов; простой на плановых видах ремонта; выполнение норм периодичности ремонтов.

Наибольшее количество случаев отказа тягового подвижного состава связано с отказами аппаратуры в силовых схемах, в том числе, тяговых двигателей и вспомогательных электромашин. Транспортные происшествия, возникающие с электроподвижным составом в гарантийный период эксплуатации, на некоторых железных дорогах Украины составляют 30% общего количества транспортных происшествий. Среднее значение этого показателя по всей сети железных дорог составляет 6-9%.

Значительная часть транспортных происшествий возникает из-за некачественного ремонта тягового подвижного состава. Ежегодно по Украине фиксируется свыше двух тысяч случаев захода на неплановый ремонт магистральных грузовых и пассажирских электровозов. Свыше 20 % случаев захода электровозов на неплановый ремонт связано с отказами тяговых двигателей и свыше 10 % случаев – с отказами вспомогательных электромашин. На некоторых железных дорогах Украины доля отказов тяговых двигателей, явившихся причиной непланового ремонта электровозов, достигает 40 %, а доля отказов вспомогательных электромашин – 80 %. Ежегодно неплановый ремонт по причине отказа тяговых двигателей проходят около пятисот электровозов, а по причине отказа вспомогательных машин – более двухсот.

Свыше 50 % всех отказов тяговых электромашин связано с пробоем изоляции и межвитковыми замыканиями обмоток якорей. Около 25 % случаев отказов приходится на пробой изоляции и межвитковые замыкания обмоток главных и добавочных полюсов, а также компенсационных обмоток. Приблизительно 15 % всех отказов тяговых электромашин вызвано повреждением выводных кабелей и до 10 % – повреждением якорных подшипников.

На отказы тяговых электромашин по причине ухудшения свойств изоляции обмоток приходится 75 % всех отказов, часть из которых связана с неудовлетворительными условиями эксплуатации тягового подвижного состава, а часть – с некачественным ремонтом. Эксплуатация тяговых электромашин с некачественно выполненным ремонтом обусловлена, прежде

всего, низким качеством послеремонтных приёмо-сдаточных испытаний, целью которых и является определение качества ремонта.

Ежегодно украинскими предприятиями по ремонту электроподвижного состава проводится плановый ремонт не менее четырёхсот единиц магистральных электровозов постоянного и переменного тока в объёмах, предусматривающих послеремонтные испытания тяговых электрических двигателей и вспомогательных машин (КР-1, КР-2, КРП, ТР-3). Всего ежегодно требуется проведение послеремонтных испытаний не менее трёх тысяч тяговых электрических двигателей электровозов постоянного и переменного тока и не менее тысячи электродвигателей - приводов компрессоров и вентиляторов электровозов постоянного тока.

Приемо-сдаточные испытания являются неотъемлемой частью технологического процесса изготовления или ремонта тяговых электрических машин и проводятся отделом технического контроля предприятия по производству или ремонту тягового подвижного состава (электрических машин) с целью определения качества их производства или ремонта.

Регламент проведения приёмо-сдаточных испытаний тяговых электромашин определяется межгосударственным стандартом ГОСТ 2582-81 [1] и правилами ремонта тяговых электрических машин [2]. Этими же документами определяются допустимые значения отклонений параметров и характеристик испытываемой тяговой электрической машины от типовых значений и характеристик, а также – методы проведения испытаний и проверок.

В соответствии с [1, 2] процесс приёмо-сдаточных испытаний включает в себя такие мероприятия как:

- измерение сопротивления обмоток в практически холодном состоянии;
- испытание на нагревание;
- проверка частоты вращения и реверсирования;
- испытание на повышенную частоту вращения;
- проверка коммутации;
- испытание электрической прочности изоляции обмоток (межвитковой, относительно корпуса, между собой);
- проверка биения коллектора;
- измерение сопротивления изоляции обмоток (относительно корпуса, между собой);
- проверка уровня вибрации.

Испытания на нагрев, проверка частоты вращения и реверсирования, а также проверка коммутации требуют обязательного нагружения тяговых электромашин. Характеристики схем и режимов испытания должны соответствовать характеристикам подвижного состава, на котором эксплуатируются тяговые электромашин.

В соответствии с ГОСТ 2582-81 [1] испытания тяговых электродвигателей пульсирующего тока по согласованию с заказчиком могут

проводиться на постоянном токе. Как правило, все приёмо-сдаточные испытания тяговых электродвигателей пульсирующего тока проводятся на постоянном токе.

Испытания на нагрев тяговых двигателей проводят в часовом режиме нагрузки, при этом правила ремонта тяговых электромашин [2] допускают (по согласованию с заказчиком) проводить испытания на нагрев в других эквивалентных режимах, в том числе и без вентиляции испытуемых тяговых электромашин. При проведении испытания на нагрев методом взаимной нагрузки режимы и результаты испытания считаются действительными для обеих электромашин, и для работающей в режиме двигателя, и для работающей в режиме генератора [1]. При этом известно, что тепловые нагрузки обмоток их якорей при использовании схемы взаимной нагрузки с вольтодобавочной машиной и линейным генератором различаются.

Как правило, на практике испытания тяговых электрических двигателей проводят методом взаимной нагрузки, а испытания вспомогательных электромашин – методом непосредственной нагрузки. Последнее является существенным недостатком, снижающим энергетическую эффективность всего процесса испытания и повышающим его себестоимость.

1.2 Аналитический обзор работ в области разработки систем нагружения электрических машин постоянного тока

К фундаментальным работам в области испытаний электрических машин под нагрузкой относятся работы Г. В. Нюрнберга, Г. К. Жерве, Н. В. Астахова, Я. Башты, Ф. Кулда [3-6].

Отдельные вопросы испытаний электрических машин освещены в работах Г. Н. Петрова, М. П. Костенко, Л. И. Пиотровского, Г. Вудсона, Б. Адкинса [7-12] и других ученых, известных своими трудами в области теории электрических машин.

Среди относительно недавних публикаций в области испытаний электромашин различных типов можно отметить работы таких учёных, как Н. Ф. Котеленец, М. Л. Коварский, О. Д. Гольдберг и другие [13-18].

Вопросам испытания тяговых электрических машин уделено внимание в научных работах и учебной литературе таких ученых как И. П. Исаев, Д. Д. Захарченко, Л. Г. Козлов. Из современных исследований в этой области следует отметить работы О. Н. Синчука, А. Б. Бабанина, Л. В. Дубинца, А. П. Черного, П. А. Лозы, Д. Л. Сушко, В. В. Артеменко, И. И. Тальи и других ученых [19-43]. Принципы динамического нагружения электрических машин постоянного и переменного тока детально изложены в многочисленных научных трудах Д. И. Родькина [44-53].

В настоящее время известен целый ряд изобретений и полезных моделей систем испытания под нагрузкой электрических машин различных типов, в том числе и электромашин постоянного тока [54-63].

Анализ данных работ показывает, что существует три основных способа нагружения испытуемых электромашин:

- непосредственная нагрузка;
- взаимная нагрузка;
- динамическое нагружение.

Системы непосредственной нагрузки представляют собой нагрузочные устройства в виде:

- механического тормоза;
- генератора и нагрузочного резистора;
- генератора и устройства рекуперации энергии в сеть.

Существенным недостатком всех трёх видов непосредственного нагружения является необходимость наличия источника для питания испытуемого двигателя мощностью, равной типовой мощности электромашин [4].

Определяющим недостатком двух первых способов непосредственного нагружения, делающим их применение неприемлемым для электрических машин большой мощности, является их низкая энергетическая эффективность. Использование нагрузочного генератора и устройства рекуперации энергии в сеть требует наличия не только источника, но и ведомого трехфазного инвертора имеющего мощность, равную мощности испытуемой электромашин.

Высокую энергетическую эффективность при относительно невысокой суммарной мощности источников питания обеспечивают системы взаимного нагружения, в которых происходит энергообмен между испытуемыми электромашин. Источники внешнего питания в таких системах нагружения требуются только для компенсации потерь мощности в испытуемых электромашин [4].

Наиболее известными схемами взаимного нагружения общепромышленных электромашин постоянного тока с применением независимого питания их обмоток возбуждения являются схемы Blondеля, Гопкинсона, Потье, Хетчинсона и Каппа [4]. На практике для испытания тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока данные схемы не применяются из-за необходимости независимого питания обмоток возбуждения испытуемых электромашин от дополнительных источников, а также из-за относительной сложности «ручного» регулирования режимом взаимного нагружения.

Принцип взаимного нагружения электромашин по схемам Blondеля и Хетчинсона реализованы в наиболее известных схемах взаимной нагрузки тяговых электромашин: с приводным двигателем и вольтодобавочной машиной, а также с вольтодобавочной машиной и линейным генератором.

Глубоких научных исследований, направленных на изучение возможностей использования принципов взаимного нагружения по схемам Потье, Гопкинсона и Каппа для испытания тяговых электромашин, до настоящего времени не проводились. Тем не менее, сами принципы создания условий взаимной нагрузки электромашин, реализованные в данных схемах, описываются применительно к тяговым электромашин последовательного возбуждения, как возможные варианты и для этого типа электромашин [19].

Существенным преимуществом таких вариантов системы взаимного нагружения является наличие только одного основного источника мощности, либо электрической, либо механической. Использование современных достижений в области автоматизации электропривода позволяет решить проблему регулирования режимом нагружения для упомянутых трёх принципов и устраняет один из их недостатков, заключающийся в сложности ручного управления системами нагружения.

Несмотря на достаточно большой интерес к вопросам модернизации существующих и создания новых станций для испытания тяговых электро машин, мало внимания в проводимых в этом направлении исследованиях уделяется проблеме выбора рациональных схем взаимного нагружения. Как вариант такой схемы рассматривается, в основном, только схема с вольтодобавочной машиной и линейным генератором [32-38].

Проблема модернизации станций для испытания тяговых электро машин в проводимых исследованиях формулируется, в основном, как поиск возможностей замены электро машинных преобразователей (вольтодобавочной машины и линейного генератора) на статические полупроводниковые преобразователи. Задача поиска новых схемных решений системы взаимного нагружения тяговых электрических машин для проведения их приёмо-сдаточных испытаний, как правило, не рассматривается.

При всём многообразии известных схемных решений, сложность определения полного ряда возможных вариантов системы взаимного нагружения тяговых электро машин определяется отсутствием представления об общих электро механических принципах обеспечения взаимного нагружения электрических машин постоянного тока.

Требует отдельного рассмотрения вопрос влияния расхождения магнитных характеристик испытуемых электро машин на суммарную мощность источников питания стенда взаимного нагружения и расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей электро машин при испытании на нагрев.

Известны работы, посвящённые определению эквивалентных режимов испытаний тяговых электро машин без вентиляции [33, 34, 38]. Во многих работах, посвящённых выбору рациональных режимов испытаний электро машин на нагрев, в качестве критерия выбора рассматривается только минимум расхода электро энергии на испытания и не учитывается качество испытаний.

1.3 Системы взаимного нагружения электрических машин постоянного тока общепромышленного назначения

Для электро машин постоянного тока общепромышленного назначения наиболее известными являются пять способов взаимного нагружения: Blondеля, Гопкинсона, Потье, Хетчинсона и Каппа [4]. Рассмотрим каждый из них отдельно.

Схема Blondеля. Принципиальная схема взаимного нагружения электрических машин по принципу Blondеля приведена на рис. 1.1. Валы

испытываемых двигателя M и генератора G механически соединены между собой и с валом дополнительного двигателя. Обмотки якорей испытываемых электромашин включены в замкнутый контур последовательно с источником напряжения И1. Их обмотки возбуждения подключены независимо к источникам И2, И3.

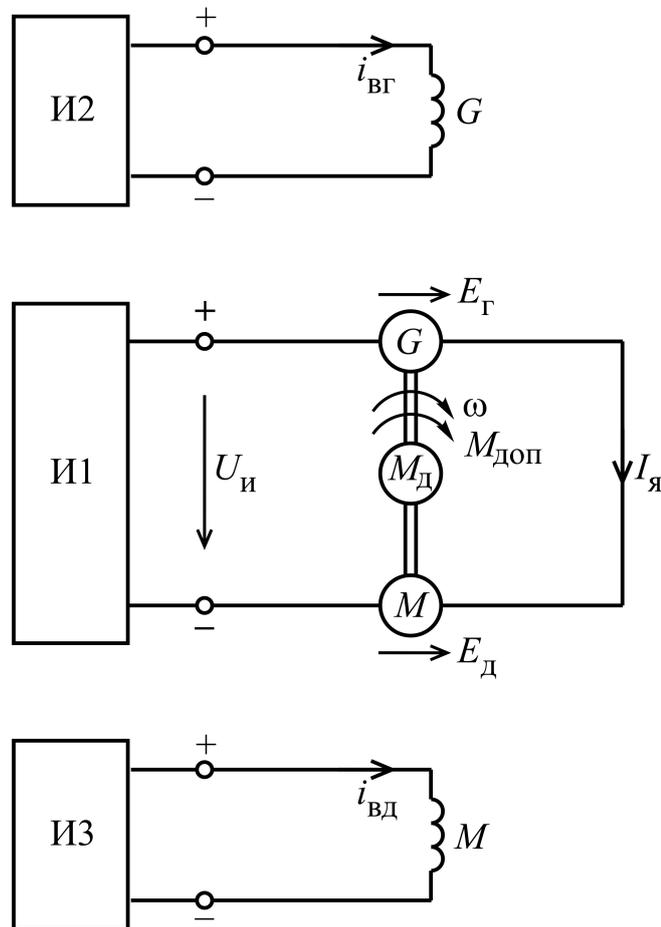


Рисунок 1.1- Схема Blondel

Режим взаимного нагружения электромашин описывается системой уравнений:

$$(1.1)$$

где $\Sigma U_{\text{я}}$ – суммарное падение напряжений в электрическом контуре якорей;
 $U_{\text{И1}}$ – напряжение источника И1;
 $E_{\text{Г}}$, $E_{\text{Д}}$ – э. д. с. якорей испытываемых генератора и двигателя соответственно;
 $\Sigma M_{\text{в}}$ – суммарные потери моментов на валах генератора и двигателя;

– момент на валу дополнительного двигателя;
 , – электромагнитные моменты двигателя и генератора соответственно.

Токи возбуждения испытуемых электромашин и могут регулироваться независимо. Возможно такое регулирование, при котором э. д. с. двигателя и генератора будут равными. При этом система (1.1) принимает вид:

Источник И1 компенсирует электрические потери в цепи якорей, а двигатель потери холостого хода в испытуемых электромашинах. Ток нагрузки при испытании регулируется напряжением источника И1.

где – напряжение источника И1;

– суммарное сопротивление цепи якорей двигателя и генератора.

Напряжение на испытуемых электромашинах регулируется изменением скорости вращения и токов возбуждения , .
 Напряжение испытуемого двигателя

где – сопротивление якорной цепи двигателя.

Схема Гопкинсона. Принципиальная схема взаимного нагружения электрических машин по методу Гопкинсона приведена на рис. 1.2. Валы испытуемого двигателя M и генератора G механически соединены с валом дополнительного двигателя . Обмотки якорей испытуемых электромашин включены в замкнутую электрическую цепь. Их обмотки возбуждения подключены независимо к источникам И1 и И2.

Режим взаимного нагружения электромашин описывается системой уравнений:

Токи возбуждения однотипных испытуемых электромашин регулируются с соблюдением условия

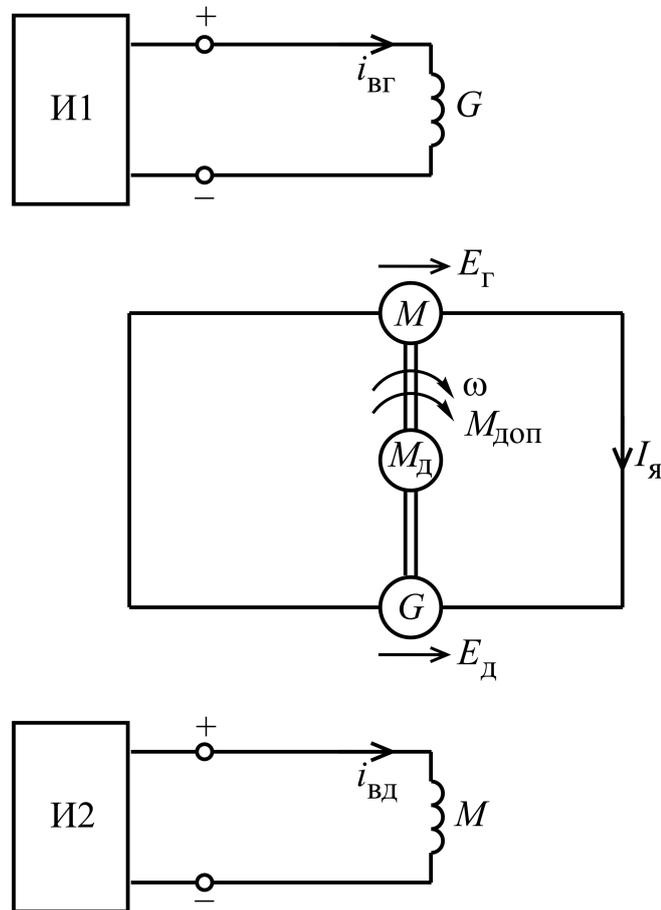


Рисунок 1.2 – Схема Гопкинсона

Все потери в стенде взаимной нагрузки, кроме потерь в обмотках возбуждения, компенсируются дополнительным двигателем .

Ток нагрузки при испытании определяется отношением

и регулируется изменением токов возбуждения и .

Напряжение на испытуемом двигателе регулируется изменением скорости вращения и тока возбуждения , и определяется выражением

Схема Потье. Принципиальная схема взаимного нагружения электрических машин по принципу Потье приведена на рис. 1.3. Валы испытуемых двигателя M и генератора G соединены механически. Обмотки якорей включены в замкнутый контур последовательно с источником напряжения И1. Их обмотки возбуждения подключены независимо к источникам И2 и И3.

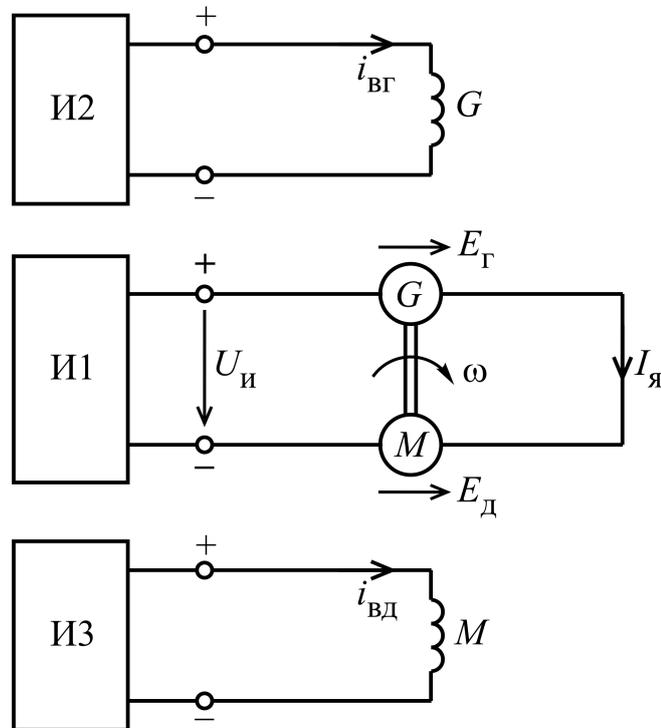


Рисунок 1.3 – Схема Потье

Режим взаимного нагружения описывается системой уравнений:

Токи возбуждения однотипных испытуемых электромашин регулируются с соблюдением условия

Все потери в стенде взаимной нагрузки, кроме потерь в обмотках возбуждения, компенсируются источником И1.

Ток нагрузки при испытании определяется выражением

и регулируется напряжением и токами возбуждения , .

Напряжение на испытуемом двигателе определяется выражением

и регулируется теми же параметрами, что и ток .

Схема Хетчинсона. Принципиальная схема взаимного нагружения по принципу Хетчинсона приведена на рис. 1.4. Валы якорей испытуемых двигателя M и генератора G механически соединены между собой.

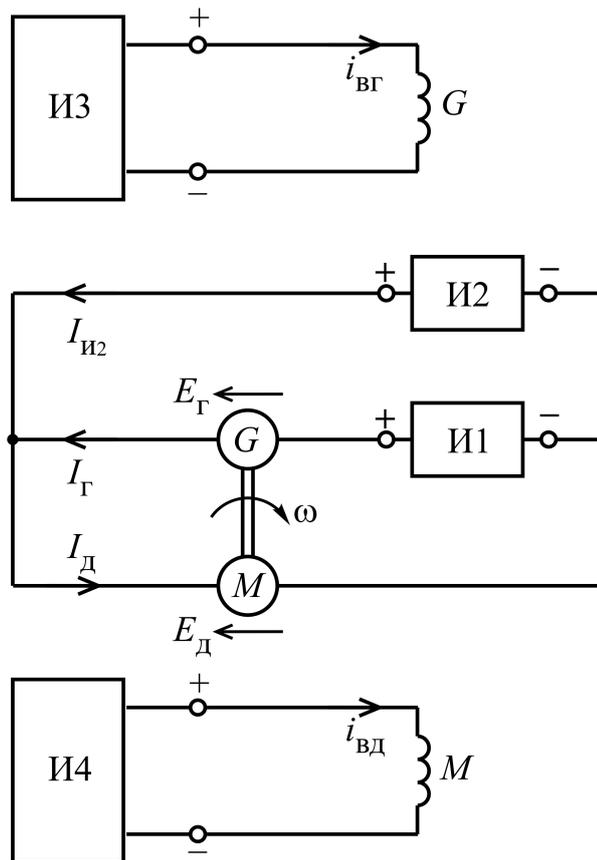


Рисунок 1.4 – Схема Хетчинсона

Обмотки якорей включены в замкнутый электрический контур с источником напряжения И1. Параллельно якорной обмотке двигателя M включен источник напряжения И2. Обмотки возбуждения двигателя и генератора подключены независимо к источникам И3 и И4.

Режим взаимного нагружения электромашин описывается системой уравнений:

При таком регулировании токов возбуждения и , которое обеспечивает равенство , система принимает вид:

где U_1 – напряжение источника И1.

Параллельное подключение источника И2 в данной схеме обеспечивает стабилизацию напряжения на якоре испытуемого двигателя M

,

где U_2 – напряжение источника И2.

Ток источника И2 обеспечивает компенсацию потерь .

Ток якоря двигателя больше тока якоря генератора на величину

.

При равенстве э. д. с. электромашин имеем

.

Магнитные и механические потери в стенде при условии компенсируются источником И2. Большая часть электрических потерь в якорных цепях компенсируется источником И1. Электрические потери, обусловленные протеканием тока , компенсируются источником И2. Ток нагрузки при испытаниях регулируется напряжением источника И1.

Схема Каппа. Принципиальная схема взаимного нагружения электрических машин по методу Каппа приведена на рис. 1.5. Валы испытуемых двигателя M и генератора G соединены механически. Обмотки якорей включены в замкнутый электрический контур. Параллельно якорной обмотке двигателя M включен источник напряжения И1. Обмотки возбуждения двигателя и генератора подключены независимо к источникам И3, И4.

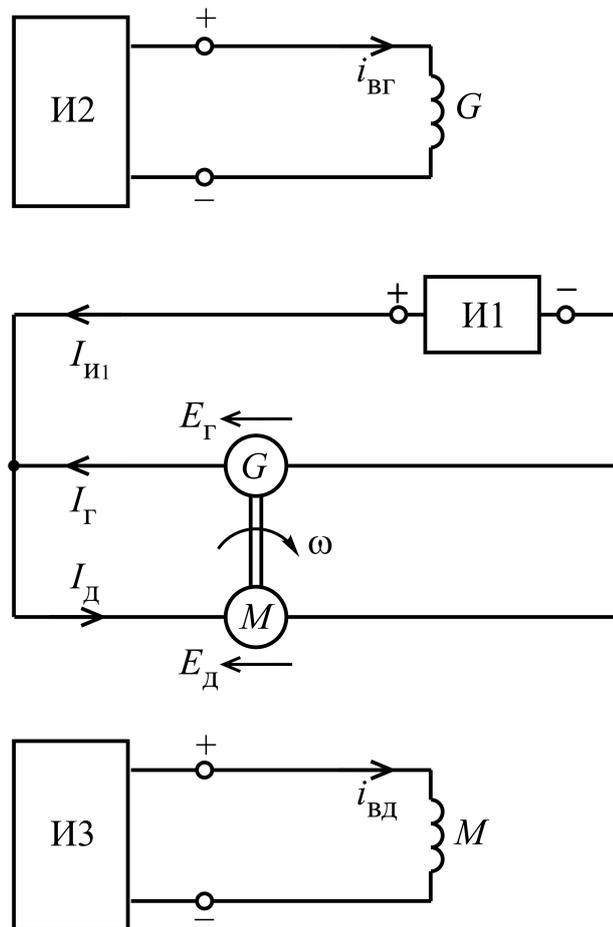


Рисунок 1.5 – Схема Каппа

Режим взаимного нагружения электромашин описывается системой уравнений:

Токи возбуждения однотипных испытуемых электромашин регулируются с соблюдением условия

Ток источника И1 обеспечивает компенсацию потерь
 Ток якоря двигателя больше тока якоря генератора на величину

Причём значение тока таково, что при условии соблюдается неравенство

которое обеспечивает вращение якорей испытуемых электромашин.

Все потери в стенде, кроме потерь в обмотках возбуждения, компенсируются одним источником И1.

Ток нагрузки регулируется путём изменения токов возбуждения и напряжения источника И1.

Схемы Блонделя и Потье относятся к вариантам с последовательным включением источника питания, схема Каппа – с параллельным включением. В схеме Хетчинсона используется последовательно-параллельное включение источников. Схемы Гопкинсона и Блонделя относятся к вариантам с механическим способом компенсации потерь.

Преимуществом схем с параллельным и последовательно-параллельным включением источников является автоматическая стабилизация испытательного напряжения на двигателе и простота его независимого регулирования.

Преимуществом схем с последовательным и последовательно-параллельным включением источников питания является относительная простота стабилизации и регулирования тока нагрузки.

К преимуществам схем с механическим способом компенсации потерь можно отнести относительную простоту регулирования и стабилизации частоты вращения якорей испытуемых электромашин.

Строго говоря, для проведения приёмо-сдаточных испытаний электрических машин постоянного тока не требуется стабилизации частоты вращения. Тем не менее, внешнее задание значения частоты вращения якорей электромашин обеспечивает механическую устойчивость системы взаимного нагружения.

Основным недостатком всех рассмотренных выше схем является независимое возбуждение испытуемых электромашин. При взаимном нагружении тяговых электрических машин последовательного возбуждения этот недостаток становится весьма существенным. Для независимого питания таких обмоток возбуждения требуются источники низкого напряжения и большого тока. Как известно, такие системы электропитания имеют низкие показатели энергетической эффективности.

Сам факт наличия большого количества источников питания (трёх-четырёх) в стенде является недостатком. Недостатком самих принципов взаимной нагрузки Гопкинсона и Потье является зависимость напряжения и тока нагрузки испытуемых электромашин от одних и тех же управляющих параметров. Этот фактор приводит к существенному затруднению регулирования напряжения и тока. Независимое разомкнутое регулирование этих параметров в упомянутых схемах невозможно. Необходимо отметить, что рассмотренный недостаток может быть устранен путем использования системы автоматического управления с обратными связями по току и

напряжению. Анализ алгоритмов управления такими системами является предметом отдельного исследования.

При всех способах взаимного нагружения, кроме способа Блонделя, наблюдается расхождение электромагнитных мощностей испытуемых электромашин и тепловых нагрузок их обмоток.

Отметим, что перечисленные достоинства и недостатки рассмотренных вариантов относятся не столько к самим схемным решениям, сколько к принципам обеспечения условий взаимного нагружения.

1.4 Системы взаимного нагружения электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава

Наибольшее распространение на испытательных станциях предприятий по производству и ремонту тягового подвижного состава получила схема с последовательно-параллельным включением источников питания [19]. В данной системе используется тот же принцип, что и в схеме Хетчинсона [4]. При этом обмотки возбуждения испытуемых электрических машин включаются последовательно с якорем той машины, которая работает в режиме двигателя. Такая схема приведена на рис. 1.6. Источник питания, включаемый последовательно, в такой схеме обычно называют вольтдобавкой или вольтдобавочной машиной (ВДМ), а источник, включенный параллельно, – линейным генератором (ЛГ). Необходимость включения обмотки возбуждения испытуемого генератора в цепь якоря испытуемого двигателя продиктована условиями устойчивости схемы.

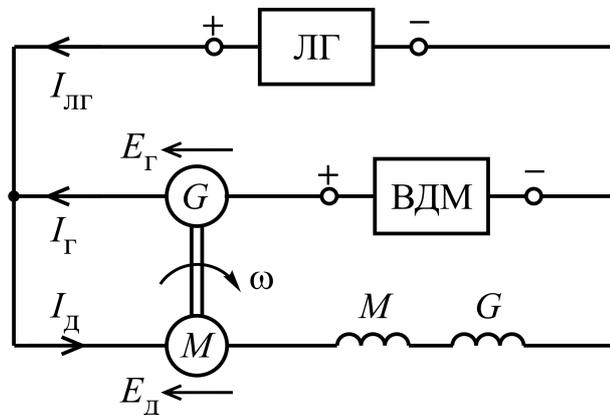


Рисунок 1.6 – Схема с вольтдобавочной машиной и линейным генератором

Ток , который является разницей токов якорей двигателя и генератора , определяется потерями холостого хода в испытуемых электромашинах, испытательным напряжением, током нагрузки и расхождением магнитных характеристик [19]

где P_{Σ} – суммарная мощность потерь холостого хода.
 При совпадении магнитных характеристик испытуемых
 электромашин I_{Σ} и ток I_{Σ} определяется по формуле

В этом случае все потери холостого хода компенсируются линейным генератором.

Работа схемы в статическом режиме может быть описана уравнениями баланса напряжений и моментов:

где U_{Σ} – напряжение ВДМ.

Ток I_{Σ} определяет нагрузку испытуемых электромашин и регулируется напряжением ВДМ. При совпадении магнитных характеристик испытуемых электромашин электрические потери, вызванные протеканием тока I_{Σ} , компенсируются вольтодобавочной машиной, а потери холостого хода и часть электрических потерь, вызванных протеканием тока I_{Σ} , компенсируются линейным генератором.

При расхождении магнитных характеристик испытуемых электромашин часть потерь холостого хода может компенсироваться ВДМ, так же как часть электрических потерь может компенсироваться ЛГ.

К преимуществам рассматриваемой схемы следует отнести, прежде всего, простоту регулирования напряжения и токовой нагрузки испытуемых электромашин. Схема допускает раздельное разомкнутое регулирование этих параметров без применения систем автоматического управления.

К недостаткам схемы относятся необходимость в высоковольтном регуляторе напряжения и завышенная суммарная мощность источников питания, вызванная возможным перераспределением их энергетических потоков при расхождении магнитных характеристик испытуемых электромашин.

Второй по распространенности на испытательных станциях тяговых электромашин является схема с механическим способом компенсации потерь холостого хода и последовательным включением источника электрической мощности [19]. Такая схема приведена на рис. 1.7. В данной системе используется тот же принцип взаимного нагружения, что и в схеме Blondеля [4]. При этом обмотки возбуждения включены последовательно с обмотками якорей испытуемых электромашин и источником напряжения (ВДМ) в замкнутый электрический контур.

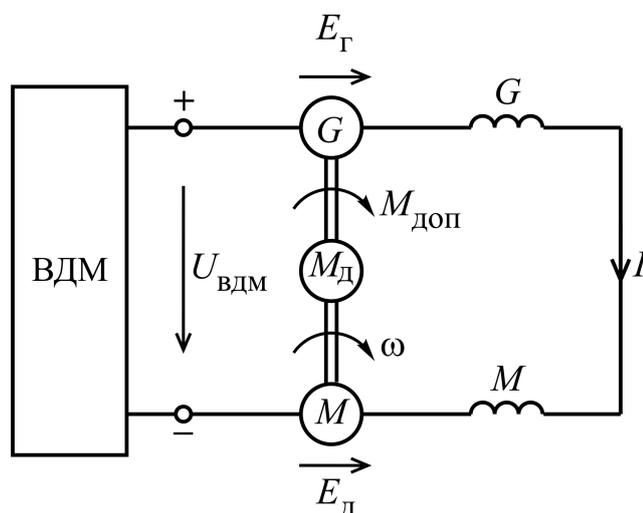


Рисунок 1.7 - Схема с механическим способом компенсации потерь холостого хода

Взаимное нагружение в статическом режиме описывается уравнениями баланса напряжений и моментов:

Ток определяет нагрузку испытуемых электромашин и регулируется напряжением ВДМ. Все электрические потери компенсируются вольтдобавкой, а потери холостого хода – дополнительным двигателем .

При расхождении магнитных характеристик испытуемых электромашин часть потерь холостого хода может компенсироваться ВДМ, так же как часть электрических потерь может компенсироваться дополнительным двигателем .

К преимуществам рассматриваемой схемы следует отнести отсутствие высоковольтного регулятора напряжения и относительную простоту регулирования тока нагрузки и частоты вращения якорей электромашин.

К недостаткам данной схемы относятся:

- невозможность раздельного разомкнутого регулирования тока и напряжения на испытуемых электромашинах;
- завышенная суммарная мощность источников, вызванная возможным перераспределением их энергетических потоков при расхождении магнитных характеристик испытуемых электромашин;
- наличие двух точек механического соединения валов электромашин;
- необходимость в высокой механической прочности и двусторонности вала дополнительного двигателя при испытании тяговых электродвигателей подвижного состава с односторонней тяговой передачей.

1.5 Общий характер энергообменных процессов при взаимной нагрузке электрических машин постоянного тока

Одной из задач в решении проблемы выбора рациональных вариантов схем взаимной нагрузки является анализ характера распределения энергетических потоков, обеспечивающих нормальное функционирование испытательного стенда. Проведение такого анализа принципиально возможно для любой испытательной системы, даже той, структура которой точно не определена, благодаря определенности характера энергообменных процессов в системах взаимной нагрузки электромашин [4].

С энергетической точки зрения принцип взаимной нагрузки заключается в том, что электрическая энергия электромашин, работающей в режиме генератора, используется для питания другой электромашин, работающей в режиме двигателя и являющейся приводной для генератора, а все потери, возникающие при преобразовании мощности, компенсируются внешними источниками энергии (сетью).

Здесь необходимо отметить, что этот принцип является общим для всех схем взаимной нагрузки только с энергетической точки зрения, но никак не определяет конкретную структуру испытательного стенда, которая зависит от принятых способов обеспечения условий протекания тока в обмотках испытуемых электромашин и вращения их роторов. Это – вопрос, требующий отдельного подробного анализа.

На рис. 1.8 приведена схема энергетических потоков, общая для всех возможных вариантов схем взаимной нагрузки.

Согласно данной схеме испытательный стенд включает в себя якорь электромашин – двигателя ЯД, якорь электромашин – генератора ЯГ, преобразователь механической мощности ПМ, преобразователь электрической мощности ПЭ, регулятор (источник) электрической мощности РЭ, регулятор (источник) механической мощности РМ, обмотку возбуждения двигателя ОВД, обмотку возбуждения генератора ОВГ, регуляторы возбуждения двигателя и генератора РВД, РВГ соответственно. Все регуляторы подключены к внешней сети С.

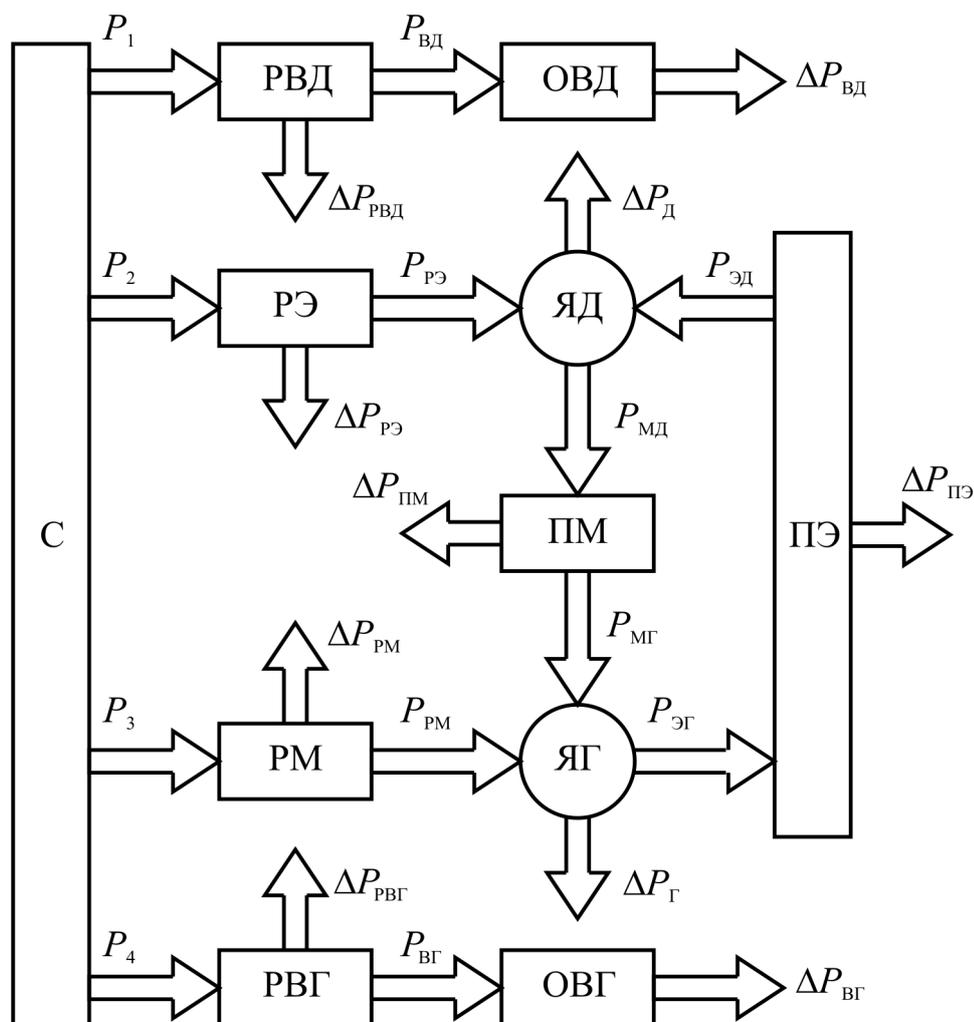


Рисунок 1.8 – Схема энергетических потоков в системе взаимной нагрузки

В данной энергетической схеме предусмотрены все возможные варианты создания энергетических условий взаимного нагружения электромашин постоянного тока. В любом конкретном стенде могут отсутствовать многие из показанных преобразователей и регуляторов.

Механическая мощность (рис. 1.8) на валу якоря двигателя ЯД преобразуется с помощью преобразователя ПМ в механическую мощность на валу якоря генератора ЯГ. В генераторе механическая мощность преобразуется в электрическую и через преобразователь ПЭ в виде электрической мощности возвращается якорю двигателя ЯД. В двигателе электрическая мощность преобразуется в механическую.

В данном замкнутом цикле преобразования энергии неизбежны потери мощности: в якорной цепи двигателя – , в якорной цепи генератора – , в преобразователях механической и электрической мощностей – , соответственно. Основным условием работы такой системы является полная компенсация всех потерь мощности в замкнутом

цикле преобразования внешними источниками энергии (сетью). Такая компенсация возможна путём передачи мощности из сети в замкнутую энергетическую систему двумя принципиально отличными способами.

К первому способу относится передача мощности от сети к двигателю ЯД через регулятор (источник) электрической мощности РЭ. При этом к двигателю ЯД подводится дополнительная электрическая мощность .

Ко второму способу относится передача мощности от сети к генератору ЯГ через регулятор (источник) механической мощности РМ. При этом к генератору подводится дополнительная механическая мощность .

В принципе возможно как отдельное использование каждого из описанных способов компенсации потерь (электрического, механического), так и одновременное их использование. Наибольшее распространение, как было отмечено выше, получил метод компенсации потерь в стенде с использованием двух преобразователей электрической мощности (вольтодобавочной машины и линейного генератора), а также одновременное использование преобразователей механической и электрической мощностей (приводного дополнительного двигателя и вольтодобавочной машины).

Передача мощностей двигателю и генератору от сети через регуляторы РЭ и РМ связана с неизбежными потерями в них и соответственно, которые также компенсируются сетью.

Нормальный процесс последовательного преобразования мощности в системе невозможен без возбуждения двигателя и генератора [4, 19].

Согласно схеме на рис. 1.8 для возбуждения машин необходимы мощности и , которые передаются от сети через регуляторы возбуждения РВД и РВГ. В данных регуляторах также неизбежны потери мощности и , которые компенсируются сетью. Мощности и в системах возбуждения двигателя и генератора полностью преобразуются в потери и .

Процессы преобразования энергии (мощности) в замкнутом контуре, включающем испытуемые машины, преобразователи и регуляторы, могут быть описаны в виде следующих уравнений баланса:

;

;

;

.

Необходимое условие работы системы взаимной нагрузки с энергетической точки зрения может быть формализовано в виде:

где P_{Σ} – суммарная мощность на выходах регуляторов РЭ и РМ;
 $P_{\Sigma 1}$ – суммарные потери мощности в якорных цепях испытуемых двигателя и генератора;
 $P_{\Sigma 2}$ – суммарные потери мощности в преобразователях ПЭ и ПМ.
 Для установившегося режима справедливы выражения:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$$

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$$

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$$

К неустановившимся (переходным) режимам работы системы взаимной нагрузки относятся режимы, отвечающие условиям:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$$

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$$

При этих условиях возникает небалансная мощность

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$$

Эта небалансная мощность при переходных режимах уравнивается изменением общей собственной энергии всех устройств, входящих в основной контур системы

$$(1.2)$$

Под общей собственной энергией системы будем понимать сумму кинетической и электромагнитной энергий испытуемых

электромашин и преобразователей ПМ и ПЭ

$$\dots \quad (1.3)$$

$$\dots \quad (1.4)$$

где J – эквивалентный момент инерции J -того вращающегося элемента механической части основного контура;

ω – угловая скорость ω -того вращающегося элемента механической части основного контура.

$$\dots \quad (1.5)$$

где L – индуктивность L -того элемента электрической цепи основного контура;

I – сила тока I -того элемента электрической цепи основного контура.

Объединив (1.2)-(1.5), получим уравнение динамического равновесия системы в виде баланса мощностей

$$\dots \quad (1.6)$$

Несмотря на то, что кинетическая энергия вращающихся на стенде испытуемых электрических машин на несколько порядков больше электромагнитной энергии, накопленной в индуктивных элементах схемы, мгновенные значения мощностей, соответствующие изменениям этих энергий во времени, могут быть соизмеримы. Соотношение этих мощностей будет определяться, в том числе, и характером взаимосвязи между угловой скоростью вращения якорей испытуемых электромашин и силами токов в их обмотках. Необходимо отметить, что здесь имеются в виду не сами электромеханические характеристики испытуемых машин, а причинно-следственные связи упомянутых параметров. Эти связи между угловой скоростью и токами обмоток электромашин будут определяться выбранным вариантом схемы взаимной нагрузки. Анализ характера этих связей для различных вариантов схемы взаимной нагрузки очень важен для определения пределов устойчивости всей системы и выбора метода автоматического регулирования ею, а потому является предметом отдельного подробного исследования.

Возвращаясь к анализу энергетических соотношений в схеме взаимной нагрузки, заметим, что регуляторы электрической и механической мощностей РЭ и РМ должны быть рассчитаны с учётом составляющих небалансной мощности , входящих в неё в соответствии с уравнением (1.6). В противном случае, они будут перегружены в течение времени переходных процессов в механической и электрической частях стенда.

Окончание же указанных переходных процессов будет соответствовать новому состоянию статического равновесия в соответствии с условием

Это равновесие может наступить только в том случае, если увеличение подведенной к схеме взаимной нагрузки мощности приводит к росту потерь и , которые она компенсирует, и наоборот. Это является энергетическим критерием устойчивости работы любого варианта системы взаимной нагрузки. Причем, если в системе разные виды потерь компенсируются различными регуляторами (источниками) мощности, то это условие должно соблюдаться для каждого отдельного вида потерь и регулятора (источника), который этот вид потерь компенсирует.

Этот принцип в первую очередь должен учитываться при выборе приоритетов в алгоритмах автоматического управления системами взаимной нагрузки [65], которые имеют узкий диапазон электромеханической устойчивости или вообще неустойчивы. Здесь важно отметить, что использование автоматического управления системой взаимного нагружения позволяет при оптимизации её структуры рассматривать даже те варианты, которые при ручном управлении неустойчивы.

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 1.8, с точки зрения обеспечения возможности испытания по методу взаимной нагрузки электрических машин различных типов. При испытании разнотипных машин даже одинаковой мощности, но отличающихся по номинальным значениям частоты вращения и напряжения (тока), наличие преобразователей ПМ и ПЭ является необходимым условием работы схемы.

В случае испытания по методу взаимной нагрузки двух машин, различающихся по номинальной мощности, в схеме необходимы дополнительные устройства отбора избыточной мощности. Исключением являются испытания, при которых электрическая машина большей номинальной мощности нагружается до номинальной мощности менее мощной машины.

С энергетической точки зрения возможно корректное проведение испытаний более двух электрических машин в случае соблюдения условия

где P_{Σ} – суммарная номинальная мощность электромашин, работающих в режиме двигателя;

$P_{\Sigma}^{\text{ген}}$ – суммарная номинальная мощность электромашин, работающих в режиме генератора.

При проведении таких испытаний номинальные значения частот вращения, напряжений и токов испытуемых электрических машин должны быть обеспечены соответствующим функционированием преобразователей механической и электрической мощности.

Энергоёмкость испытаний электромашин может быть оценена длительностью испытаний и суммарной мощностью, потребляемой из сети

где $P_{\Sigma}^{\text{рег}}$ – суммарная мощность потерь в регуляторах;

$P_{\Sigma}^{\text{возб}}$ – суммарная мощность потерь в системах возбуждения испытуемых машин.

Необходимо отметить, что сумма $P_{\Sigma}^{\text{пот}}$ это те потери, которые не зависят, или, по крайней мере, не должны зависеть ни от структуры испытательного стенда, ни от характеристик источников, регуляторов, преобразователей или других устройств, входящих в стенд. Более того, условия проведения испытаний должны обеспечивать полное соответствие характера потерь мощности в электромашинах при испытаниях реальным условиям эксплуатации.

Суммарные потери мощности в преобразователях и регуляторах $P_{\Sigma}^{\text{пот}}$ являются потерями, связанными с обеспечением испытаний, и должны быть минимизированы путем оптимизации структуры системы взаимной нагрузки и выбора рациональных схемных решений преобразователей и регуляторов мощности.

Оставив открытым вопрос об определении всех критериев оптимизации структуры схемы для испытания тяговых электрических машин, отметим, что минимизация себестоимости испытательного стенда и потерь

$P_{\Sigma}^{\text{пот}}$, связанных с обеспечением испытаний, является основным направлением в решении общей задачи оптимизации.

Судя по схеме на рис. 1.8, такая минимизация может быть достигнута за счёт уменьшения числа последовательных преобразований энергии во вспомогательных устройствах или отказа от таких преобразований.

Наиболее рациональным, по-видимому, будет решение компенсации всех потерь одним источником энергии [4, 19]. Это может быть источник как электрической, так и механической мощности [66, 67].

Очевидным является рациональность включения обмоток возбуждения испытуемых электрических машин последовательного возбуждения, какими являются тяговые электромашинны, последовательно с их якорными цепями [19]. При этом регуляторы возбуждения [68], если в них возникает необходимость, не должны представлять собой источники энергии. То есть, необходимо отказаться от подпитки обмоток возбуждения, а использовать только их шунтирование, которое не вызывает дополнительных потерь мощности в системе взаимного нагружения.

По возможности необходимо отказаться от преобразователей ПЭ и ПМ [69], потери энергии в которых, учитывая то, что они должны быть рассчитаны на максимальную мощность одной электрической машины, существенны. При испытании однотипных электрических машин это, как правило, легко достижимо.

Выполнение этих общих требований при выборе варианта системы взаимного нагружения является необходимым условием достижения высокой энергетической эффективности процесса испытания тяговых электрических машин электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта [70-72].

1.6 Динамическое нагружение тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока

Принцип динамического нагружения заключается в создании циклического процесса энергообмена между электрической машиной и каким-либо другим преобразователем энергии. Для обеспечения такого энергообмена система динамического нагружения должна включать в себя накопители энергии (механические, электромагнитные, электростатические). Для создания циклического процесса энергообмена в системах динамического нагружения электромашин вместо накопителя энергии может использоваться питающая сеть. В качестве накопителя энергии, в том числе, может использоваться и другая однотипная электрическая машина. Тогда энергообмен между двумя электромашинными будет представлять собой процесс взаимного динамического нагружения. При таком способе взаимного нагружения нет необходимости в механическом соединении валов испытуемых электромашин.

Принципы динамического нагружения и устройства технической реализации такого метода испытания электромашин постоянного тока достаточно подробно рассмотрены в докторской диссертации профессора Д. И. Родькина [44]. Однако вопросы, связанные с использованием динамического нагружения тяговых электромашин при их приемо-сдаточных испытаниях требуют отдельного рассмотрения на предмет определения возможности качественного выполнения всей программы данных испытаний

в соответствии с ГОСТ 2582-81 [1].

На рис. 1.9 приведена обобщённая схема системы динамического нагружения электрической машины постоянного тока, которая включает в себя регулятор тока возбуждения РТВ с подключенной к нему обмоткой возбуждения электромашин и преобразователь тока якоря ПТЯ с подключенной к нему обмоткой якоря.

Рисунок 1.9 – Обобщенная схема динамического нагружения электрической машины постоянного тока: *а* – двигательный режим;
б – генераторный режим

Для динамического нагружения электромашин необходимо создание условий её периодического перехода из двигательного режима в генераторный. При этом возможно управление как по цепи возбуждения, так и по цепи якоря [44].

Характер энергетических процессов в системе одинаков для обоих способов управления. Общий период энергообмена складывается из длительностей двигательного и генераторного режимов.

В течение времени происходит преобразование электрической энергии, подведенной к электромашине, в кинетическую энергию её вращающихся частей и электромагнитную энергию, накапливающуюся в её индуктивных элементах. В течение времени происходит преобразование кинетической энергии вращающихся элементов электромашин и электромагнитной энергии, накопленной в её индуктивных элементах, в электрическую энергию, отбираемую преобразователем ПТЯ.

Для обеспечения режима отбора мощности от испытуемой электромашин преобразователь ПТЯ должен быть реверсивным [44], включать в себя накопители энергии либо обеспечивать энергообмен с питающей сетью. Все потери энергии в системе динамического нагружения компенсируются внешней сетью.

На рис. 1.10 качественно приведены диаграммы изменения тока якоря испытуемой электромашин и угловой скорости, характерные для режима динамического нагружения с использованием любого из способов управления.

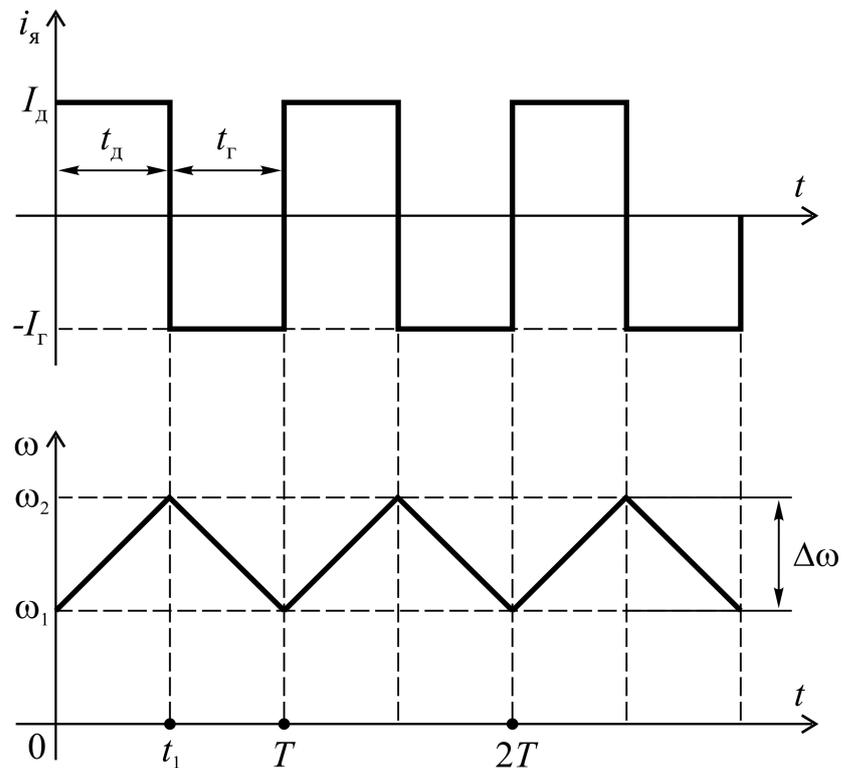


Рисунок 1.10 – Диаграммы изменения тока якоря и угловой скорости

В течение времени от нуля до ток якоря равен току двигательного режима .

;

.

В двигательном режиме угловая скорость растёт от значения до значения .

В течение времени от до ток якоря равен току генераторного режима .

;

.

В генераторном режиме угловая скорость падает от значения до . Предполагаем, что переключение режимов испытуемой электромашины производится системой автоматического управления именно по значению угловой скорости . При достижении скорости электромашинка переводится в генераторный режим, а при падении скорости до значения

– в двигательный. Это наиболее рациональный алгоритм управления режимом динамического нагружения.

Предполагаем, что значения ω и ω_0 постоянны в течении t и соответственно. Постоянство этих величин обязательно для качественного проведения испытаний на нагрев в соответствии с ГОСТ 2582-81. Строго говоря, это условие в реальных системах динамического нагружения электромашин не соблюдается [44], но здесь принимается для упрощения дальнейшего анализа.

Уравнение динамического равновесия для двигательного режима при $\omega = \omega_0$ будет иметь вид [73, 74]

$$M_{\text{э}} - M_{\text{п}} - M_{\text{л}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.7)$$

где $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент в двигательном режиме;
 $M_{\text{п}}$ – потери момента, обусловленные потерями мощности холостого хода;
 $M_{\text{л}}$ – момент инерции ротора.

Уравнение динамического равновесия для генераторного режима при $\omega = \omega_0$ будет иметь вид

$$M_{\text{э}} - M_{\text{п}} - M_{\text{л}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.8)$$

где $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент в генераторном режиме (абсолютное значение).

Электромагнитные моменты в двух режимах могут быть представлены в общем виде [75, 76]:

$$M_{\text{э}} = k_{\text{э}} \Phi \quad (1.9)$$

$$M_{\text{п}} = k_{\text{п}} \Phi \quad (1.10)$$

где $k_{\text{э}}$ – конструктивная постоянная испытуемой электромашинны;
 Φ , Φ_0 – магнитные потоки электромашинны в двигательном и генераторном режимах соответственно.

Подставив (1.9) и (1.10) в (1.7) и (1.8) соответственно, получим дифференциальные уравнения баланса моментов для двух режимов динамического равновесия:

$$\dots \quad (1.11)$$

$$\dots \quad (1.12)$$

Умножив обе части каждого из уравнений (1.11) и (1.12) на угловую скорость $\dot{\theta}$, после интегрирования получим уравнения энергетического баланса для каждого из режимов в виде:

$$\dots; \quad (1.13)$$

$$\dots \quad (1.14)$$

Для удобства дальнейшего анализа введем обозначения:

$$;$$

$$;$$

$$;$$

$$;$$

$$;$$

$$\dots$$

Тогда уравнения (1.13) и (1.14) будут иметь вид:

$$\dots; \quad (1.15)$$

(1.16)

представляет собой механическую работу электромагнитной мощности якоря за время двигательного режима, а представляет собой механическую энергию, отбираемую с вала якоря за время генераторного режима. По условию, принятому выше, при написании уравнений (1.7) и (1.8), имеем:

;

.

и представляют собой потери энергии в соответствующих режимах, обусловленные потерями мощности холостого хода электромашины. Из тех же соображений:

;

.

и представляют собой изменения кинетической энергии вращения якоря в двигательном и генераторном режимах соответственно. Учитывая характер изменения угловой скорости в данных режимах, имеем:

;

.

Путём вычитания (1.16) из (1.15) получим уравнение энергетического равновесия в виде

(1.17)

Нетрудно убедиться в том, что

.

Тогда уравнение (1.17) запишем в виде

,

или

где ΔW – разница электромагнитных энергий двух режимов;
 $\Sigma P_{\text{хол}} T$ – суммарные потери энергии холостого хода за период T .

Длительность двигательного режима $t_{\text{дв}}$ может быть найдена путём решения уравнения (1.13) или упрощённо из уравнения (1.7) принятием условий:

$$; \quad ;$$

$$; \quad ;$$

$$.$$

Тогда длительность двигательного режима

$$t_{\text{дв}} = \frac{2 \Delta W}{\Sigma P_{\text{хол}} T} \quad (1.18)$$

где $\Delta \omega$ – заданное изменение угловой скорости якоря электромашины.

Аналогично может быть определена длительность генераторного режима из уравнения (1.8) при принятии условий:

$$; \quad ;$$

$$; \quad ;$$

$$.$$

Тогда длительность генераторного режима

$$t_{\text{ген}} = \frac{2 \Delta W}{\Sigma P_{\text{хол}} T} \quad (1.19)$$

Из уравнений (1.18) и (1.19) видно, что

$$.$$

При тепловых испытаниях тяговых электромашин значения токов , и магнитных потоков , должны соответствовать часовому режиму [1, 2].

С учётом того, что для реальных тяговых электромашин электромагнитный момент часового режима, при котором проводятся тепловые испытания,

период одного цикла энергетических преобразований в системе динамического нагружения упрощённо может быть найден в виде

Тогда частота работы преобразователя тока якоря будет определяться по формуле

Предварительные расчёты показывают, что для реальных тяговых двигателей современного тягового подвижного состава [77-79] относительно широкому диапазону изменения частоты вращения якоря (до 100 об/мин) соответствуют достаточно высокие частоты работы преобразователя тока якоря (от 50 до 100 Гц). Отметим, что данные частоты соизмеримы с реальными частотами перемагничивания якорей тяговых электродвигателей [80, 81].

Работа тяговых электромашин с такими частотами тока якоря будет с явно ухудшенными условиями коммутации. Протекание переменного тока такой частоты по обмоткам дополнительных полюсов и компенсационным обмоткам будет вызывать значительное увеличение потерь мощности в их магнитных цепях [82, 83].

Динамическое нагружение тяговых электромашин предполагает наличие реверсивного преобразователя тока якоря, полупроводниковые ключи которого должны быть рассчитаны на максимальное напряжение и пусковой ток нагрузки. То есть такой преобразователь должен быть рассчитан на максимальную мощность испытываемой тяговой электромашин, как и в системах непосредственного нагружения.

Существенным преимуществом динамического нагружения электромашин при проведении испытаний на нагрев является отсутствие необходимости наличия еще одной, однотипной, электромашин и агрегирования электромашин для обеспечения их взаимной нагрузки. Однако целый ряд пунктов программы приёмо-сдаточных испытаний,

обусловленных ГОСТ 8285-81, может быть выполнен только путём непрерывного статического нагружения испытуемой тяговой электромашини либо по методу непосредственной нагрузки, либо взаимной. К таким пунктам относятся: проверки частоты вращения и реверсирования; проверка коммутации [1, 2].

Из приведенного анализа можно сделать вывод, что использование только одного динамического нагружения для выполнения всей программы приёмо-сдаточных испытаний электрических машин постоянного и пульсирующего тягового подвижного состава не достаточно. Использование же систем нагружения двух видов (статического и динамического) для проведения данных испытаний является нецелесообразным.

1.7 Выводы к разделу 1

Анализ состояния проблемы исследования позволяет сделать следующие основные выводы:

–техническое состояние существующих станции для испытания электрических машин тягового подвижного состава не соответствует современным требованиям организации ремонта и технического контроля, как с точки зрения энергетической эффективности, так и качества испытаний ;

–высокая эффективность модернизации существующих испытательных станций может быть достигнута только за счёт внедрения новых рациональных схем и режимов нагружения тяговых электромашин;

–выполнение программы приёмо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин с высокой энергетической эффективностью процесса испытания возможно только путём статического взаимного нагружения электромашин;

–до настоящего времени не определен и не систематизирован полный ряд возможных вариантов схемного решения системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока последовательного возбуждения;

–в современной теории электропривода до настоящего времени не формализованы энергетические и электромеханические принципы обеспечения взаимного нагружения электрических машин постоянного тока;

–более глубокого изучения требуют вопросы, связанные с эквивалентными режимами испытаний тяговых электрических машин и их влиянием на энергоёмкость и качество испытаний;

–в настоящее время отсутствует общепризнанная система оценки энергоэффективности и качества приемо-сдаточных испытаний электрических машин тягового подвижного состава железнодорожного транспорта.

РАЗДЕЛ 2

СИНТЕЗ СИСТЕМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

Необходимым условием решения проблемы выбора рациональной структуры системы для испытания электромашин тягового подвижного состава является наличие систематизированного перечня всех принципиально возможных вариантов создания условий взаимного нагружения и схемных решений реализации таких условий. Для решения этих задач необходим системный подход, основанный на анализе общих принципов обеспечения процесса взаимного нагружения [84].

Первым необходимым этапом такой систематизации является определение всех возможных вариантов энергетических соотношений в системе взаимной нагрузки неопределенной структуры. Проведение такого анализа является возможным благодаря определенности самого принципа энергообмена при взаимной нагрузке электромашин [85].

Вторым необходимым этапом систематизации принципов взаимного нагружения является определение универсальных соотношений электромеханических параметров системы взаимной нагрузки, на основании которых смогут быть построены конкретные электромеханические схемы испытательного стенда всех возможных вариантов.

2.1 Электромеханические аналогии физических величин и понятий для систем взаимного нагружения тяговых электромашин

Общий анализ энергетических процессов в системах взаимного нагружения показывает, что основными устройствами, которые определяют алгоритм функционирования системы, являются преобразователи электрической и механической мощности.

Разработка методики синтеза систем взаимного нагружения и сам синтез испытательных схем требуют обязательного применения системы электромеханических аналогий физических величин и понятий, используемых при описании источников и преобразователей мощности. Использование такой системы аналогий позволит существенно упростить сам синтез и будет являться залогом успеха в решении задачи определения полного ряда схемных решений системы взаимного нагружения.

Решению задачи систематизации физических величин и понятий посвящен целый ряд научных работ в области физики учёных разных стран, наиболее обобщающими из которых являются работы И. Ш. Когана [86, 87].

Любая система может быть охарактеризована своими закономерностями переноса энергии между формами движения и особенностями преобразования видов энергии внутри одной формы [88, 89]. В общем случае система взаимного нагружения электромашин

характеризуется тремя основными формами движения: механической, электромагнитной и тепловой.

Каждой форме движения системы присущи определенные виды энергии, основные из которых: кинетическая, потенциальная и энергия диссипации. При работе системы взаимного нагружения любой структуры происходит перенос энергии между формами движения, а также преобразования видов энергии внутри одной формы движения.

Кинетическая энергия механической формы движения системы взаимного нагружения определяется угловыми скоростями и приведенными моментами инерции вращающихся элементов [90]

$$, \quad (2.1)$$

где J и ω – эквивалентный момент инерции и угловая скорость i -го элемента механической части системы соответственно.

Кинетическая энергия электромагнитной формы движения системы определяется индуктивностями и силами тока в элементах электрической части

$$, \quad (2.2)$$

где L и I – индуктивность и сила тока i -го элемента электрической части системы соответственно.

Потенциальная энергия механической формы движения системы взаимного нагружения определяется угловыми жесткостями и углами деформации её упругих элементов

$$, \quad (2.3)$$

где K и α – угловая жесткость и угол деформации i -го упругого элемента системы соответственно.

Потенциальная энергия электромагнитной (электрической) формы движения системы взаимного нагружения определяется электрическими ёмкостями и зарядами ёмкостных элементов

$$, \quad (2.4)$$

где C и Q – ёмкость и заряд i -го ёмкостного элемента системы соответственно.

Так как в данном анализе рассматриваются только электромеханические аналогии, опустим описание видов энергии для тепловой формы движения. Отметим, что в системах взаимного нагружения возможен только односторонний перенос энергии из механической и электромагнитной форм движения в тепловую. Перенос энергии между механической и электромагнитной (электрической) формами движения системы взаимного нагружения – двусторонний.

Уравнение состояния любой формы движения любой системы может быть записано в виде выражения для динамического воздействия [86]

$$\dot{W} = \dot{W}_0 + \dot{W}_1, \quad (2.5)$$

где \dot{W} – энергетическое воздействие;

W_0 – координата состояния.

Координатой состояния механической формы движения является угловое перемещение θ , а координатой состояния электромагнитной формы движения – заряд q . Динамическим воздействием для механической формы движения в соответствии с (2.5) является механический момент M , а для электромагнитной формы – электродвижущая сила E .

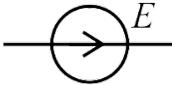
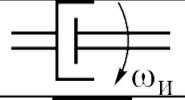
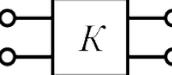
Кинематическим воздействием механической формы движения является первая производная углового перемещения $\dot{\theta}$ – угловая скорость, а электромагнитной (электрической) формы – первая производная заряда \dot{q} – сила тока [91-94].

Следовательно, источниками силового воздействия в системах взаимного нагружения могут быть источник вращающегося момента (источник механической мощности) и источник э. д. с. (источник электрической мощности). В качестве источников кинематического воздействия могут быть источник угловой скорости (источник механической мощности) и источник тока (источник электрической мощности).

Преобразователем параметров потока энергии (мощности) в механической форме движения является механический редуктор (вариатор), а в электромагнитной форме движения – конвертор (трансформатор) постоянного напряжения (тока).

Основные аналогии физических величин, понятий и устройств для механической и электромагнитной форм движения систем взаимного нагружения приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Электромеханические аналогии физических величин и понятий

| Характеристика, устройство | Механическая форма движения системы | | | Электромагнитная форма движения системы | | |
|---|-------------------------------------|--|-------------|---|---|-------------|
| | величина, понятие | обозначение | размерность | величина, понятие | обозначение | размерность |
| Координата состояния | Угол поворота | | рад | Заряд | | Кл |
| Скорость изменения координаты состояния | Угловая скорость | | | Сила тока | | А |
| Жёсткость | Угловая жёсткость | | | Величина, обратная ёмкости | | |
| Диссипативность | Механическое сопротивление | | | Электрическое сопротивление | | Ом |
| Инертность | Момент инерции | | | Индуктивность | | Гн |
| Динамическое воздействие | Вращающий момент | | | Электродвижущая сила | | В |
| Кинематическое воздействие | Угловая скорость | | | Сила тока | | А |
| Противодействие жёсткости | Момент упругости | | | Напряжение на ёмкости | | В |
| Динамическое противодействие | Момент сопротивления | | | Падение напряжения | | В |
| Инерционное противодействие | Момент инерции | | | Напряжение на индуктивности | | В |
| Источник динамического воздействия | Источник механического момента |  | – | Источник э. д. с. |  | – |
| Источник кинематического воздействия | Источник угловой скорости |  | – | Источник тока |  | – |
| | |  | – | |  | – |

| | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|--|--|-----------------------------|--|--|
| Преобразователь потока энергии | Механический редуктор | | | Конвертор напряжения (тока) | | |
|--------------------------------|-----------------------|--|--|-----------------------------|--|--|

2.2 Энергетические принципы взаимного нагружения электрических машин постоянного тока

На рис. 2.1 приведена универсальная схема преобразования мощностей в основном контуре схемы взаимной нагрузки любой структуры. Данный контур включает в себя: электрические части двигателя ЭД и генератора ЭГ, механические части двигателя МД и генератора МГ, преобразователи электрической и механической мощностей ПЭ и ПМ соответственно, источники электрической и механической мощностей ИЭ и ИМ соответственно. Под электрическими частями двигателя и генератора ЭГ понимаются их обмотки, а под механическими частями МД и МГ – их вращающиеся части (роторы). Электрическая часть двигателя является потребителем электрической мощности, а его механическая часть – источником механической мощности. Механическая часть генератора представляет собой потребитель механической мощности, а его электрическая часть – источник электрической мощности. Преобразования видов мощностей в двигателе и генераторе происходят через их электромагнитные мощности и соответственно [75, 76].

Общая электрическая мощность, потребляемая двигателем, представляет собой сумму мощностей и источника ИЭ и преобразователя ПЭ соответственно. Общая механическая мощность, потребляемая генератором, представляет собой сумму мощностей и источника ИМ и преобразователя ПМ соответственно.

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{ЭД}} + P_{\text{ПЭ}}; \quad (2.6)$$

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{МГ}} + P_{\text{ПМ}}. \quad (2.7)$$

Мощности на выходах преобразователей ПЭ и ПМ:

$$P_{\text{ПЭ}} = P_{\text{ЭД}} - P_{\text{ЭГ}}; \quad (2.8)$$

$$P_{\text{ПМ}} = P_{\text{МД}} - P_{\text{МГ}}; \quad (2.9)$$

где $P_{\text{ПЭ}}$ – потери мощности в преобразователе ПЭ;

$P_{\text{ПМ}}$ – потери мощности в преобразователе ПМ.

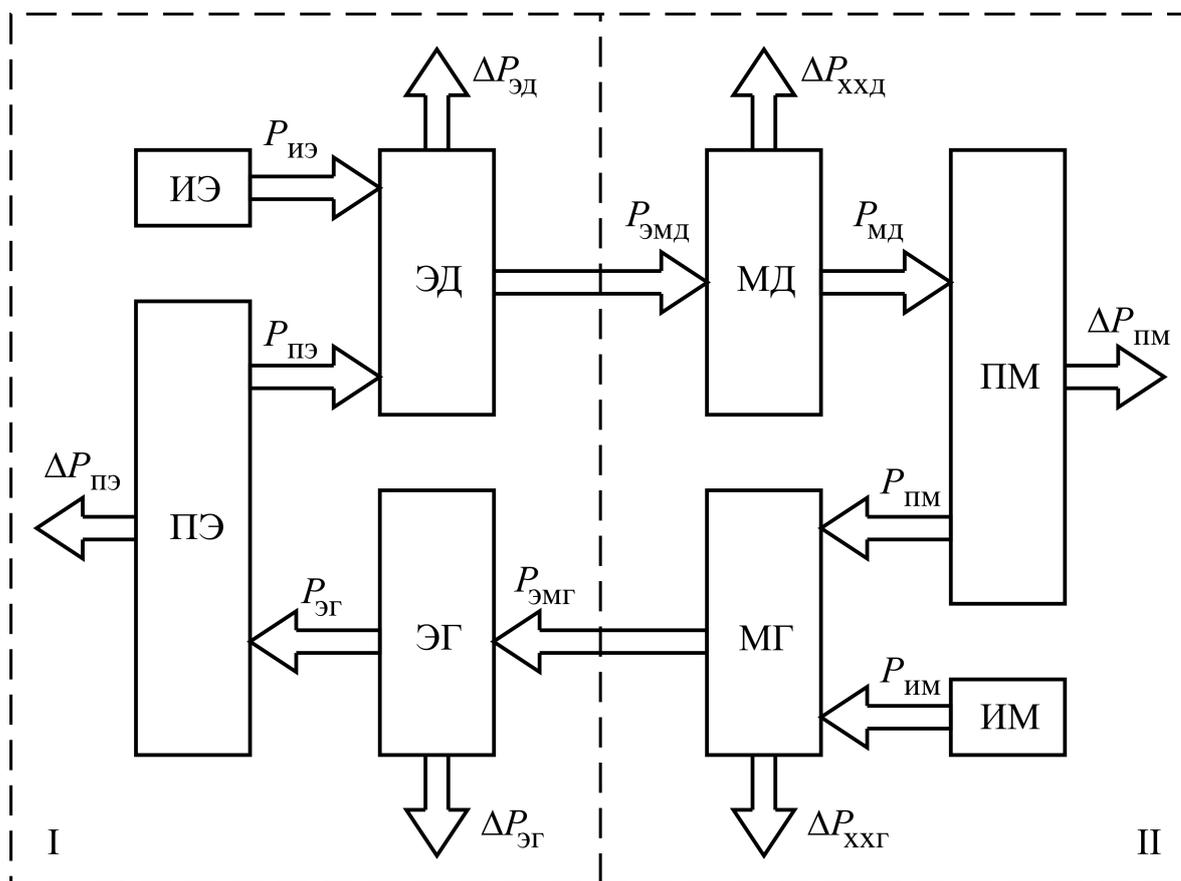


Рисунок 2.1 – Универсальная схема преобразования мощностей

При преобразовании мощностей неизбежны потери в электрических частях двигателя и генератора (электрические потери) и соответственно, а также потери в механических частях двигателя и генератора (потери холостого хода) и соответственно.

Электрические потери и вызваны протеканием токов в обмотках двигателя и генератора, а потери холостого хода (механические и магнитные потери) и – вращением роторов испытываемых машин. На схеме преобразования мощностей отдельно не показаны добавочные потери двигателя и генератора, которые при рассмотрении вопроса их компенсации в схеме взаимной нагрузки можно частично отнести к электрическим, а частично – к магнитным [95]. Отдельное рассмотрение этого вида потерь в данном анализе не является принципиально необходимым, потому опускается.

Энергетическим критерием работоспособности схемы взаимной нагрузки является условие компенсации всех потерь в схеме внешними источниками мощности (ИЭ, ИМ).

Принципиально возможны следующие варианты компенсации потерь мощности в двигателе, генераторе и преобразователях:

а) компенсация всех потерь одним источником электрической мощности;

- б) компенсация отдельных видов потерь двумя отдельными источниками электрической мощности;
- в) компенсация всех потерь одним источником механической мощности;
- г) компенсация отдельных видов потерь двумя отдельными источниками механической мощности;
- д) компенсация электрических потерь источником электрической мощности, а потерь холостого хода – источником механической мощности;
- е) компенсация электрических потерь источником механической мощности, а потерь холостого хода – источником электрической мощности.

Продолжая логическую цепь перебора вариантов сочетания видов потерь испытуемых электромашин с видами источников мощности, которыми можно компенсировать эти потери, приходим к варианту, в котором все потери двигателя компенсируются своими источниками энергии, а все потери генератора – своими. Однако даже поверхностный анализ схемы энергетических преобразований, приведенной на рис. 2.1, показывает, что такой вариант не рационален.

Замкнутый контур преобразования мощностей в схеме взаимной нагрузки (см. рис. 2.1) условно можно разбить на два участка, обведенные пунктирными линиями. Участок *I* представляет собой электрическую часть стенда взаимной нагрузки, в которой происходят преобразования электрических мощностей. На этом участке схемы энергетических преобразований возникают только электрические потери, которые обусловлены активными падениями напряжений на элементах электрической цепи, вызванными протеканием токов. Компенсация этих потерь возможна только созданием в последовательной цепи электрических преобразований дополнительной электродвижущей силы. В связи с тем, что цепь данных преобразований последовательная, создание дополнительных э. д. с. для отдельной компенсации электрических потерь двигателя и генератора не целесообразно.

Участок *II* схемы на рис. 2.1 представляет собой механическую часть стенда взаимной нагрузки, в которой происходит последовательное преобразование механических мощностей. Отдельная компенсация механических и магнитных потерь двигателя и генератора двумя источниками момента, включенными в данную последовательную механическую цепь не целесообразна из тех же соображений, что и компенсация электрических потерь двумя источниками э. д. с.

Необходимо отметить, что каждому из возможных вариантов компенсации потерь («а»-«е») соответствует целый ряд вариантов схемы взаимной нагрузки. Таким образом, первым этапом в решении задачи оптимизации схемы взаимной нагрузки является выбор рационального варианта компенсации потерь из перечня, представленного выше. Проведем сравнительный анализ этих вариантов с энергетической точки зрения.

Взаимосвязь электромагнитных мощностей двигателя и генератора согласно схеме на рис. 2.1 может быть представлена в виде системы

уравнений:

$$(2.10)$$

Преобразовав данную систему, получим

$$(2.11)$$

где P_{Σ} и $P_{\Sigma 0}$ – суммарные электрические потери и потери холостого хода обеих испытуемых машин и преобразователей.

$$(2.12)$$

$$(2.13)$$

Рассмотрим все варианты компенсации потерь мощности в основном контуре схемы взаимной нагрузки (рис. 2.1).

Вариант «а». Все потери компенсируются одним источником электрической мощности:

$$(2.14)$$

Из уравнения (2.11) после преобразований получим взаимосвязь электромагнитных мощностей для данного варианта в виде

$$(2.15)$$

Таким образом, в данном варианте потери холостого хода в схеме компенсируются положительной разностью электромагнитных мощностей двигателя и генератора. Тогда условие обеспечения взаимной нагрузки можно выразить в виде системы неравенств:

Неравенство (2.16) является условием вращения якорей испытуемых электромашин, а неравенство (2.17) – условием протекания токов в их якорных обмотках.

Вариант «б». Все потери компенсируются двумя отдельными источниками электрической мощности, электрические потери – одним, а потери холостого хода – другим.

(2.18)

Используя уравнение (2.11) для данного варианта, получим взаимосвязь электромагнитных мощностей в виде

(2.19)

Так же, как и в «а», в данном варианте потери холостого хода компенсируются положительной разностью электромагнитных мощностей двигателя и генератора. Условие обеспечения взаимной нагрузки электромашин будет иметь вид:

Здесь неравенство (2.20) является условием вращения якорей испытуемых электромашин, а неравенство (2.21) – условием протекания токов в их якорных обмотках.

Вариант «в». Все потери компенсируются одним источником механической мощности:

(2.22)

Из уравнения (2.11) получим выражение, связывающее электромагнитные мощности испытуемых двигателя и генератора в виде

(2.23)

В рассматриваемом варианте компенсация всех электрических потерь в схеме обеспечивается положительной разностью электромагнитных мощностей генератора и двигателя. Условие обеспечения взаимной нагрузки имеет вид:

Неравенство (2.24) является условием протекания токов в якорных обмотках двигателя и генератора, а неравенство (2.25) – условием вращения их якорей.

Вариант «г». Все потери компенсируются двумя отдельными источниками механической мощности, электрические потери – одним, а потери холостого хода – другим:

(2.26)

Используя уравнение (2.11), получим для данного варианта выражение взаимосвязи электромагнитных мощностей генератора и двигателя, аналогичное варианту «в»

(2.27)

Так же, как и в варианте «в», компенсацию электрических потерь в схеме обеспечивает положительная разность электромагнитных мощностей генератора и двигателя. Условие обеспечения взаимной нагрузки электромашин будет иметь вид

Неравенство (2.28) является условием протекания токов в якорных обмотках испытуемых электромашин, а неравенство (2.29) – условием вращения их якорей.

Вариант «д». Электрические потери компенсируются источником электрической мощности, а потери холостого хода – источником механической мощности:

(2.30)

Из уравнения (2.11) для данного варианта получим выражение, определяющее соотношение электромагнитных мощностей испытуемых электромашин в виде

(2.31)

Таким образом, компенсация электрических, магнитных и механических потерь в схеме при таком варианте осуществляется при

равенстве электромагнитных мощностей двигателя и генератора. Условием обеспечением взаимной нагрузки электромашин будет система неравенств:

Неравенство (2.32) является условием протекания токов в якорных обмотках испытуемых электромашин, а неравенство (2.33) – условием вращения их якорей.

Вариант «е». Электрические потери компенсируются источником механической мощности, а потери холостого хода – источником электрической мощности:

(2.34)

Используя уравнение (2.11), получим выражение, определяющее соотношение электромагнитных мощностей испытуемых электромашин в виде

(2.35)

При данном варианте компенсации потерь в схеме взаимной нагрузки разница между электромагнитными мощностями двигателя и генератора равна разности потерь холостого хода и электрических потерь. Это означает, что характер соотношения этих электромагнитных мощностей будет изменяться в зависимости от соотношения видов потерь в схеме. Условием обеспечения взаимной нагрузки электромашин при данном варианте будет система:

Неравенство (2.37) является условием вращения якорей двигателя и генератора, а неравенство (2.38) – условием протекания в их обмотках тока. Неравенства (2.39), (2.40) являются дополнительными обязательными условиями, без которых невозможно обеспечение условий (2.37), (2.38). Уравнение (2.36) является частным случаем соотношения электромагнитных

мощностей испытуемых электромашин, которое соответствует режиму равенства электрических потерь и потерь холостого хода. Для данного частного случая неравенства (2.39), (2.40) также являются необходимыми условиями работы системы взаимной нагрузки.

Полученные соотношения электромагнитных мощностей испытуемых электромашин определяют характер возможных соотношений их токов, магнитных потоков и частот вращения, обеспечивающих процесс взаимной нагрузки.

Анализ этих условий обеспечения взаимной нагрузки, полученных для каждого из вариантов компенсации потерь, позволяет определить все принципиально возможные варианты схемы взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока.

В вариантах «а», «б» и «д» компенсация электрических потерь осуществляется непосредственно источником электрической мощности без преобразований в другой вид мощности.

В вариантах «в», «г», «д» компенсация магнитных и механических потерь осуществляется источником механической мощности, непосредственно и также без преобразований в другой вид мощности.

В вариантах «в», «г» и «е» компенсация электрических потерь осуществляется источником механической мощности ИМ путем преобразования её в электрическую посредством испытуемого генератора.

При этом электромагнитная мощность генератора и потери в нем и увеличиваются.

В вариантах «а», «б» и «е» компенсация механических потерь осуществляется источником электрической мощности ИЭ путем преобразования её в механическую посредством испытуемого двигателя. При этом электромагнитная мощность двигателя и потери в нем и

также увеличиваются.

Отрицательным фактором при взаимной нагрузке в таких вариантах покрытия потерь, в которых необходимо преобразование вида мощности, является расхождение электромагнитных мощностей испытуемых электромашин, которое определяет и степень расхождения их тепловой нагруженности. В табл. 2.2 приведены соотношения электромагнитных мощностей при взаимной нагрузке электромашин, полученные в результате проведенного анализа.

Наиболее рациональным с точки зрения одинакового нагружения испытуемых электромашин является вариант «д», при котором электромагнитные мощности двигателя и генератора равны. Недогружение одной из одностипных испытуемых электромашин при испытании на нагрев не дает возможности определения действительного значения превышения температуры её частей, соответствующего номинальному режиму [96]. Отметим, что испытания на нагрев являются наиболее энергоёмкими в общем перечне программы приемо-сдаточных испытаний.

Таблица 2.2

| Вариант | | а, б | в, г | д | е |
|--|--|-----------|-----------|-----|----------------------------|
| Способ покрытия потерь | | ИЭ | ИМ | ИЭ | ИМ |
| | | ИЭ | ИМ | ИМ | ИЭ |
| Соотношение электромагнитных мощностей | | | | | |
| Недогруженная электромашина | | Генератор | Двигатель | нет | Двигатель или генератор |

При решении задачи оптимизации схемы взаимной нагрузки может оказаться, что с точки зрения минимума энергозатрат на испытания или себестоимости испытательной станции рациональным будет вариант, отличный от варианта «д». Для уменьшения отрицательного влияния фактора, описанного выше, необходимо выбирать такие методы обеспечения взаимной нагрузки, при которых разность тепловой нагруженности обмоток испытуемых электромашин будет минимальной при заданной разности их электромагнитных мощностей [97].

2.3 Электромеханические принципы взаимного нагружения электрических машин постоянного тока

С электромеханической точки зрения для взаимного нагружения электромашин требуется обеспечение двух основных условий: условия протекания тока нагрузки испытуемых электромашин и условия вращения их роторов. Условием протекания тока является компенсация всех падений напряжения в цепи электрических преобразований системы взаимного нагружения, а условием вращения роторов испытуемых электромашин – компенсация всех моментов сопротивления вращению. Для обеспечения взаимного нагружения испытуемых электромашин требуется:

- наличие устройств передачи электрической мощности;
- наличие устройств передачи механической мощности;
- положительная результирующая электродвижущая сила в цепи электрических преобразователей, компенсирующая падения напряжений от протекания токов;
- положительный результирующий момент в цепи механических преобразований, компенсирующий потери момента от вращения роторов электромашин.

Основной контур энергетических преобразований любой схемы взаимной нагрузки можно условно разбить на две цепи:

- цепь электрических преобразований выходной мощности генератора во входную мощность двигателя;
- цепь механических преобразований выходной мощности двигателя во входную мощность генератора.

Универсальная схема преобразования электрической мощности представлена на рис. 2.2.

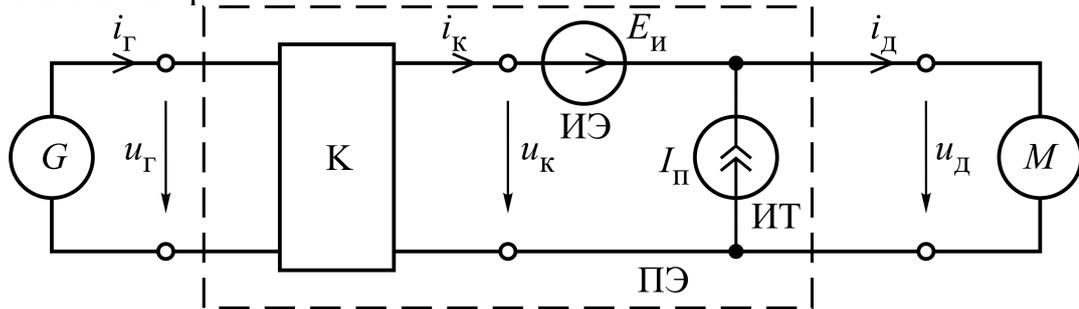


Рисунок 2.2 - Универсальная схема преобразования электрической мощности

Преобразователь электрической мощности ПЭ (обведен пунктиром) включает в себя конвертор постоянного напряжения (тока) К, источник электродвижущей силы ИЭ и источник тока ИТ. К входу преобразователя ПЭ подключен якорь генератора G , а к выходу – якорь двигателя M , при этом имеется в виду, что имеется возможность независимого регулирования магнитных потоков испытуемых машин (обмотки возбуждения на схеме не показаны). В данной схеме замещения предусмотрены все теоретически возможные виды электрических преобразований [91, 98]:

- конвертирование напряжения (тока);
- добавка электродвижущей силы ();
- подпитка якоря двигателя током ().

В принципе и источник э. д. с. может быть включен во вторичную цепь конвертора так же, как и источник тока может быть включен в первичную цепь. Для проведения данного анализа это не принципиально.

Отметим, что на приведенной схеме (рис. 2.2) не показаны диссипативные элементы самого преобразователя ПЭ. Такое упрощение вполне допустимо для анализа, целью которого является определение самих принципов создания взаимной нагрузки электромашин. Таким образом, будем рассматривать работу данной универсальной схемы без учета потерь мощности в преобразователе ПЭ.

Работа преобразователя будет описываться системой уравнений:

$$(2.41)$$

- где
- напряжение на входе двигателя;
 - напряжение на выходе генератора;
 - ток двигателя;
 - ток генератора;
 - коэффициент передачи напряжения;

– коэффициент передачи тока.

Коэффициенты передачи k_M и k_ω связаны между собой соотношением

$$k_M = \frac{1}{k_\omega} \quad (2.42)$$

Напряжения на зажимах двигателя и генератора:

$$U_D = U_G \quad (2.43)$$

$$I_D = I_G \quad (2.44)$$

где k_M и k_ω – конструктивные постоянные двигателя и генератора соответственно;

Φ_D и Φ_G – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно;

ω_D и ω_G – угловые скорости валов двигателя и генератора соответственно;

r_D и r_G – внутренние сопротивления двигателя и генератора соответственно.

Универсальная схема преобразования механической мощности представлена на рис. 2.3.

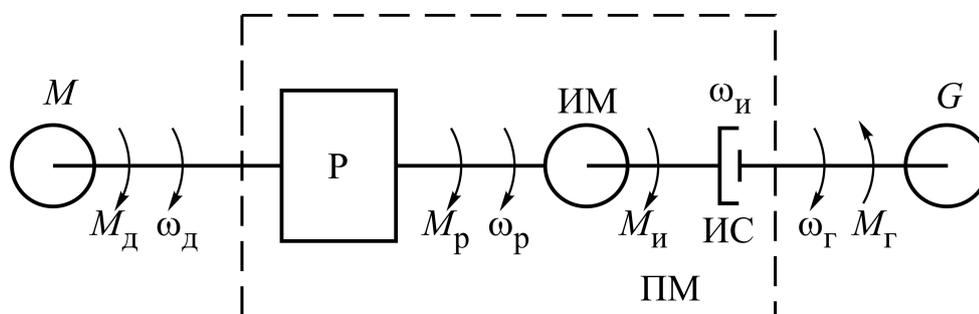


Рисунок 2.3 - Универсальная схема преобразования механической мощности

Преобразователь ПМ включает в себя механический редуктор Р (вариатор), источник дополнительного момента (дополнительный двигатель) с моментом $M_{\text{И}}$ и источник дополнительной угловой скорости ИС (устройство добавки угловой скорости) с добавкой $\omega_{\text{И}}$. Со входом преобразователя связан вал ротора двигателя M , а с выходом – вал ротора генератора G .

В данной схеме замещения предусмотрены все теоретически возможные виды механических преобразований [93, 94]:

- конвертирование механического момента (угловой скорости);
- добавка крутящего момента дополнительным источником момента;

–добавка угловой скорости дополнительным источником угловой скорости.

Дополнительные источники механической мощности в данной схеме могут быть включены в первичную механическую цепь редуктора.

Необходимо отметить полную аналогию процессов преобразования электрической и механической мощностей по схемам, представленным на рис. 2.2 и 2.3. Аналогами напряжений электрической схемы являются моменты механической схемы. Аналогами токов являются угловые скорости. Аналогами источников э. д. с. и токов являются источники механического момента и угловой скорости соответственно. Аналогом конвертора постоянного напряжения (тока) является редуктор.

На схеме замещения преобразователя механической мощности (рис. 2.3) так же, как и в схеме замещения электрического преобразователя, не показаны диссипативные элементы. И в дальнейшем его работа будет рассматриваться без учета внутренних потерь. Работа преобразователя описывается системой уравнений:

где M_g – момент на валу генератора;

M_d – момент на валу двигателя;

ω_d – угловая скорость вала двигателя;

ω_g – угловая скорость вала генератора;

k_M – коэффициент передачи момента;

k_ω – коэффициент передачи угловой скорости.

Коэффициенты передачи k_M и k_ω связаны между собой соотношением

$$k_M = k_\omega \cdot \frac{M_g}{\omega_g} \quad (2.47)$$

Моменты на валах двигателя и генератора:

$$M_d = k_M \cdot \omega_d \quad (2.48)$$

$$M_g = k_M \cdot \omega_g \quad (2.49)$$

где ΔM_d и ΔM_g – потери момента двигателя и генератора, обусловленные механическими и магнитными потерями мощности в электромашинах.

Рассмотрим условия компенсации электрических потерь в стенде взаимной нагрузки по универсальным соотношениям основных параметров

схемы, полученным выше.

Объединив формулы (2.41), (2.43), (2.44), (2.46), после преобразований получим выражение, характеризующее баланс напряжений в электрической части схемы взаимной нагрузки в установившемся режиме

$$\dots \quad (2.50)$$

Левая часть выражения (2.50) представляет собой сумму падений напряжений на внутренних сопротивлениях испытуемых электромашин, приведенную к цепи двигателя. Приведение всех электрических процессов к цепи двигателя более логично, чем к цепи генератора в связи с тем, что двигатель является конечным элементом в общей цепи электрических преобразований и единственным потребителем электрической мощности в стенде взаимной нагрузки.

Правая часть выражения (2.50) представляет собой сумму электродвижущих сил, которыми согласно рис. 2.2 может быть скомпенсирована сумма падений напряжений, приведенная в его левой части. Каждое из слагаемых правой части уравнения (2.50) определяет свой возможный способ (или способы) компенсации электрических потерь в схеме взаимной нагрузки. В общем виде условие протекания тока нагрузки взаимно нагруженных электромашин может быть формализовано в виде

$$\dots \quad (2.51)$$

Рассмотрим условия компенсации потерь холостого хода в схеме взаимной нагрузки по универсальным соотношениям её основных параметров.

Объединив формулы (2.41), (2.45), (2.48), (2.49), после преобразований получим уравнение, характеризующее баланс моментов в механической части схемы взаимной нагрузки при установившемся режиме

$$\dots \quad (2.72)$$

Левая часть уравнения (2.72) представляет собой сумму потерь механических моментов на валах испытуемых электромашин, приведенную к валу генератора, который является конечным элементом в цепи механических преобразований и единственным потребителем механической мощности в стенде взаимной нагрузки.

Правая часть уравнения (2.72) представляет собой сумму моментов, которыми в соответствии со схемой на рис. 2.3 может быть скомпенсирована сумма потерь моментов, приведенная к валу генератора. Каждое слагаемое правой части уравнения (2.72) определяет отдельный возможный способ (способы) компенсации потерь холостого хода в схеме взаимной нагрузки. В общем виде условие вращения роторов взаимно нагруженных электромашин может быть формализовано в виде

(2.73)

2.4 Принципы синтеза систем взаимного нагружения электрических машин постоянного тока

Сформулированные в предыдущих разделах принципы взаимного нагружения тяговых электромашин позволяют систематизировать процесс синтеза принципиальных электромеханических схем взаимной нагрузки. Синтез всех принципиально возможных вариантов схемы взаимной нагрузки может быть проведен на основе универсальной схемы, полученной путём совмещения универсальных схем электрического и механического преобразователей мощности (рис 2.2 и 2.3).

Принципиальная универсальная схема стенда взаимной нагрузки электромашин постоянного тока приведена на рис. 2.4. Схема включает в себя испытуемые электродвигатель M и генератор G , валы которых соединены между собой посредством преобразователя механической мощности ПМ. Электрически якорь генератора связан с якорем двигателя через преобразователь электрической мощности ПЭ. Обмотки возбуждения генератора и двигателя показаны отдельно. Схема является обобщённой и универсальной для любого варианта системы взаимного нагружения.

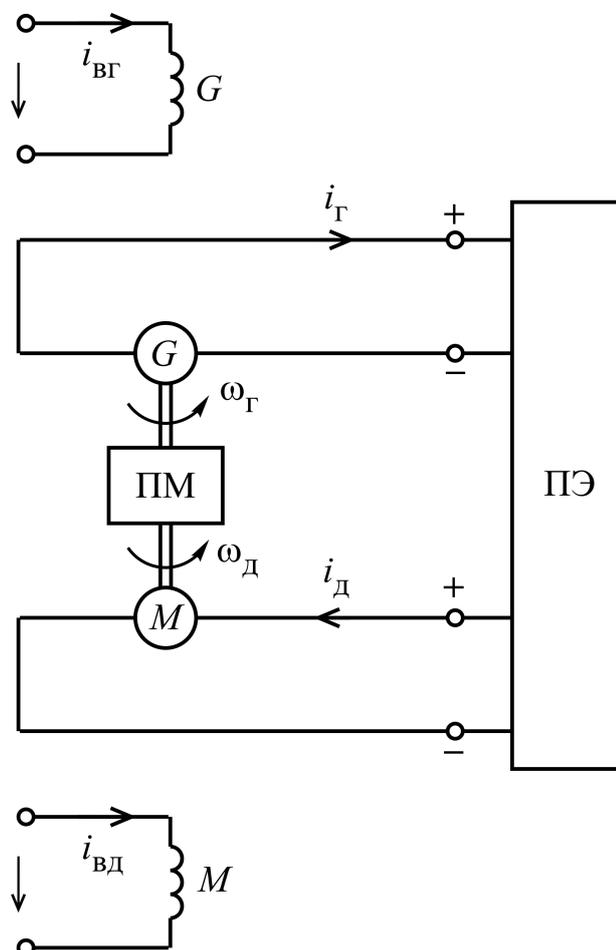


Рисунок 2.4 – Обобщенная схема взаимного нагружения

Преобразователи ПЭ и ПМ могут включать в себя как пассивные, так и активные элементы [91-94]. Обмотки возбуждения могут питаться токами $I_{\text{в}}$ и $I_{\text{в}2}$ как независимо, так и последовательно с якорями. Токи якорей $I_{\text{а}}$ и $I_{\text{а}2}$, и угловые скорости ω и ω_2 связаны между собой соотношениями, определяемыми конфигурациями преобразователей ПЭ и ПМ.

В соответствии с электромеханическими принципами обеспечения взаимной нагрузки электромашин постоянного тока условие их взаимного нагружения можно выразить в виде системы [67]:

где $\Sigma U_{\text{эл}}$ – суммарное падение напряжений в электрических цепях схемы, приведенное к цепи якоря двигателя;

$\Sigma M_{\text{мех}}$ – суммарные потери моментов в механической части схемы, приведенные к валу генератора;

Уравнение (2.94) характеризует баланс напряжений в электрической схеме стенда в стационарном режиме и определяет пять независимых условий протекания токов якорей испытываемых электромашин. Обозначим каждое из них буквой латинского алфавита от A до E .

Условие A

$$U_{\text{эл}} = U_{\text{эл}2} \quad (2.76)$$

Условие B

$$M_{\text{мех}} = M_{\text{мех}2} \quad (2.77)$$

Условие C

$$I_{\text{а}} = I_{\text{а}2} \quad (2.78)$$

Условие D

$$\omega = \omega_2 \quad (2.79)$$

Условие E

$$I_{\text{в}} = I_{\text{в}2} \quad (2.80)$$

Условие A является достаточным. Способ компенсации электрических потерь для данного варианта является прямым и предполагает введение в электрическую цепь дополнительного источника электрической мощности.

Условие B является достаточным в случае обеспечения возбуждения испытуемого генератора G . Способ компенсации потерь является косвенным, так как предполагает преобразование механической мощности дополнительного источника в электрическую испытуемым генератором G .

Условия C , D и E не являются достаточными, так как требуют наличие дополнительного источника мощности. Эти условия обеспечивают компенсацию электрических потерь только в сочетании с вращением испытуемых электромашин. Способы компенсации электрических потерь являются косвенными. Преобразование добавочной механической мощности в электрическую осуществляется испытуемым генератором G .

Уравнение (2.75) характеризует баланс моментов в механической части испытательного стенда в стационарном режиме и определяет пять независимых условий вращения валов испытуемых электромашин. По аналогии с условиями протекания токов обозначим данные условия буквами латинского алфавита от F до J .

Условие F

$$\cdot \quad (2.81)$$

Условие G

$$\cdot \quad (2.82)$$

Условие H

$$\cdot \quad (2.83)$$

Условие I

$$\cdot \quad (2.84)$$

Условие J

$$\cdot \quad (2.85)$$

Условие F является достаточным. Способ компенсации потерь холостого хода является прямым и предполагает введение в механическую цепь дополнительного источника механической мощности.

Условие G является достаточным в случае обеспечения возбуждения испытуемого двигателя M . Способ компенсации потерь является косвенным, так как требует преобразования добавочной электрической энергии в механическую испытуемым двигателем M .

| | | | | | | | | | |
|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| BG | 0 | >0 | 0 | 1 | 1 | 0 | >0 | 1 | 1 |
| BH | 0 | >0 | <0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| BI | 0 | >0 | 0 | <1 | 1 | 0 | 0 | >1 | 1 |
| BJ | 0 | >0 | 0 | 1 | <1 | 0 | 0 | 1 | >1 |
| CF | 0 | 0 | >0 | 1 | 1 | >0 | 0 | 1 | 1 |
| CG | 0 | 0 | >0 | 1 | 1 | 0 | >0 | 1 | 1 |
| DF | 0 | 0 | 0 | >1 | 1 | >0 | 0 | <1 | 1 |
| DG | 0 | 0 | 0 | >1 | 1 | 0 | >0 | <1 | 1 |
| EF | 0 | 0 | 0 | 1 | >1 | >0 | 0 | 1 | <1 |
| EG | 0 | 0 | 0 | 1 | >1 | 0 | >0 | 1 | <1 |

2.5 Определение схемных решений системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока

Полный ряд вариантов электромеханической схемы системы взаимного нагружения будет соответствовать множеству сочетаний условий протекания тока и вращения роторов электромашин. Рассмотрим каждое сочетание из множества, полученного выше, отдельно. Для тех вариантов, при которых магнитные потоки электромашин равны, принимаем

. Конструктивные постоянные пары испытуемых электромашин принимаем равными

Вариант « AF ».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту, имеют вид:

;

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.5.

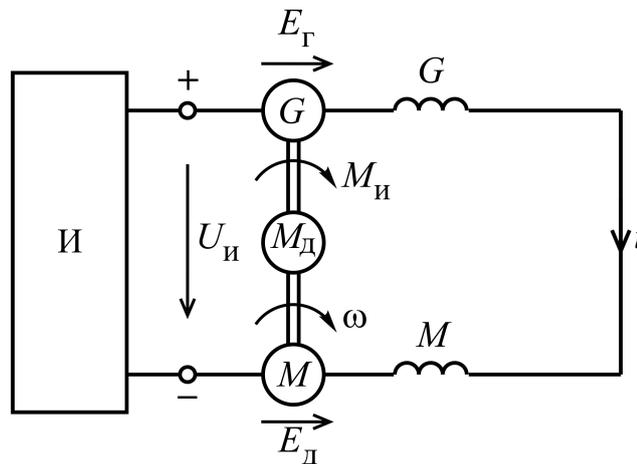


Рисунок 2.5 - Вариант «AF»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

$$(2.87)$$

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.6.

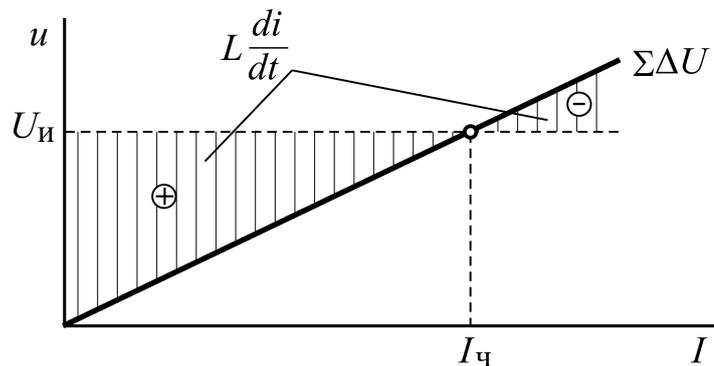


Рисунок 2.6 – Диаграмма баланса напряжений

Вариант «AG».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

;

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.7.

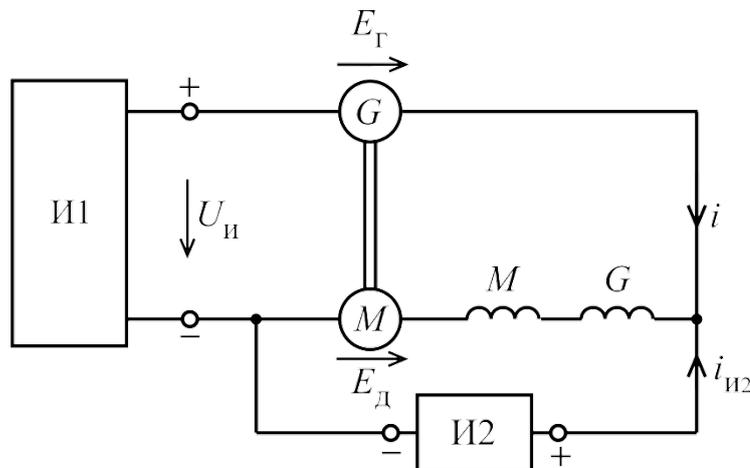


Рисунок 2.7 - Вариант «AG»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

(2.88)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытываемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.6.

Вариант «АН».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

;

Схемы взаимной нагрузки, соответствующие данному варианту, приведены на рис. 2.8 и 2.9. На рис. 2.8 приведен вариант с отпиткой обмотки возбуждения генератора, а на рис. 2.9 – вариант с подпиткой обмотки двигателя. По принципам обеспечения условий взаимного нагружения данные схемы идентичны.

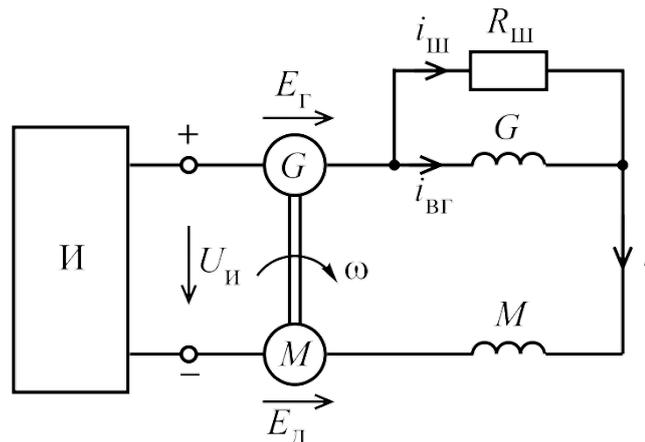


Рисунок 2.8 - Вариант «АН-а»

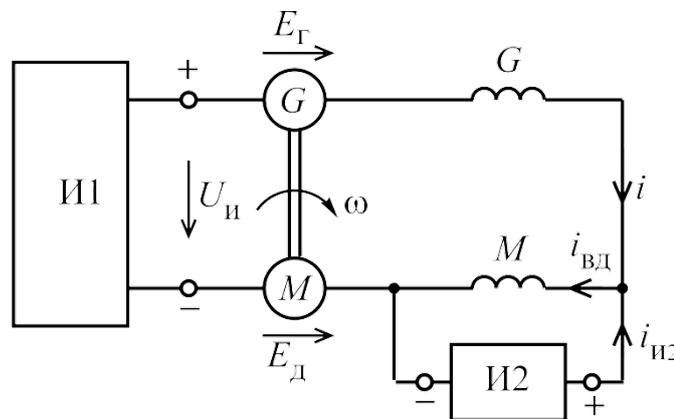


Рисунок 2.9 - Вариант «АН-б»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данных вариантов имеет вид:

(2.89)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытываемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.10.

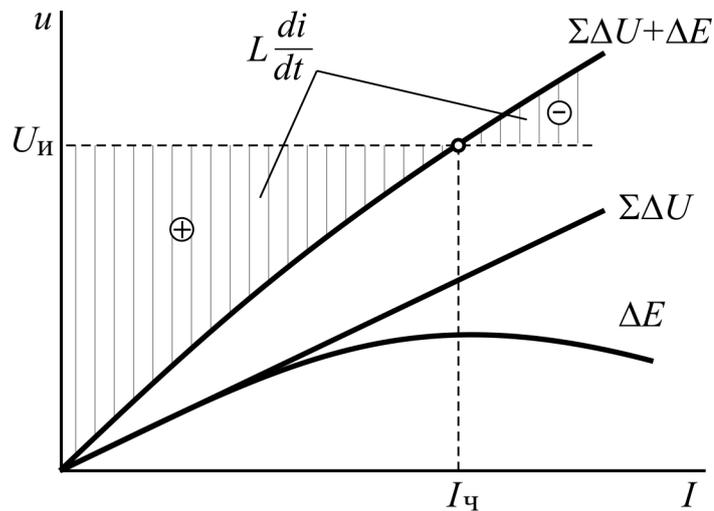


Рисунок 2.10 – Диаграммы баланса напряжений

Вариант «AI».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

; ; .

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.11.

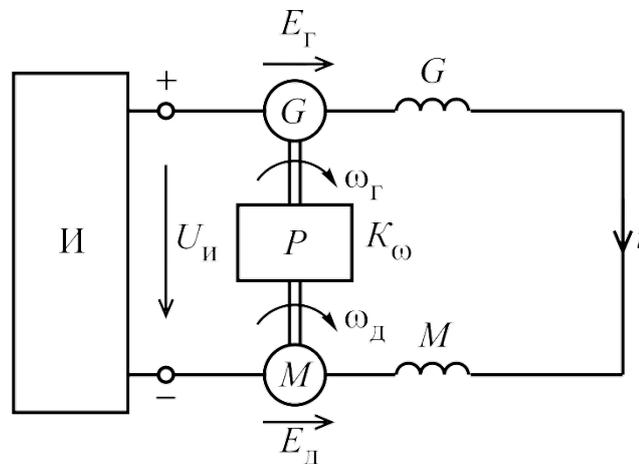


Рисунок 2.11 - Вариант «AI»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

(2.90)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.10.

Вариант «AJ».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

; ; .

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.12.

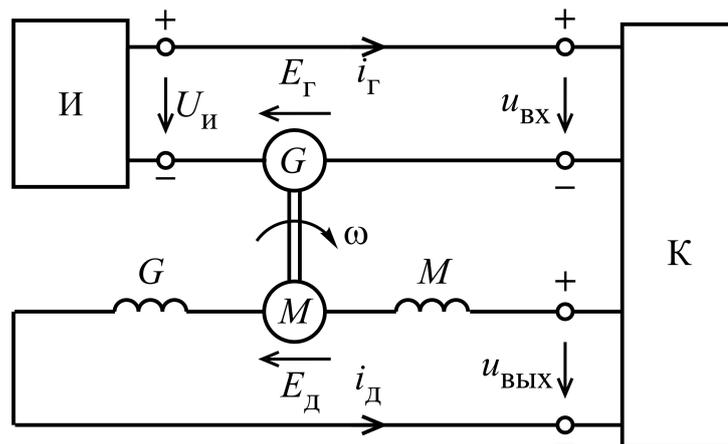


Рисунок 2.12 - Вариант «AJ»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

(2.91)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.10.

Вариант «BF».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.13.

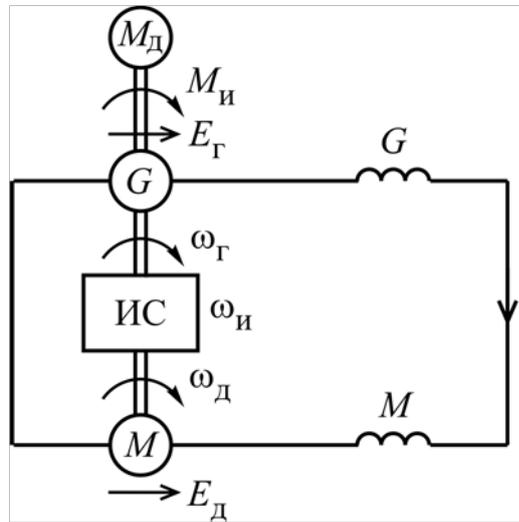


Рисунок 2.13 - Вариант «BF»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

(2.92)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

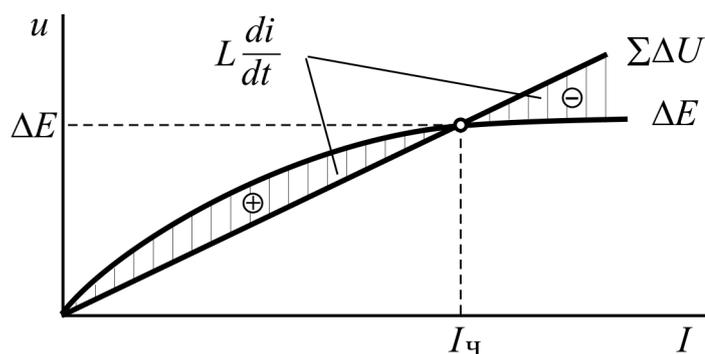


Рисунок 2.14 – Диаграммы баланса напряжений

Вариант «BG».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.15.

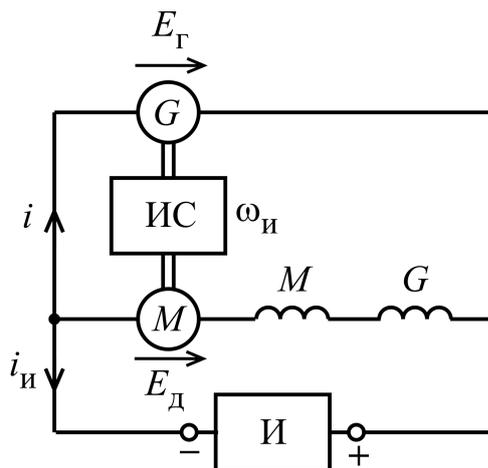


Рисунок 2.15 - Вариант «BG»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

(2.93)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «BH».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

; ; .

Схемы взаимной нагрузки, соответствующие данному варианту, приведены на рис. 2.16 и 2.17. На рис. 2.16 приведен вариант с отпиткой обмотки возбуждения генератора, а на рис. 2.17 – вариант с подпиткой обмотки двигателя. По принципам обеспечения условий взаимного нагружения данные схемы идентичны.

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данных вариантов имеет вид:

(2.94)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «BI».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

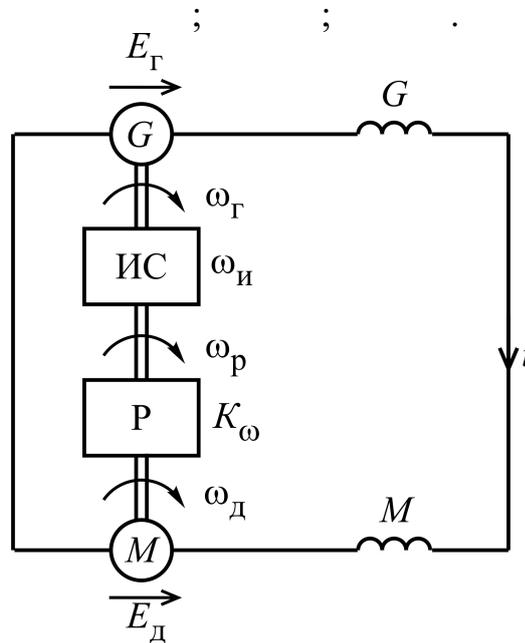


Рисунок 2.18 - Вариант «BI»

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.18.

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

$$(2.95)$$

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «BJ».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

$$; ; .$$

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.19.

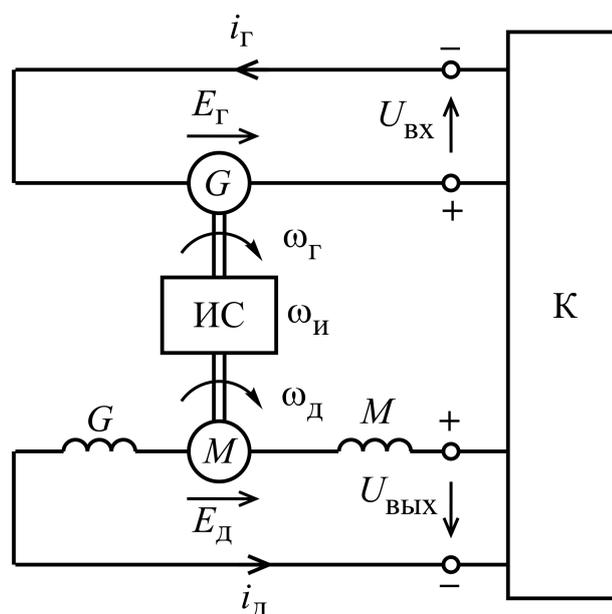


Рисунок 2.19 - Вариант «BJ»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

(2.96)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «CF».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

;

Схемы взаимной нагрузки, соответствующие данному варианту, приведены на рис. 2.20 и 2.21. На рис. 2.20 приведен вариант с отпиткой обмотки возбуждения двигателя, а на рис. 2.9 – вариант с подпиткой обмотки возбуждения генератора. По принципам обеспечения условий взаимного нагружения данные схемы идентичны.

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данных вариантов имеет вид:

(2.97)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «CG».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

$$; ; .$$

Схемы взаимной нагрузки, соответствующие данному варианту, приведены на рис. 2.22 и 2.23. На рис. 2.22 приведен вариант с отпиткой обмотки возбуждения двигателя, а на рис. 2.23 – вариант с подпиткой обмотки возбуждения генератора. По принципам обеспечения условий взаимного нагружения данные схемы идентичны.

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данных вариантов имеет вид:

(2.98)

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «DF».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

$$; ; .$$

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.24.

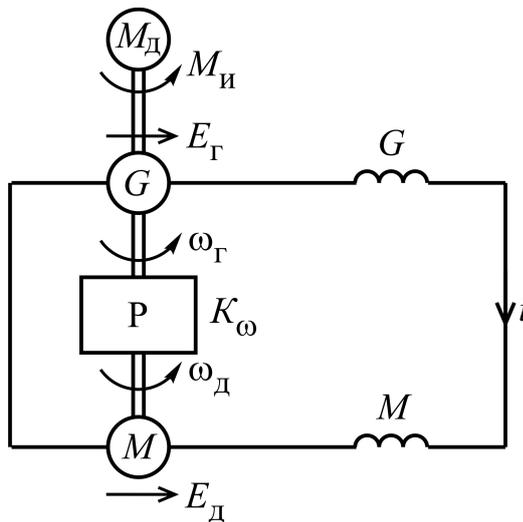


Рисунок 2.24 - Вариант «DF»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

$$(2.99)$$

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин, качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «DG».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

$$; ; .$$

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.25.

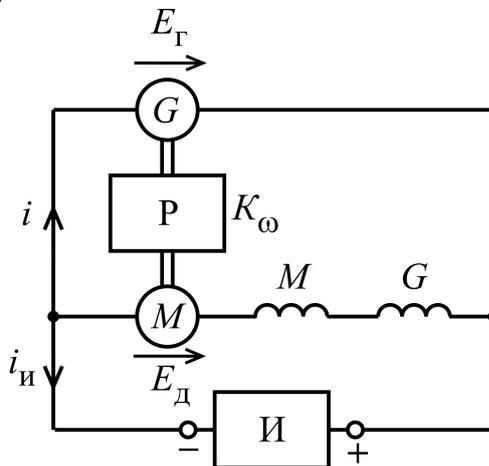


Рисунок 2.25 - Вариант «DG»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

$$(2.100)$$

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «EF».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

$$; ; .$$

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.26.

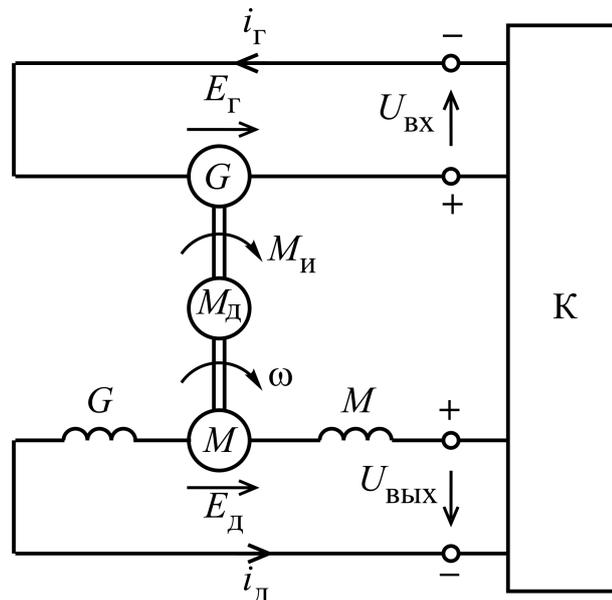


Рисунок 2.26 - Вариант «EF»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

$$(2.101)$$

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Вариант «EG».

Характеристики управляющих параметров, соответствующие режиму взаимного нагружения электромашин по варианту , имеют вид:

; ; .

Схема взаимной нагрузки, соответствующая данному варианту, приведена на рис. 2.27.

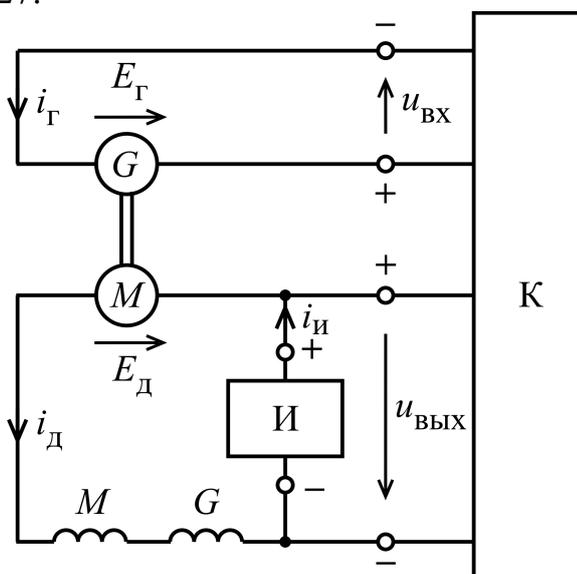


Рисунок 2.27 - Вариант «EG»

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данного варианта имеет вид:

$$(2.102)$$

Диаграммы, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей при изменении тока нагрузки испытуемых электромашин качественно соответствуют универсальным диаграммам, приведенным на рис. 2.14.

Полученные в результате анализа варианты условий взаимного нагружения тяговых электромашин могут быть использованы в качестве множества альтернатив при решении задачи выбора рациональных схем испытания электромашин.

2.6 Классификация систем взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока

Как было показано выше, существует 16 основных принципиальных вариантов обеспечения условий взаимного нагружения тяговых электромашин постоянного тока последовательного возбуждения. Каждый из этих вариантов имеет ряд возможных технических реализаций, но отличается принципами обеспечения условий протекания тока и вращения якорей испытуемых электромашин.

По принципу компенсации потерь в испытуемых электромашинах системы взаимного нагружения можно разделить на:

- системы с прямым способом компенсации потерь в испытуемых электромашинах;
- системы с косвенным способом компенсации потерь в испытуемых электромашинах.

Ко второму типу относятся системы, в которых компенсация хотя бы одного из видов потерь (электрические, холостого хода) сопровождается преобразованием добавочной мощности в одной из испытуемых электромашин.

По количеству внешних источников мощности системы взаимного нагружения можно разделить на:

- системы с одним источником мощности;
- системы с несколькими источниками мощности.

По способу обмена мощностями между испытуемыми электромашинами системы взаимного нагружения можно разделить на:

- системы без конвертирования параметров потока энергии от одной испытуемой электромашинки к другой;
- системы с конвертированием параметров потока энергии от одной испытуемой электромашинки к другой.

По виду используемых внешних источников мощности системы взаимного нагружения делятся на:

- системы с использованием источников электрической мощности;
- системы с использованием источников механической мощности;
- системы со смешанным использованием источников мощности.

По способу включения источников электрической и механической мощности системы взаимного нагружения делятся на:

- системы с последовательным включением источника (источники напряжения и момента);
- системы с параллельным включением источника (источники тока и угловой скорости);
- системы с последовательно-параллельным (смешанным) включением источников.

По способу регулирования поля в испытуемых электромашинах системы взаимного нагружения делятся на:

- системы с подпиткой обмоток возбуждения;
- системы с отпиткой обмоток возбуждения;
- системы со смешанным регулированием возбуждения.

2.7 Выводы по разделу 2

В результате исследований, проведенных во втором разделе, можно сделать следующие выводы:

–функционирование всех систем взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока основывается на общих энергетических и электро механических принципах взаимного нагружения и может рассматриваться как результат обеспечения двух независимых условий: условия протекания тока якорей и условия вращения валов испытываемых электромашин;

–полный ряд вариантов системы взаимного нагружения представляет собой множество схемных решений, в каждом из которых реализовано одно из возможных сочетаний условия протекания тока якорей и условия вращения валов испытываемых электромашин;

–система взаимного нагружения тяговых электромашин может включать в себя как один, так и два источника электрической или механической мощности, в качестве источников мощности могут быть использованы: источник напряжения, источник тока, источник момента, источник угловой скорости;

–компенсация отдельных видов потерь мощности в системах взаимного нагружения может осуществляться как прямыми, так и косвенными методами, при использовании косвенных способов компенсация потерь мощности обеспечивается за счёт небалансной электромагнитной мощности испытываемых электромашин;

–небалансная электромагнитная мощность испытываемых электромашин может создаваться за счёт разности токов их якорей, разности их магнитных потоков или разности их угловых скоростей.

РАЗДЕЛ 3

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

3.1 Принципы регулирования небалансной электромагнитной мощности взаимно нагруженных тяговых электромашин

В большинстве вариантов систем взаимного нагружения электромашин постоянного тока используется принцип компенсации одного из видов потерь (электрических, холостого хода) путем создания небалансной электромагнитной мощности испытуемых генератора и двигателя [66, 69].

Представим данную небалансную электромагнитную мощность в виде разницы [99]

$$P_{\text{неб}} = P_{\text{ген}} - P_{\text{двиг}}, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{ген}}$, $P_{\text{двиг}}$ – электромагнитные мощности испытуемых генератора и двигателя соответственно [75, 76].

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{мех}} + P_{\text{эл}}, \quad (3.2)$$

$$P_{\text{двиг}} = P_{\text{мех}} + P_{\text{эл}}, \quad (3.3)$$

где $P_{\text{мех}}$ – конструктивная постоянная однотипных испытуемых электромашин;

$P_{\text{эл}}$ – магнитные потоки генератора и двигателя соответственно;

$\omega_{\text{ген}}$, $\omega_{\text{двиг}}$ – угловые скорости вращения якорей генератора и двигателя соответственно;

$I_{\text{ген}}$, $I_{\text{двиг}}$ – токи якорей генератора и двигателя соответственно.

При механическом способе компенсации электрических потерь [50]

$$P_{\text{неб}} = P_{\text{ген}} - P_{\text{двиг}}, \quad (3.4)$$

а при электрическом способе компенсации потерь холостого хода [66]

$$P_{\text{неб}} = P_{\text{ген}} - P_{\text{двиг}}. \quad (3.5)$$

Объединив формулы (3.1)-(3.3), после ввода новых обозначений получим выражение для небалансной электромагнитной мощности в общем виде

(3.6)

где

- разница магнитных потоков генератора и двигателя;
- разница угловых скоростей валов генератора и двигателя;
- разница токов якорей генератора и двигателя.

Путем изменения в системах взаимного нагружения осуществляется регулирование либо угловой скорости валов испытуемых электромашин, либо силы тока в обмотках их якорей.

Обобщенная универсальная схема системы взаимного нагружения тяговых электромашин, позволяющая реализовать любой их способов компенсации потерь, представлена на рис. 3.1.

Обмотка якоря электромашин, испытуемой в режиме генератора, соединена последовательно с источником электрической мощности И1 (вольтодобавка) и подключена к входу конвертора напряжения (тока) К. К выходу конвертора К подключены соединенные последовательно: обмотка якоря электромашин, испытуемой в режиме двигателя, и обмотки возбуждения испытуемых электромашин и .

Параллельно с выходом конвертора К включен источник электрической мощности И2. Параллельно каждой из обмоток возбуждения и подключены регуляторы поля РП1 и РП2 соответственно [68]. Регуляторы поля позволяют осуществлять отпитку - подпитку обмоток возбуждения. Валы испытуемых электромашин соединены между собой через редуктор Р (вариатор) и источник угловой скорости ИС (добавка скорости). Дополнительно к валу испытуемого генератора подсоединен двигатель M_d (источник момента).

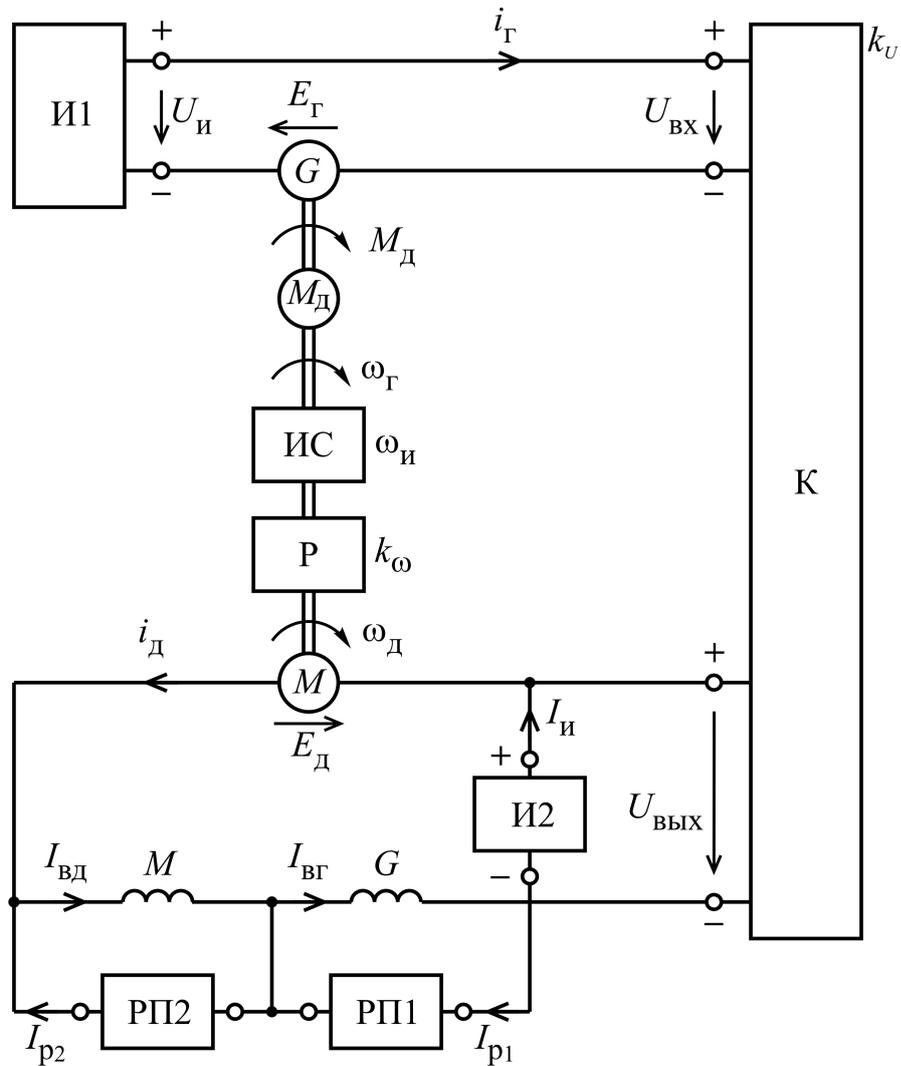


Рисунок 3.1 - Универсальная схема системы взаимного нагружения

Разница угловых скоростей валов испытуемых электромашин [67]

$$, \quad (3.7)$$

где $\omega_{И}$ – добавка угловой скорости источника ИС;
 k_{ω} – коэффициент передачи угловой скорости редуктора Р.

$$. \quad (3.8)$$

Разница токов якорей испытуемых электромашин [67]

$$, \quad (3.9)$$

где $I_{И2}$ – сила тока источника И2;
 k_U – коэффициент передачи напряжения конвертора К.
 Разница магнитных потоков испытуемых электромашин [68]

$$, \quad (3.10)$$

где I_g, I_m – токи возбуждения генератора и двигателя соответственно.

$$;$$

$$,$$

где I_{r1}, I_{r2} – токи регуляторов поля РП1 и РП2 соответственно.

Для удобства пользования уравнением (3.6) имеет смысл выразить значение I_{r1} либо только через параметры испытуемого двигателя (R_m, L_m, σ_m), либо только через параметры испытуемого генератора (R_g, L_g, σ_g). При этом уравнение (3.6) может быть представлено в двух видах [99]:

$$; \quad (3.11)$$

$$. \quad (3.12)$$

Небалансная э. д. с. испытуемых генератора и двигателя, приведенная к цепи якорной обмотки генератора, может быть выражена как

$$, \quad (3.13)$$

где E_g, E_m – э. д. с. генератора и приведенная э. д. с. двигателя соответственно.

Приведенное значение э. д. с. двигателя в общем виде может быть выражено как

$$, \quad (3.14)$$

где E_m – э. д. с. испытуемого двигателя.

$$; \quad (3.15)$$

Небалансный электромагнитный момент испытуемых генератора и двигателя, приведенный к валу двигателя, может быть выражен как

$$M_{\text{небаланс}} = M_{\text{двигателя}} - M_{\text{генератора}}, \quad (3.16)$$

где $M_{\text{двигателя}}$, $M_{\text{генератора}}$ – электромагнитный момент двигателя и приведенный электромагнитный момент генератора.

Приведенный электромагнитный момент генератора можно представить в виде

$$M_{\text{генератора}} = M_{\text{генератора}} \cdot \frac{1}{k_{\text{ген}}}, \quad (3.17)$$

где $M_{\text{генератора}}$ – электромагнитный момент испытуемого генератора.

$$M_{\text{генератора}} = \frac{1}{k_{\text{ген}}} \cdot M_{\text{генератора}}, \quad (3.18)$$

$$M_{\text{генератора}} = \frac{1}{k_{\text{ген}}} \cdot M_{\text{генератора}}. \quad (3.19)$$

При механическом способе компенсации электрических потерь [100] регулирование небалансной электромагнитной мощности сводится к регулированию небалансной э. д. с. и, как следствие, тока. Эти параметры связаны между собой уравнением [98]

$$U_{\text{ген}} = U_{\text{двигателя}} + \Delta E, \quad (3.20)$$

где $R_{\text{э}}$, $L_{\text{э}}$ – эквивалентные, приведенные к цепи генератора активное сопротивление и индуктивность электрического контура соответственно.

Структурная схема регулирования тока представлена на рис. 3.2.

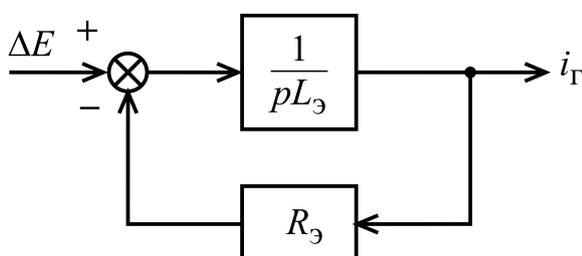


Рисунок 3.2 - Структурная схема регулирования тока

В стационарном режиме

$$(3.21)$$

При электрическом способе компенсации потерь холостого хода [101] регулирование небалансной электромагнитной мощности сводится к регулированию небалансного электромагнитного момента и, как следствие, угловой скорости и напряжений на испытуемых электромашинах. Эти параметры связаны между собой уравнением [74]

$$(3.22)$$

где $\Delta M_{эм}$, $J_{э}$ – потери момента холостого хода в стенде и эквивалентный момент инерции, приведенные к валу испытуемого двигателя.

Структурная схема регулирования угловой скорости представлена на рис. 3.3.

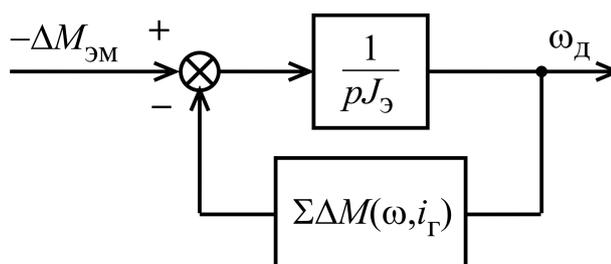


Рисунок 3.3 - Структурная схема регулирования угловой скорости

Момент сопротивления для каждой из электромашин являются функцией угловой скорости и магнитного потока [19, 80, 81]. Магнитный поток в каждой из электромашин определяется током возбуждения, зависящим от тока нагрузки .

$$(3.23)$$

В стационарном режиме

$$(3.24)$$

где $f(\omega)$ – функция, обратная .

Полученные в результате анализа зависимости являются универсальными для вариантов схем систем взаимного нагружения, в которых используются косвенные методы компенсации либо электрических потерь, либо потерь холостого хода.

3.1.1 Регулирование небалансного электромагнитного момента испытуемых электромашин

В общем виде небалансный электромагнитный момент может быть представлен виде [99]

$$\dots \quad (3.25)$$

Создание небалансного электромагнитного момента испытуемых электромашин используется в системах взаимного нагружения с электрическим способом компенсации потерь холостого хода. Поэтому можно считать, что небалансный электромагнитный момент по формуле (3.25) для данных систем взаимного нагружения всегда положительный.

Выразив электромагнитные моменты двигателя и генератора через магнитные потоки и токи, после преобразований получим

$$\dots \quad (3.26)$$

Рассмотрим возможные способы регулирования величины путём изменения параметров регуляторов и преобразователей системы взаимного нагружения.

В качестве факторов, определяющих величину , будем рассматривать: разность магнитных потоков , разность токов якорей и коэффициент передачи угловой скорости .

;

;

.

Уравнение баланса моментов в статическом режиме для всех схем взаимной нагрузки с таким способом компенсации потерь холостого хода будет иметь вид [74]

,

где – суммарные потери момента, обусловленные вращением якорей испытуемых электромашин (потерями холостого хода).

Рассмотрим вариант регулирования магнитных потоков, при котором: путём изменения разности

Тогда выражение (3.26) может быть преобразовано к виду

При постоянном токе якорей испытываемых электромашин ()
зависимость является прямо пропорциональной. Графически
характер зависимости для различных значениях
стабилизированного тока якорей приведен на рис. 3.4.

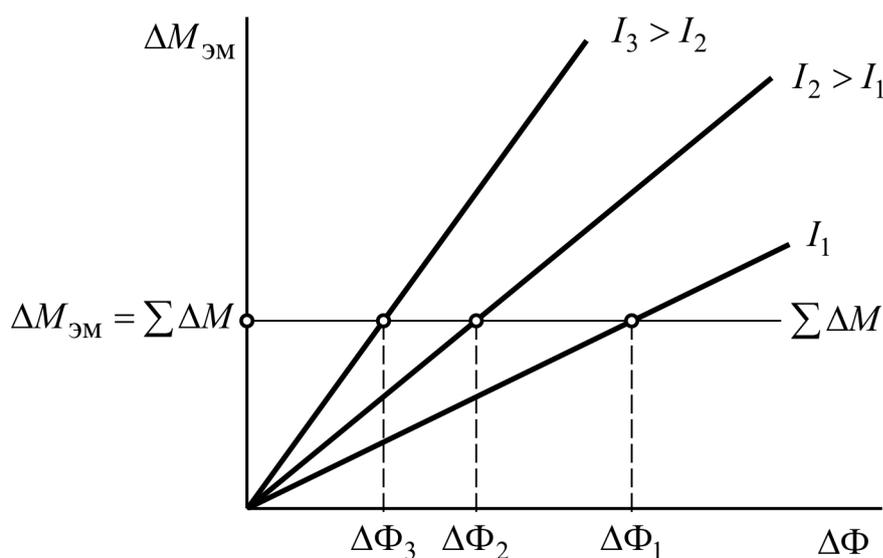


Рисунок 3.4 - Характер зависимости

Из рис. 3.4 видно, что при большем токе нагрузки испытываемых электромашин для компенсации заданной суммы потерь моментов требуется меньшее значение разности магнитных потоков.

Рассмотрим вариант регулирования токов якорей, при котором: путём изменения разности

В данном варианте регулирования условие принято их тех же соображений, что и при рассмотрении варианта с регулированием путем изменения . То есть, рассматриваем случай с расхождением магнитных характеристик испытуемого двигателя и генератора.

Тогда выражение (3.26) может быть записано в виде

После преобразований это же выражение можно записать в двух видах:

;

Для случая совпадения магнитных характеристик ()

Графики характеристики для условия и представлены на рис. 3.5.

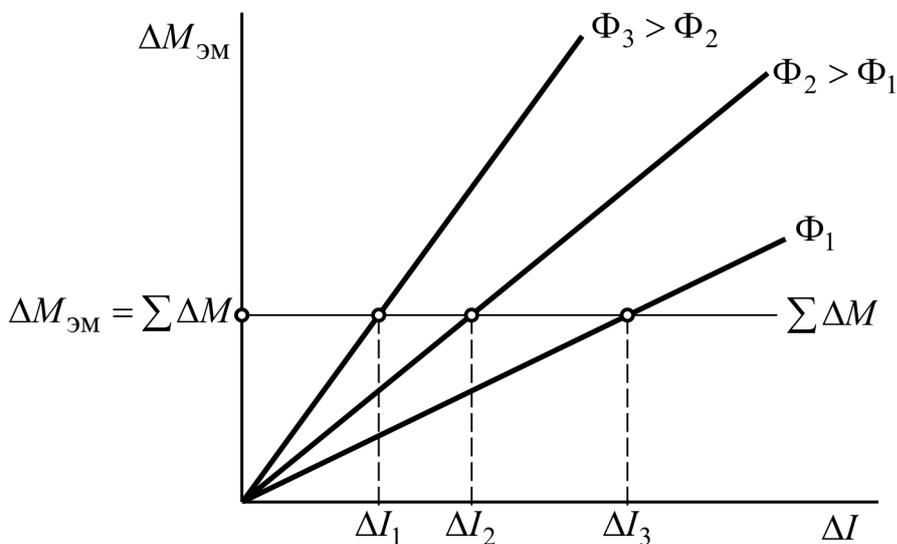


Рисунок 3.5 – Характер зависимости

При зависимости — прямо пропорциональная. При зависимости является линейной. На рис. 3.6 показан характер зависимости для трех условий:

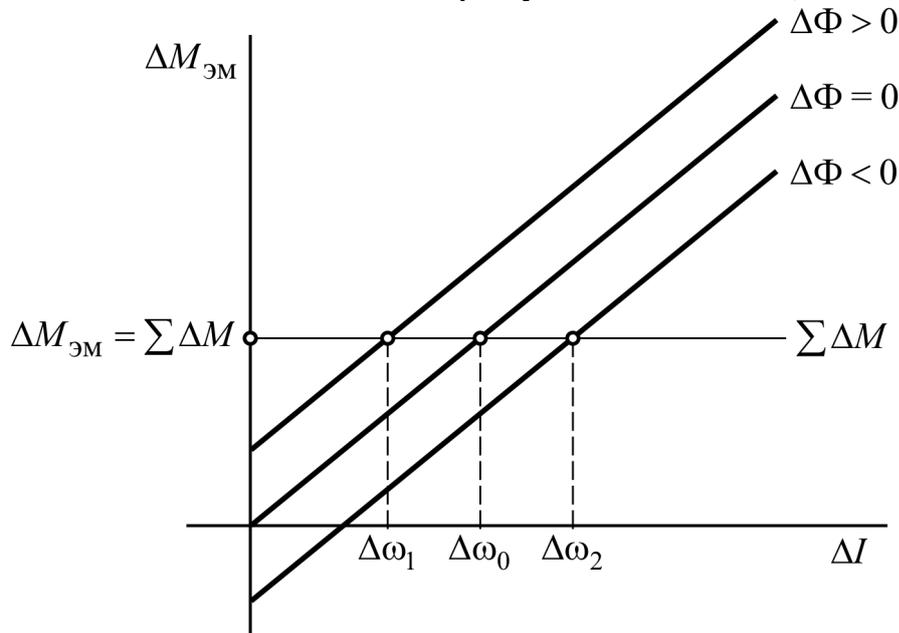


Рисунок 3.6 – Характер зависимости

Как видно из графиков на рис. 3.6, при отрицательной разности магнитных потоков испытуемых электромашин () для создания заданного значения требуется разность токов , большая, чем при совпадении магнитных характеристик (). При положительной разности необходимое значение меньше, чем при .

Рассмотрим вариант регулирования путём изменения коэффициента передачи угловой скорости, при котором:

Условие принято в данном варианте регулирования из тех же соображений, что и в предыдущем – при регулировании .

Выражение (3.26) для данного условия будет иметь вид

После преобразований получим это же выражение в виде

При совпадении магнитных характеристик испытываемых электромашин

Качественно характеристики для условия и представлены на рис. 3.7.

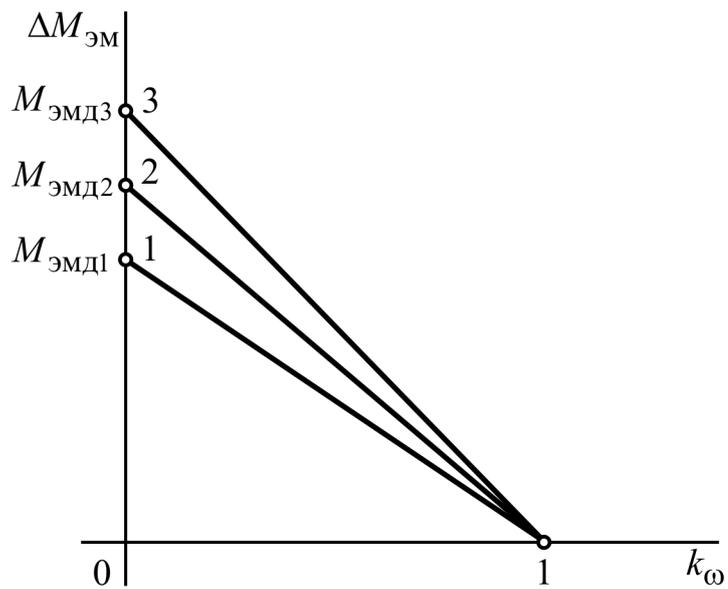


Рисунок 3.7 – Характер зависимости

В рассматриваемых вариантах систем взаимного нагружения коэффициент передачи угловой скорости всегда меньше единицы [69].

На рис. 3.8 качественно представлен характер зависимости для случая расхождения магнитных характеристик испытываемых электромашин ().

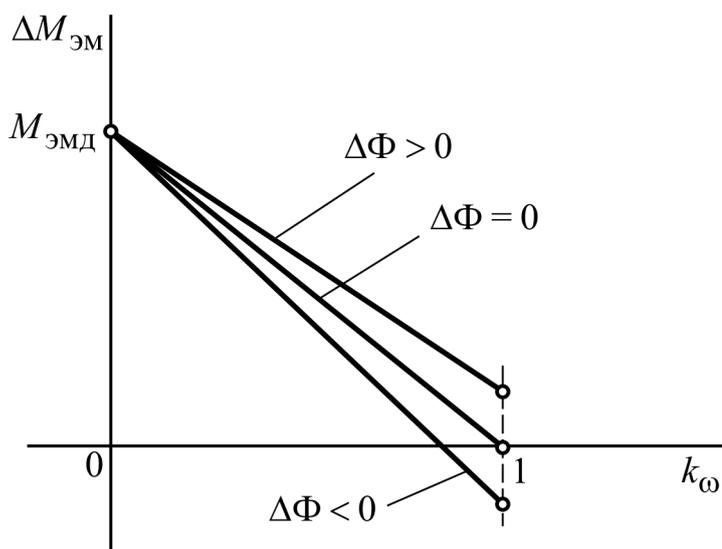


Рисунок 3.8 - Характер зависимости

Как видно из графиков на рис. 3.8, при отрицательной разности магнитных потоков испытуемых электромашин () для создания заданного значения небалансного электромагнитного момента требуется коэффициент передачи угловой скорости , меньший, чем при совпадении магнитных характеристик (). При положительной разности необходимое значение больше, чем при .

3.1.2 Регулирование небалансной э. д. с. испытуемых электромашин

В общем виде небалансная э. д. с. может быть представлена как

$$(3.27)$$

Учитывая то, что создание небалансной э. д. с. используется для компенсации электрических потерь источником механической мощности, можно считать, что по формуле (3.27) всегда положительна.

Выразив э. д. с. генератора и двигателя через магнитные потоки и угловые скорости, после преобразований получим

$$(3.28)$$

Рассмотрим возможные способы регулирования величины изменением параметров преобразователей системы взаимного нагружения.

В качестве параметров, определяющих величину , будем рассматривать: разность магнитных потоков , разность угловых скоростей и коэффициент передачи напряжения конвертора .

Данные параметры определяются выражениями:

$$,$$

$$;$$

$$,$$

где U_1 и U_2 – напряжения на испытуемом двигателе и генераторе соответственно.

Уравнение баланса напряжений в статическом режиме для всех схем с таким способом компенсации электрических потерь будет иметь вид

$$,$$

где ΔU_{Σ} – суммарное падение напряжения в контуре тока нагрузки испытуемых электромашин.

Проведём анализ характера регулирования небалансной э. д. с. изменением каждого из упомянутых параметров отдельно.

Рассмотрим вариант регулирования U_2 путём изменения разности магнитных потоков, при котором:

Тогда выражение (3.28) может быть преобразовано к виду

$$.$$

При постоянной частоте вращения испытуемых электромашин ($\omega = \text{const}$) зависимость U_2 является прямо пропорциональной.

Графически характер зависимостей U_2 при различных значениях стабилизированной угловой скорости ω приведен на рис. 3.9.

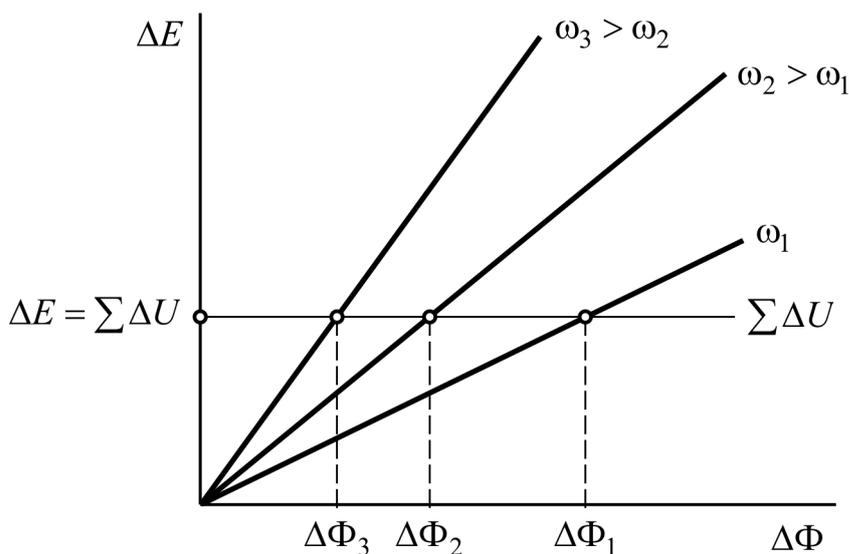


Рисунок 3.9 - Характер зависимостей

Из рис. 3.9 видно, что при большем значении угловой скорости для компенсации заданного значения требуется меньшее значение разности магнитных потоков.

Рассмотрим вариант регулирования путём изменения разности угловых скоростей, при котором:

В данном варианте принято условие . Отметим, что в реальных условиях достаточно часто наблюдается расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин и условие является частным для любого варианта регулирования режимом взаимного нагружения.

Тогда выражение (3.28) может быть записано в виде

$$(3.29)$$

После преобразования это же выражение можно записать в двух видах:

;

Для случая совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин ()

Графически характеристики для условия и представлены на рис. 3.10.

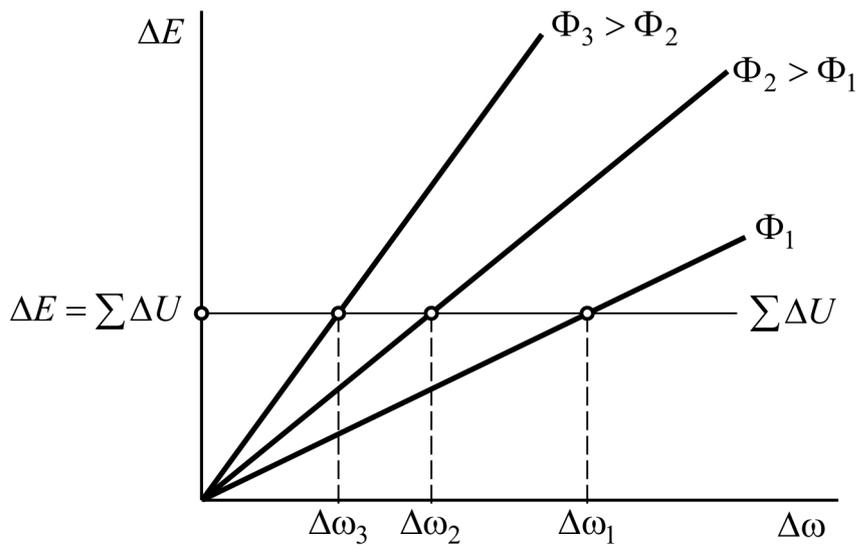


Рисунок 3.10 – Характер зависимости для

При зависимости – прямо пропорциональна. При зависимости является линейной. На рис. 3.11 показан характер зависимости для трех условий: ; ; .

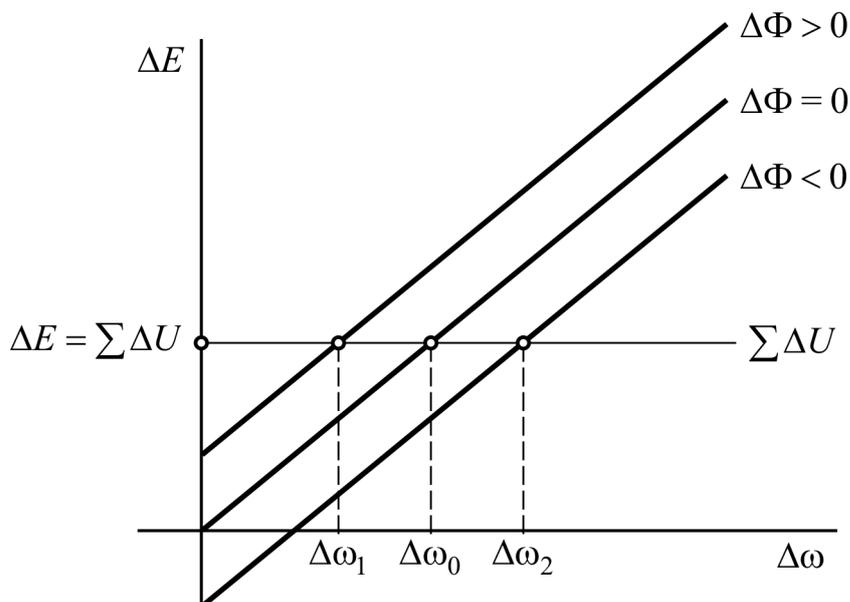


Рисунок 3.11 – Характер зависимости для

Как видно из графиков на рис. 3.11, при отрицательной разности магнитных потоков испытуемых электромашин () для создания заданного значения разности э. д. с. требуется разность угловых скоростей , большая, чем для случая совпадения магнитных характеристик (). При положительной разности необходимое значение меньше, чем при .

Рассмотрим вариант регулирования путём изменения коэффициента передачи напряжения, при котором:

В данном варианте условие принято их тех же соображений, что и в предыдущем – при регулировании .

Выражение (3.28) для данного условия будет иметь вид

После преобразований получим это же уравнение в виде

Для случая совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин

Качественно характеристики для условия и представлены на рис. 3.12.

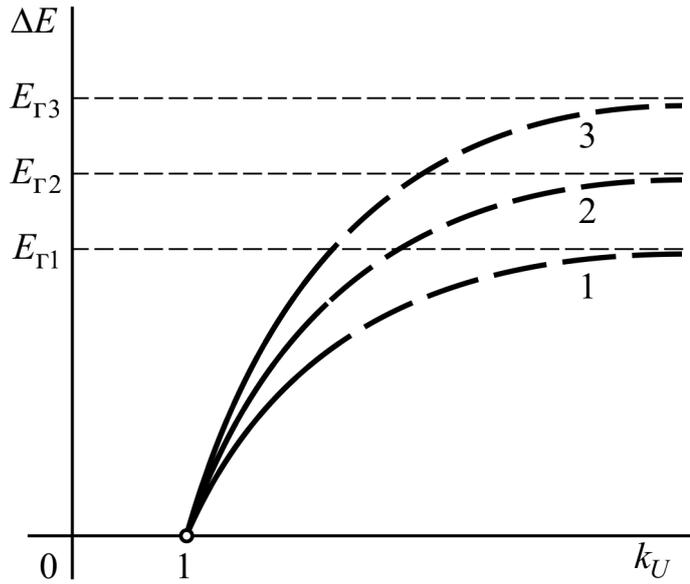


Рисунок 3.12 – Характер зависимости для

В рассматриваемых вариантах систем взаимного нагружения коэффициент передачи напряжения всегда больше единицы.

На рис. 3.13 качественно представлен характер зависимости для случая расхождения магнитных характеристик испытуемых электромашин ().

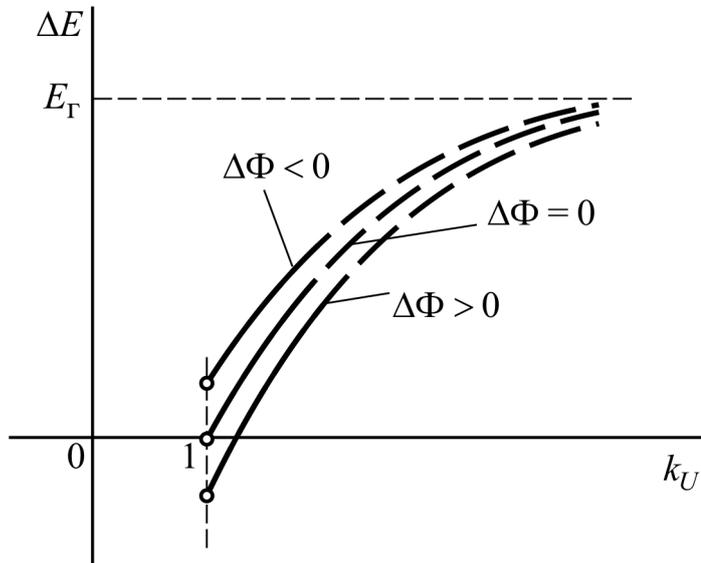


Рисунок 3.13 – Характер зависимости для

Как видно из графиков на рис. 3.13, при отрицательной разности магнитных потоков испытуемых электромашин () для создания заданного значения небалансной э. д. с. требуется коэффициент передачи напряжения , больший, чем для случая совпадения магнитных характеристик (). При положительной разности необходимое значение

меньше, чем при .

3.2 Определение основных характеристик управления режимом взаимного нагружения тяговых электромашин

3.2.1 Регулирование разности токов испытываемых электромашин

Разность токов якорей испытываемых электромашин создаётся в системах взаимного нагружения для обеспечения небалансного электромагнитного момента , компенсирующего суммарный тормозной момент , обусловленный потерями холостого хода .

Принципиально возможны два способа создания разницы токов : путем подпитки обмотки якоря испытываемого двигателя параллельным источником электрической мощности и с помощью конвертирования тока испытываемого генератора конвертором постоянного напряжения [67].

Величина разности может быть выражена через ток генератора в виде

С другой стороны, через ток двигателя эта же разность может быть выражена как

Изменение тока параллельного источника. Рассмотрим вариант регулирования , при котором:

Для данного варианта регулирования

К данному варианту относятся схемы с параллельным источником электрической мощности [69].

Параллельный источник электрической мощности может работать как источником тока, так и источником напряжения. В первом случае за счёт обратной связи по току обеспечивается стабилизация тока испытываемого двигателя, а во втором – за счёт обратной связи по напряжению – стабилизация напряжения.

При стабилизации тока его величина определяет установившееся значение угловой скорости вращения испытуемых электромашин, от которой зависят потери холостого хода и тормозной момент, а при условии и напряжение на испытуемых электромашинах. Регулирование тока при этом осуществляется путем изменения управляющих координаты на выходе задатчика тока.

При нормальной работе системы автоматического регулирования электрические процессы в паре двигатель-генератор на величину не влияют.

При стабилизации напряжения на выходе параллельного источника электрической мощности величина тока определяется самим напряжением, скоростной характеристикой, током нагрузки () и характеристиками холостого хода.

Характер зависимости при стабилизированном значении тока нагрузки () приведен графически на рис. 3.14.

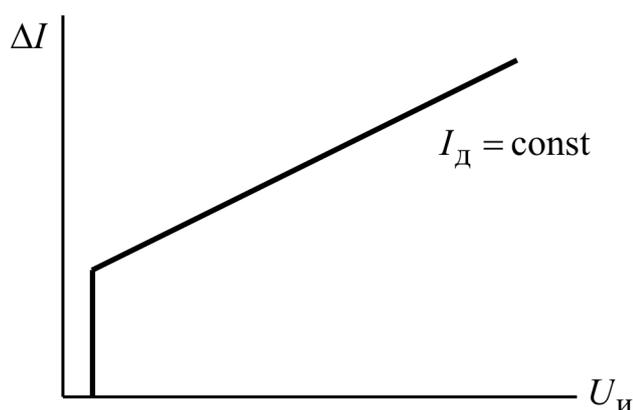


Рисунок 3.14 - Характер зависимости

При угловая скорость и разность создает небалансный электромагнитный момент, который компенсирует момент сопротивления, обусловленный механическими потерями. При росте увеличивается угловая скорость ω и, соответственно, магнитные потери. Разность увеличивается с ростом автоматически, обеспечивая рост величины, который при компенсирует момент сопротивления, обусловленный и механическими и магнитными потерями.

Изменение коэффициента передачи напряжения конвертора.

Рассмотрим вариант регулирования, при котором:

Для данного варианта регулирования

к данному варианту относятся схемы в понижающем конверторе напряжения () [67].

Характер зависимости при стабилизированном токе нагрузки () представлен графически на рис. 3.15.

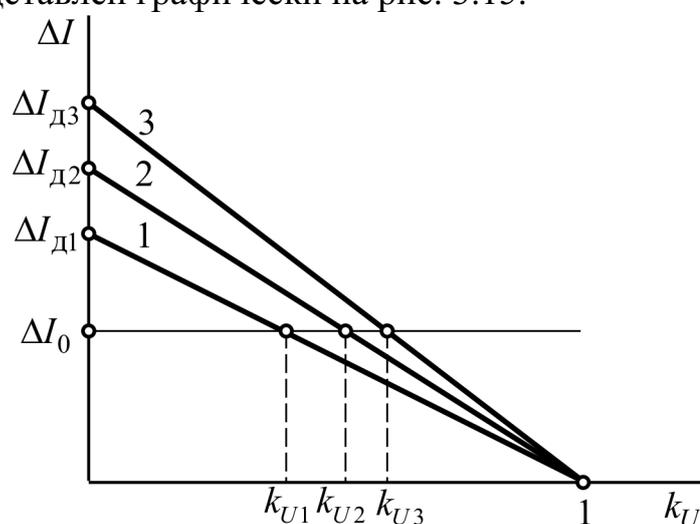


Рисунок 3.15 - Характер зависимости

На рис. 3.15 приведены характеристики для трёх различных значений тока нагрузки: . Из графиков видно, что для создания заданного значения разности токов при большем значении тока нагрузки требуется большее значение коэффициента передачи напряжения . При малых токах нагрузки значение будет меньшим.

3.2.2 Регулирование разности угловых скоростей испытуемых электромашин

Создание разности угловых скоростей испытуемых электромашин используется в системах взаимного нагружения для обеспечения небалансной электродвижущей силы, компенсирующей суммарное падение напряжения в контуре тока нагрузки , то есть для компенсации электрических потерь .

Принципиально возможны два способа создания разницы угловых скоростей : путем использования источника угловой скорости (добавки угловой скорости) и с помощью вариатора (редуктора) [67].

Величина разности может быть выражена через угловую скорость двигателя в виде

С другой стороны, через угловую скорость вала генератора разность может быть выражена как

Изменение добавки угловой скорости источника угловой скорости. Рассмотрим вариант регулирования , при котором:

Для данного варианта регулирования

К данному варианту относятся схемы с источников угловой скорости. Источник угловой скорости по своей сути является механически м аналогом параллельного источника электрической мощности при его работе, как источника тока.

При стабилизации угловой скорости её величина определяет установившееся значение тока нагрузки испытуемых электромашин, от которого зависит суммарное падение напряжения в цепи , электрические потери , а при условии и напряжение на испытуемых электромашинах.

Регулирование добавки угловой скорости при такой стабилизации может осуществляться путём изменения управляющей координаты на выходе задатчика угловой скорости (добавки). При таком автоматическом регулировании электромеханические процессы в паре двигатель-генератор на величину не влияет.

Изменение коэффициента передачи угловой скорости. Рассмотрим вариант регулирования , при котором:

Для данного варианта регулирования

;

или

К данному варианту относятся схемы с повышающим вариатором (редуктором) при ().

Характер зависимости при стабилизированной угловой скорости () представлен на рис. 3.16.

На рисунке приведены характеристики для трёх различных значениях угловой скорости: . Из графиков видно, что для создания заданного значения разности угловых скоростей при большем значении требуется более низкое значение коэффициента передачи угловой скорости . При малых угловых скоростях значение требуется большее.

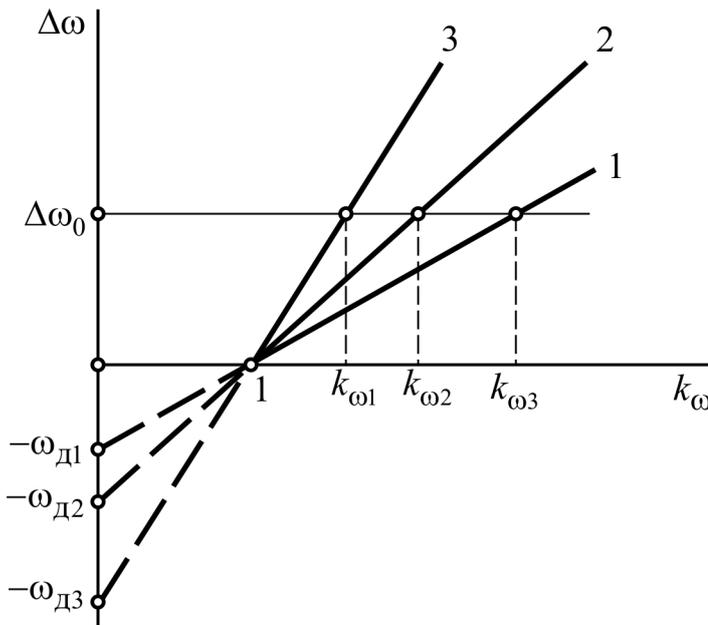


Рисунок 3.16 - Характер зависимости

3.2.3 Регулирование разности магнитных потоков испытуемых электромашин

При создании небалансной электромагнитной мощности путём регулирования магнитных потоков испытуемых электромашин целесообразно обеспечение условий равенства их частот вращения и токов якорей [68]:

$$; \quad (3.30)$$

$$. \quad (3.31)$$

При этих условиях

$$, \quad (3.32)$$

где $\Delta \Phi$ – разница магнитных потоков генератора и двигателя.

Универсальная схема взаимного нагружения, с помощью которой могут быть реализованы рассматриваемые принципы компенсации потерь, приведена на рис. 3.17.

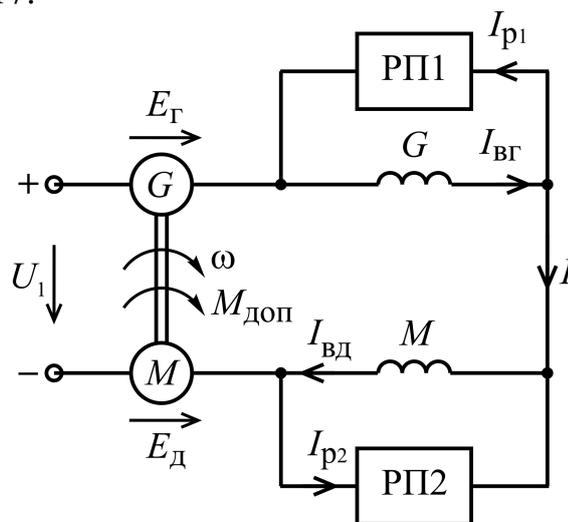


Рисунок 3.17 - Универсальная схема взаимного нагружения с регулированием разности магнитных потоков

Валы испытуемых генератора и двигателя соединены между собой механически. Обмотки якорей и возбуждения электромашин соединены в общую электрическую цепь последовательно.

К схеме подведено внешнее напряжение электрического источника.

К валам испытуемых электромашин приложен дополнительный момент механического источника. Сами источники электрической и механической мощности на схеме не показаны.

При электрическом способе компенсации потерь холостого хода:

$$; \quad [101]. \text{ При механическом способе компенсации}$$

электрических потерь: ; [100]. В принципе возможен и смешанный способ: ; , который является нецелесообразным [99].

Параллельно обмотке возбуждения генератора подключен регулятор поля РП1, а параллельно обмотке возбуждения двигателя – регулятор поля РП2. Токи возбуждения , , токи регуляторов поля , и ток якорей электромашин связаны между собою уравнениями Кирхгофа:

$$; \quad (3.33)$$

$$. \quad (3.34)$$

Положительные направления токов и соответствуют режиму подпитки обмоток возбуждения от регуляторов РП1 и РП2. По схеме, приведенной на рис. 3.17, возможны четыре основных условия создания небалансной электромагнитной мощности, каждому из которых будет соответствовать свой режим регулирования поля испытуемых электромашин.

Режим 1:

$$(3.35)$$

Режим 2:

$$(3.36)$$

Режим 3:

$$(3.37)$$

Режим 4:

$$(3.38)$$

Режимы 1 и 2 являются реализацией электрического, а режимы 3 и 4 – механического способов компенсации потерь мощности в стенде.

Режимы 1 и 3 реализуются подпиткой, а режимы 3 и 4 – отпиткой обмотки возбуждения одной из испытуемых электромашин.

Проведём качественный анализ двух основных вариантов регулирования поля без рассмотрения конкретных способов технических реализацией этих вариантов.

Вариант 1. Рассмотрим регулирование поля при постоянстве отношения тока возбуждения к току якоря . Назовём это отношение коэффициентом возбуждения .

$$\dots \quad (3.39)$$

Для режима подпитки обмотки возбуждения , для режима отпитки – . При токе регулятора поля, равном нулю, .

Будем считать известной зависимость магнитного потока электромашин последовательного возбуждения от тока якоря [102] при условии равенства тока возбуждения току якоря ().

Тогда в общем случае зависимость магнитного потока электромашин от тока якоря для режимов, при которых , будет иметь вид

$$\dots \quad (3.40)$$

Разница магнитных потоков генератора и двигателя в общем виде будет определяться как

$$\dots \quad (3.41)$$

где , – коэффициенты возбуждения генератора и двигателя соответственно.

$$\dots ; \quad (3.42)$$

$$\dots \quad (3.43)$$

На рис. 3.18 зависимости разности магнитных потоков электромашин от тока якоря приведены в графическом виде. Кривая соответствует режиму (регулятор отключен), кривая – режиму (подпитка), а кривая – режиму (отпитка). Кривые и

представляют собой множество точек кривой , смещённых влево и вправо соответственно, с изменением абсциссы в раз.

На этом же рис. 3.18 приведены кривые зависимости , качественно соответствующие четырем режимам регулирования поля:

(режим 1); (режим 2); (режим 3); (режим 4).

Экстремум функции может быть найден из условия

(3.44)

или с учетом выражения для (3.41)

(3.45)

Количественная оценка зависимости требует либо табличной, либо аналитической формы записи характеристики .

Известен целый ряд аналитических выражений кривой намагничивания электрических машин, наилучшее приближение из которых дает выражение [103]

(3.46)

где , – постоянные коэффициенты.

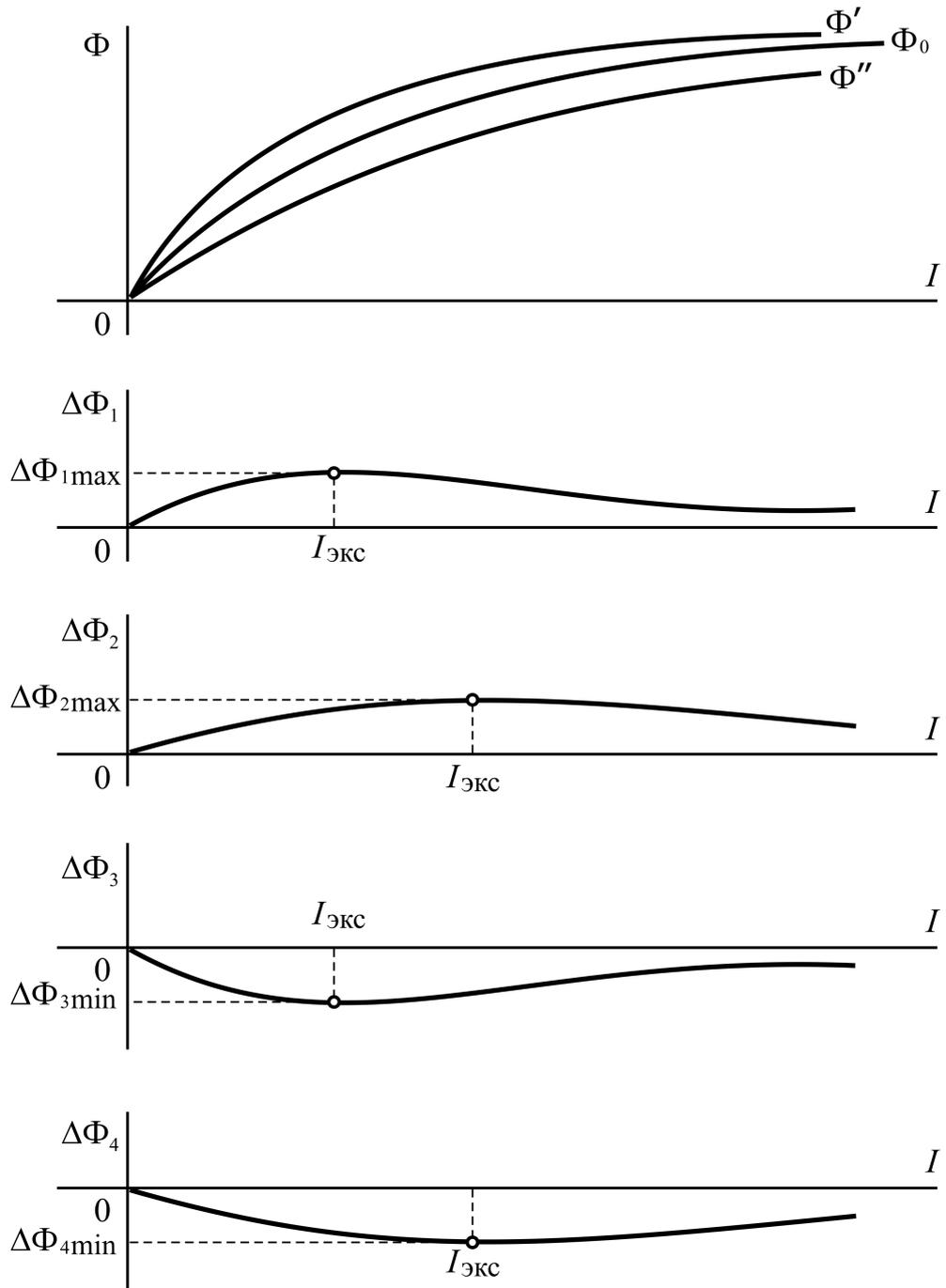


Рисунок 3.18 – Характер зависимостей разности магнитных потоков
взаимно нагруженных электромашин от тока якоря
для случая

С учётом (3.46) выражение (3.41) принимает вид

$$\dots \quad (3.47)$$

Используя выражение (3.45), найдем точку экстремума [103] функции в общем виде:

$$\dots ; \quad (3.48)$$

$$\dots \quad (3.49)$$

При условии (режимы 1 и 4):

$$\dots ; \quad (3.50)$$

$$\dots \quad (3.51)$$

При условии (режимы 2 и 3):

$$\dots ; \quad (3.52)$$

$$\dots \quad (3.53)$$

Необходимо отметить, что при определённых параметрах испытуемых электромашин система взаимного нагружения с механическим способом компенсации электрических потерь на интервале изменения тока $[0 ; \dots)$ может быть электрически неустойчивой.

Вариант 2. Рассмотрим регулирование поля при постоянстве разницы тока возбуждения и тока якоря. Эта разница представляет собой ток регулятора поля

$$\dots \quad (3.54)$$

Для режима подпитки обмотки возбуждения $I_{\text{в}}$, для режима отпитки – $I_{\text{от}}$. При отключенном регуляторе поля – $I_{\text{в}} = I_{\text{от}}$. Также как и в первом варианте будем считать известной зависимость Φ , соответствующую условию $\Phi = \Phi_{\text{н}}$.

В общем случае зависимость магнитного потока Φ электромашины от тока якоря $I_{\text{я}}$ для режимов, при которых $I_{\text{в}} \neq I_{\text{от}}$, будет иметь вид

$$\Phi = \Phi_{\text{н}} + \Delta\Phi \quad (3.55)$$

Разница магнитных потоков генератора и двигателя в общем виде будет определяться как

$$\Delta\Phi = \Phi_{\text{г}} - \Phi_{\text{д}} \quad (3.56)$$

На рис. 3.19 зависимости магнитного потока от тока якоря приведены в графическом виде. Кривая $\Phi_{\text{г}}$ соответствует режиму $I_{\text{в}} = I_{\text{от}}$ (регулятор отключен), кривая $\Phi_{\text{д}}$ – режиму $I_{\text{в}} = I_{\text{от}}$ (подпитка), кривая $\Phi_{\text{г}}$ – режиму $I_{\text{в}} \neq I_{\text{от}}$ (отпитка).

Кривые $\Phi_{\text{г}}$ и $\Phi_{\text{д}}$ представляют собой множество точек кривой $\Phi = \Phi_{\text{н}}$, смещённых влево и вправо соответственно на величину $\Delta\Phi$.

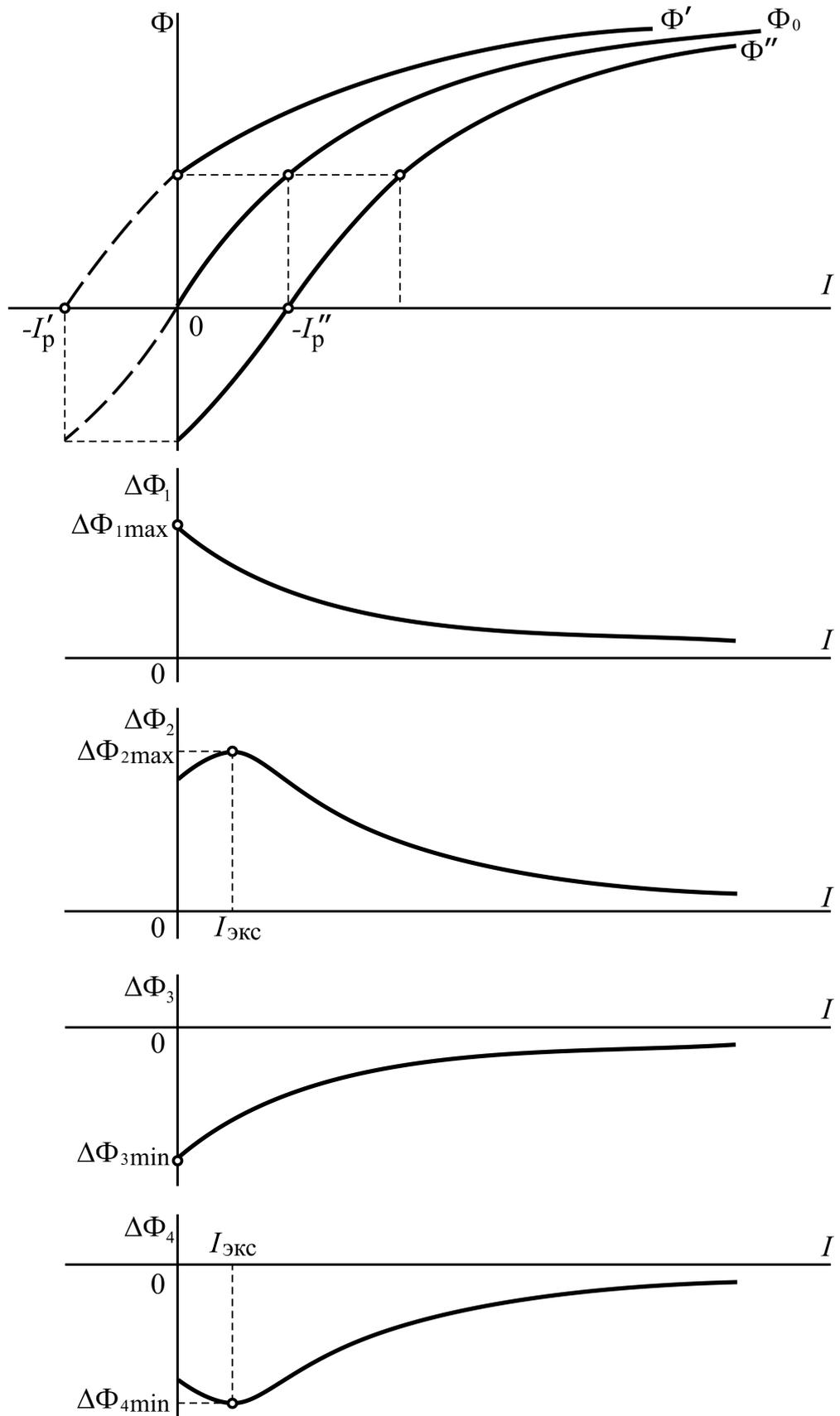


Рисунок 3.19 – Характер зависимостей разности магнитных потоков взаимно нагруженных электромашин от тока якоря для случая

На этом же рис. 3.19 приведены кривые зависимости ,
качественно соответствующие четырём режимам регулирования поля:

(режим 1); (режим 2); (режим 3); (режим 4
).

Экстремум функции может быть найден из условия

$$(3.57)$$

или с учетом выражения для

$$(3.58)$$

Экстремумы функций и находятся вне границ
отрезка изменения тока , обеспечивающего взаимного нагрузку
электромашин. Максимальное значение и минимальное на отрезке
(режимы 1 и 3):

$$; (3.59)$$

$$. (3.60)$$

Для анализа зависимости будем использовать ту же
аналитическую зависимость , что и в первом варианте.
Тогда

Из условия (3.44), используя выражение (3.58), найдем точку
экстремума функции в общем виде:

$$; (3.61)$$

$$. (3.62)$$

Для режима 1 (;):

$$\dots \quad (3.63)$$

Для режима 3 (;):

$$\dots \quad (3.64)$$

Для режима 2 (;):

$$\dots ; \quad (3.65)$$

$$\dots \quad (3.66)$$

Для режима 4 (;):

$$\dots ; \quad (3.67)$$

$$\dots \quad (3.68)$$

Достаточный практический интерес представляет собой возможность определения значений коэффициентов и (вариант 1) или токов , (вариант 2), обеспечивающих заданную небалансную электромагнитную мощность или разницу потоков .

Решая уравнение (3.47) относительно при условии и относительно при условии , получим:

$$\dots ; \quad (3.69)$$

$$\dots \quad (3.70)$$

Решая уравнение (3.60) относительно \dots при условии \dots и относительно \dots при условии \dots , получим:

$$\dots; \quad (3.71)$$

$$\dots \quad (3.72)$$

Анализ процесса регулирования небалансной электромагнитной мощности испытуемых электромашин наиболее удобно вести с использованием удельной э. д. с. \dots , чем самого магнитного потока \dots . В первом случае нет необходимости в определении конструктивной постоянной испытуемых электромашин. Введем обозначение для удельной э. д. с.

$$\dots, \quad (3.73)$$

где \dots – э. д. с. вращения электрической машины.

Аналитическое описание зависимости \dots в соответствии с (3.46) будет иметь вид

$$\dots, \quad (3.74)$$

где \dots .

В практических расчетах нет необходимости в расчёте \dots и \dots . Для каждого типа электрической машины могут быть получены значения коэффициентов \dots и \dots , обеспечивающие минимум отклонения аналитической характеристики (3.74) от реальной характеристики \dots .

При переходе от характеристики \dots к характеристике \dots

получим выражение для разницы удельных э.д.с. для

первого варианта

в виде

(3.75)

Для второго варианта
вид

. Это же выражение будет иметь

(3.76)

Тогда выражения для , и , примут вид:

; (3.77)

; (3.78)

; (3.79)

. (3.80)

Небалансная электромагнитная мощность для обоих вариантов будет определяться как

(3.81)

Небалансная удельная э. д. с. , необходимая для компенсации заданных электрических потерь механическим способом,

(3.82)

Небалансная удельная э. д. с. , необходимая для компенсации заданных потерь холостого хода электрическим способом,

(3.83)

3.3 Определение диапазона регулирования токов возбуждения взаимно нагруженных тяговых электромашин

3.3.1 Регулирование возбуждения при электрическом способе компенсации потерь холостого хода

Рассмотрим условия обеспечения номинальной нагрузки тяговых электромашин при испытании по схеме с одним источником электрической мощности. Потери холостого хода в такой схеме компенсируются электрическим способом за счёт создания небалансной электромагнитной мощности испытуемых электромашин [66].

Уравнение баланса моментов для установившегося режима вращения якорей испытуемых электромашин можно представить в виде

(3.84)

где – общие потери моментов в испытуемых электромашинах;

– разность магнитных потоков;

– ток нагрузки (якорей) электромашин.

(3.85)

где , – потери моментов двигателя и генератора соответственно.

Сам принцип работы данной схемы обеспечивает возможность установки одинакового для испытуемых электромашин номинального значения тока якоря .

Установление значения тока возбуждения, равным номинальному току якоря при проведении приемо-сдаточных испытаний является условием, обязательным для той электромашин, которая будет работать двигателем, и для которой согласно требованиям к испытаниям определяется номинальное значение частоты вращения якоря [1].

Установление номинальных значений токов возбуждения для обеих однотипных испытуемых электромашин в данной схеме невозможно в принципе [67]. Однако существует три возможных варианта соотношения этих токов, рациональных с точки зрения адекватности результатов температурных испытаний, наиболее важных и энергоемких из общего перечня приемосдаточных испытаний.

Вариант «а»:

(3.87)

Вариант «б»:

(3.88)

Вариант «в»:

(3.89)

Вариант «а» является наиболее рациональным с точки зрения обеспечения номинальных значений параметров испытуемой электромашины, работающей в двигательном режиме.

Ток возбуждения двигателя устанавливается равным его номинальному значению, а ток возбуждения генератора – меньшим номинального. При этом варианте обмотка возбуждения электромашины, работающей генератором, недогружена по току на величину

(3.90)

При варианте «б» ток возбуждения генератора устанавливается равным его номинальному значению, а ток возбуждения двигателя – большим номинального. Этот вариант характерен тем, что обмотка возбуждения двигателя перегружена по току на величину

(3.91)

При варианте «в» ток возбуждения двигателя устанавливается несколько большим его номинального значения, а ток генератора – меньшим номинального. Обмотка возбуждения генератора недогружена, а обмотка возбуждения двигателя при этом перегружена по току относительно номинального значения на величины, определяемые

формулами (3.90) и (3.91) соответственно. При этом каждое из значений $I_{ВД}$ и $I_{ВГ}$ приблизительно вдвое меньше, чем в вариантах «а» и «б». Наиболее рациональным для данного варианта будет обеспечение равенства отклонений от номинального значения токов возбуждения двигателя и генератора $I_{ВД}$ и $I_{ВГ}$ соответственно.

Окончательный выбор распределения токов возбуждения двигателя и генератора относительно номинального значения будет определяться тем, какая из обмоток испытуемой электромашин является лимитирующей по условиям нагрева [104, 105].

Для электродвигателей, у которых лимитирующей является обмотка возбуждения, рациональным будет вариант «а». Для электродвигателей, у которых лимитирующей является одна из обмоток якорной цепи, рациональным будет вариант «б».

Графически принцип каждого из перечисленных возможных вариантов обеспечения компенсации механических и магнитных потерь показан на рис. 3.20-3.22.

Разность магнитных потоков $\Delta\Phi$, обеспечивающая компенсацию потерь моментов электромашин по формуле (3.84), для каждого из приведенных вариантов определяется разностью токов возбуждения $I_{ВД}$ и $I_{ВГ}$ и местом положения точки, соответствующей номинальному режиму, на кривой намагничивания $\Phi = f(I_{В})$.

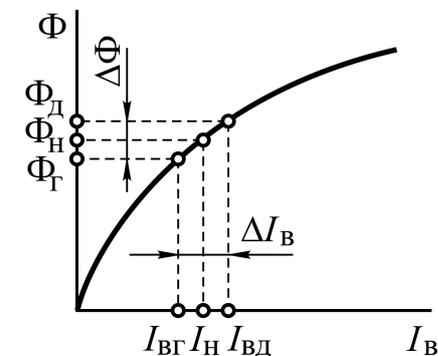


Рисунок 3.22 – Вариант «в»

Для номинального режима значение $I_{В}$ по формуле (3.84) может быть определено в виде

$$(3.92)$$

Строго говоря, магнитные потери мощности и момента в генераторе при испытаниях по данной схеме должны быть меньше, чем в двигателе в связи с меньшим значением магнитного потока. Однако самые общие предварительные расчеты показывают, что в тяговых электрических машинах с

коэффициентом полезного действия не менее 0,9 это различие не будет превышать 10 %. При этом суммарные потери, связанные с вращением роторов электромашин (механические и магнитные) будут отличаться не более, чем на 5%, которыми можно пренебречь. В связи с вышесказанным формулу (4.92) можно записать в упрощенном виде

$$, \quad (3.93)$$

где – механические и магнитные потери момента одной электромашин в номинальном режиме.

Поделив левую и правую часть уравнения (3.93) на номинальное значение магнитного потока , после преобразований получим

$$, \quad (3.94)$$

где – номинальное значение электромагнитного момента электромашин.

Это же выражение может быть записано в виде соотношения мощностей

$$, \quad (3.95)$$

где – потери холостого хода в одной электромашине при номинальном режиме;

– номинальная электромагнитная мощность одной электромашин.

Обозначим:

– относительная разность магнитных потоков;

– относительные потери холостого хода;

– относительная разность токов возбуждения.

Согласно (3.95) связь между данными коэффициентами имеет вид

$$(3.96)$$

Значение коэффициента , необходимое для создания условий компенсации механических и магнитных потерь, будет определяться

значением μ и коэффициентом магнитного насыщения испытуемых электромашин [19].

3.3.2 Регулирование возбуждения при механическом способе компенсации электрических потерь

Рассмотрим условия обеспечения номинальной нагрузки тяговых электромашин при испытании по схеме с одним источником механической мощности. Электрические потери в такой схеме компенсируются механическим способом за счёт создания небалансной электромагнитной мощности испытуемых электромашин [66].

Условие протекания тока якорей электромашин может быть представлено в виде баланса напряжений в замкнутом контуре схемы при установившемся режиме

$$U_a - I_a R_a - E_a = 0, \quad (3.97)$$

– скорость вращения валов электромашин;

– разность магнитных потоков испытуемых электромашин.

Одноконтурность цепи, включающей в себя якорные обмотки (цепи) испытуемых электромашин, обеспечивает условие равенства якорных токов, которые могут поддерживаться равными номинальному значению $I_{aн}$.

Равенство токов якорей и возбуждения является необходимым условием испытания тяговых электродвигателей последовательного возбуждения при определении номинальной частоты вращения якоря, по крайней мере, для электромашин, работающей двигателем.

Установление одинаковых токов возбуждения обеих испытуемых электромашин невозможно в принципе, в связи с неработоспособностью данной схемы при таких условиях [67].

Рассмотрим три возможных варианта соотношения токов возбуждения тяговых электродвигателей, обеспечивающих компенсацию электрических потерь мощности при взаимной нагрузке.

Вариант «а»:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{aн}, \quad (3.98)$$

Вариант «б»:

(3.99)

Вариант «в»:

(3.100)

При варианте «а» ток возбуждения генератора устанавливается равным номинальному значению, а ток возбуждения двигателя – меньше номинального. При этом генератор работает в номинальном режиме, а обмотка возбуждения двигателя недогружена по току на величину

(3.101)

Вариант «б» является наиболее рациональным с точки зрения возможности обеспечения номинального режима работы электромашин-двигателя. Ток возбуждения двигателя устанавливается равным номинальному значению, а ток возбуждения генератора – большим номинального.

При этом варианте обмотка возбуждения генератора будет перегружена по току на величину

(3.102)

В варианте «в» ток возбуждения генератора устанавливается большим номинального значения, а ток возбуждения двигателя – меньшим номинального.

Обмотка возбуждения двигателя недогружена, а обмотка возбуждения генератора перегружена по току относительно номинального значения на величины, определяемые формулами (3.101) и (3.102) соответственно. При этом каждые из значений $I_{\text{в}}$ и $I_{\text{г}}$ меньше, чем в вариантах «а» и «б».

Наиболее рациональным для данного варианта будет обеспечение равенства отклонений токов возбуждения двигателя $I_{\text{в}}$ и генератора $I_{\text{г}}$ соответственно.

Окончательный выбор распределения токов возбуждения двигателя и генератора относительно номинального значения будет определяться тем, какая из обмоток испытуемой электромашин является лимитирующей по условиям нагрева [104, 105].

Для электродвигателей, у которых лимитирующей является обмотка возбуждения, рациональным будет вариант «а». Для электродвигателей, у которых лимитирующей является одна из обмоток якорной цепи,

рациональным будет вариант «б».

Графически принцип каждого из вариантов компенсации электрических потерь в рассматриваемой схеме взаимной нагрузки показан на рис. 3.23-3.25.

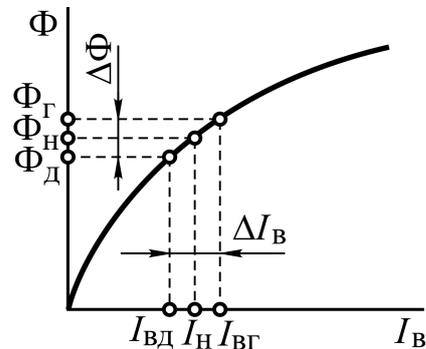


Рисунок 3.25 – Вариант «в»

Разность магнитных потоков , обеспечивающая компенсацию электрических потерь за счет дополнительной электромагнитной мощности генератора по формуле (3.97), для каждого из рассмотренных вариантов определяется разностью токов возбуждения и местом положения точки номинального режима на кривой намагничивания .

Для универсальной кривой намагничивания [102] положение этой точки будет определяться значением коэффициента магнитного насыщения соответствующего режима [106].

При смещении режима испытания по кривой намагничивания в сторону насыщения, для одной и той же разности магнитных потоков будет соответствовать большая разница токов возбуждения и наоборот.

Для номинального режима значение будет определено в виде

$$(3.103)$$

Если принять сопротивления якорных цепей однопольных испытуемых электромашин одинаковыми, равными , то формулу (3.103) можно привести к виду

$$(3.104)$$

Поделив левую и правую часть уравнения (3.104) на номинальное значение магнитного потока , после преобразований получим выражение для определения относительной разности магнитных потоков, приведенной к номинальному значению

$$, \quad (3.105)$$

где F – электродвижущая сила электромашины, соответствующая номинальному режиму испытания.

Если числитель и знаменатель правой части уравнения (3.105) умножить на F , то это же выражение после преобразований может быть записано в виде

$$, \quad (3.106)$$

где $P_{\text{эл}}$ – электрические потери мощности в электромашине при работе в номинальном режиме.

Здесь необходимо отметить, что электрические потери мощности в испытуемых электромашинах являются функциями температуры их обмоток и растут с течением времени испытания.

Следовательно, по мере проведения испытаний по данной схеме величина $P_{\text{эл}}$ при условии постоянства тока якорей I_a будет расти пропорционально изменению сопротивления якорных цепей испытуемых электромашин.

Обозначим

α – относительные электрические потери.

Согласно (3.106) коэффициенты α_1 и α_2 связаны между собой

$$. \quad (3.107)$$

Коэффициент α будет определять относительную разность токов возбуждения испытуемых электромашин $I_{\text{в}}$ (приведенную к номинальному току возбуждения), обеспечивающую компенсацию электрических потерь мощности при испытаниях. Причем, необходимая относительная разность токов возбуждения испытуемых электромашин будет определяться как значением α , так и коэффициентом магнитного насыщения в номинальном режиме или другом режиме, соответствующем условиям проведения испытаний [19].

3.3.3 Определение необходимой разности токов возбуждения взаимно нагруженных тяговых электромашин

Относительная разность токов возбуждения тяговых электромашин, необходимая для обеспечения заданной относительной разности их магнитных потоков, может быть определена по универсальной магнитной характеристике. Нетрудно убедиться в том, что одному и тому же относительному отклонению тока при различных коэффициентах насыщения будут соответствовать разные относительные отклонения магнитного потока.

Определим зависимости для нескольких фиксированных значений коэффициента магнитного насыщения. Для этого воспользуемся универсальной магнитной характеристикой, представляющей собой зависимость магнитного потока от магнитодвижущей силы в относительных единицах [102]

где Φ – значение магнитного потока в относительных единицах;

F – значение магнитодвижущей силы в относительных единицах.

Так как универсальная магнитная характеристика представлена в относительных единицах, будут справедливы выражения:

;

где I – ток возбуждения в относительных единицах.

Универсальная магнитная характеристика в цифровом виде приведена в табл. 3.1 [102].

Таблица 3.1 – Универсальная магнитная характеристика

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Φ , о. е. | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 0,95 | 1 |
| F , о.е. | 0,69 | 0,73 | 0,76 | 0,79 | 0,82 | 0,84 | 0,86 | 0,88 | 0,9 | 0,92 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 1 |
| I , о. е. | 1,29 | 1,42 | 1,54 | 1,65 | 1,75 | 1,84 | 1,92 | 2,0 | 2,07 | 2,14 | 2,2 | 2,26 | 2,31 | 2,35 | 2,39 |

На рис. 3.26 схематично показан метод определения зависимости для заданного коэффициента магнитного насыщения в

точке , соответствующей часовому режиму или любому другому режиму проведения испытания. Точка *A* на характеристике соответствует режиму отпитки обмотки возбуждения, а точка *B* – режиму подпитки.

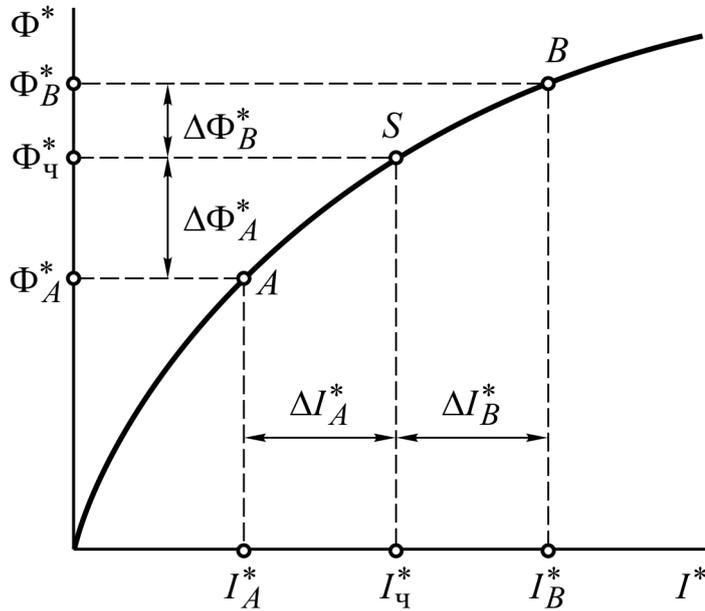


Рисунок 3.26 – Метод определения зависимости

Для режима отпитки (точка *A*) коэффициенты относительных отклонений тока и магнитного потока определяются как:

$$\dots; \tag{3.108}$$

$$\dots, \tag{3.109}$$

где ΔI_A^* и $\Delta \Phi_A^*$ – относительные отклонения тока и магнитного потока соответственно для режима отпитки.

;

Для режима подпитки (точка *B*) коэффициенты относительных отклонений тока и магнитного потока:

$$; \quad (3.110)$$

$$, \quad (3.111)$$

где δ и δ_m – относительные отклонения тока и магнитного потока соответственно для режима подпитки.

;

В табл. 3.2 и 3.3 приведены результаты расчета зависимостей

для режимов отпитки и подпитки соответственно. Расчёты проведены по формулам (3.108) – (3.111) с использованием данных табл. 3.1 для трёх значений коэффициента магнитного насыщения (1,67; 1,91; 2,15).

На рис. 3.27 и 3.28 полученные зависимости приведены в графическом виде. Кривые 1 на рис. 3.27, 3.28 соответствуют коэффициенту насыщения $\mu_r = 1,67$, кривые 2 – $\mu_r = 1,91$, кривые 3 – $\mu_r = 2,15$.

На рис. 3.29, 3.30, 3.31 приведены эти же зависимости, сгруппированные парами (отпитка и подпитка) по значению коэффициента магнитного насыщения. На рис. 3.29 приведены зависимости δ и δ_m для $\mu_r = 1,67$, на рис. 3.30 – для $\mu_r = 1,91$, на рис. 3.31 – для $\mu_r = 2,15$.

Таблица 3.2 – Зависимости δ и δ_m для режима отпитки

| | | | | | | | | |
|----------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\mu_r = 1,67$ | δ | 0,111 | 0,222 | 0,333 | 0,444 | 0,556 | – | – |
| | δ_m | 0,039 | 0,082 | 0,132 | 0,208 | 0,308 | – | – |
| $\mu_r = 1,91$ | δ | 0,091 | 0,182 | 0,273 | 0,364 | 0,455 | 0,545 | – |
| | δ_m | 0,031 | 0,064 | 0,100 | 0,140 | 0,187 | 0,258 | – |
| $\mu_r = 2,15$ | δ | 0,077 | 0,154 | 0,231 | 0,308 | 0,385 | 0,462 | 0,538 |
| | δ_m | 0,022 | 0,046 | 0,075 | 0,107 | 0,142 | 0,180 | 0,225 |

Таблица 3.3 – Зависимости

для режима подпитки

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| =1,67 | 0,111 | 0,222 | 0,333 | 0,444 | 0,556 | – | – |
| | 0,035 | 0,068 | 0,094 | 0,119 | 0,145 | – | – |
| =1,91 | 0,091 | 0,182 | 0,273 | 0,364 | 0,455 | 0,545 | – |
| | 0,025 | 0,048 | 0,072 | 0,093 | 0,113 | 0,131 | – |
| =2,15 | 0,077 | 0,154 | 0,231 | 0,308 | 0,385 | 0,462 | 0,538 |
| | 0,022 | 0,043 | 0,062 | 0,079 | 0,091 | 0,110 | 0,124 |

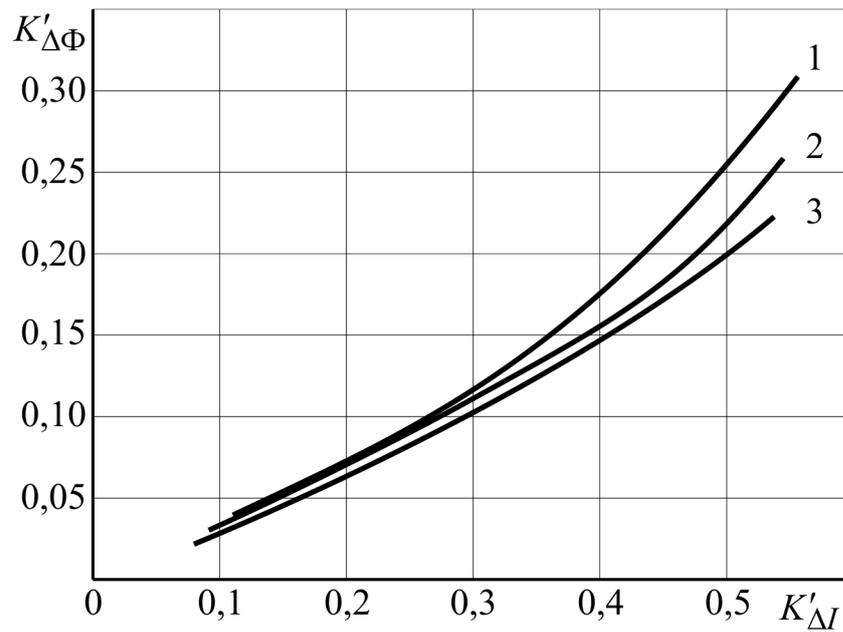


Рисунок 3.27 – Зависимости

для режима отпитки

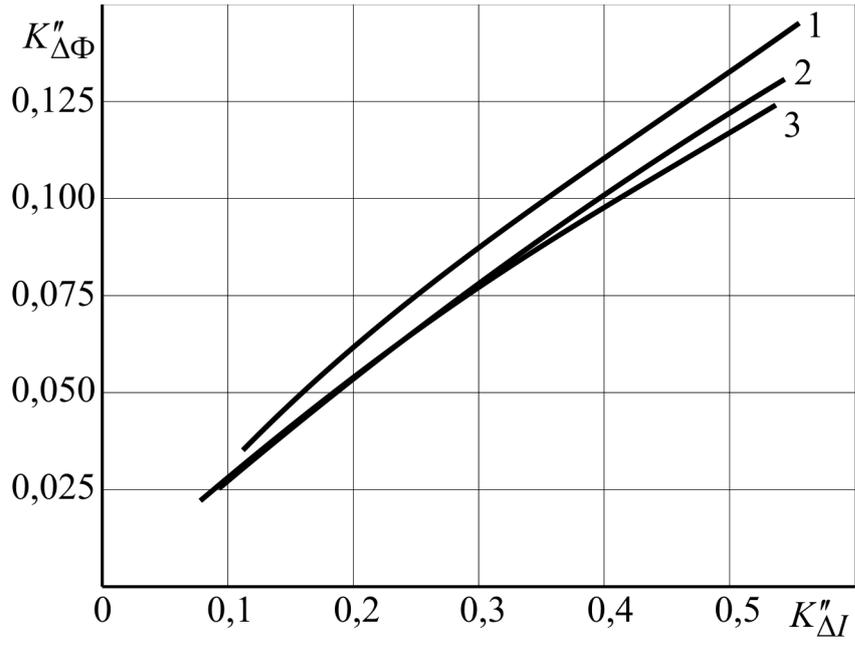


Рисунок 3.28 – Зависимости для режима подпитки

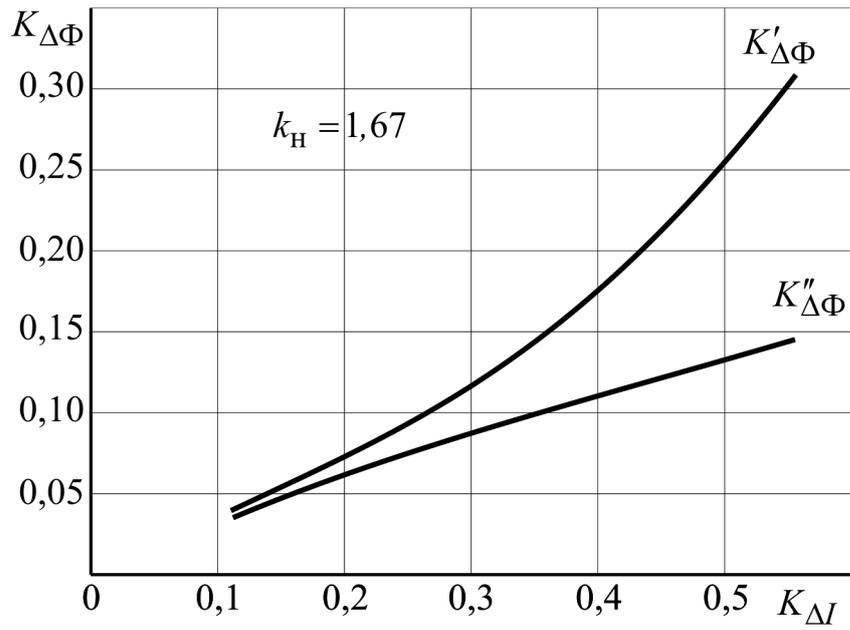


Рисунок 3.29 – Зависимости для

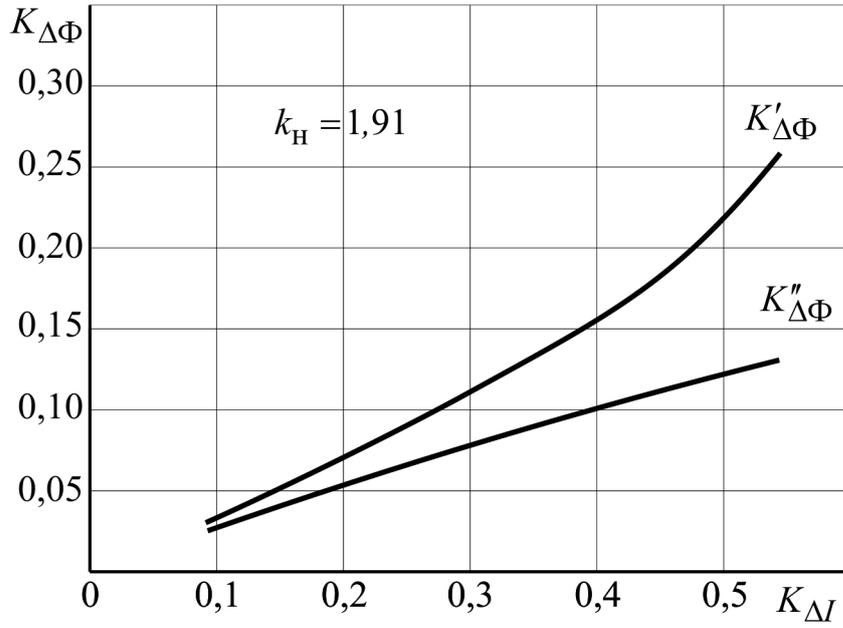


Рисунок 3.30 – Зависимости для

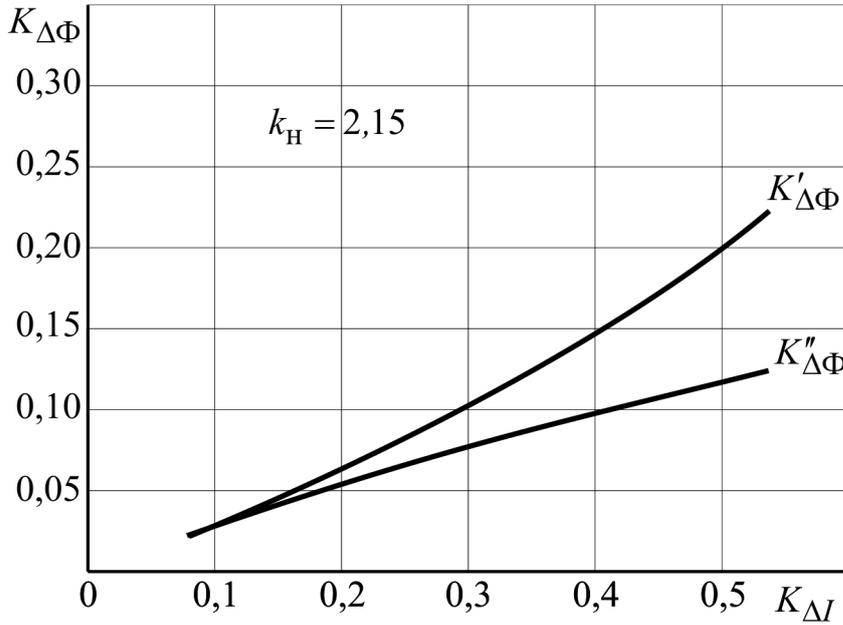


Рисунок 3.31 – Зависимости для

Диапазон регулирования тока возбуждения определяется выражением

Относительная разность токов ΔI может быть определена для известного значения коэффициента насыщения k по зависимости $\Delta I = f(k)$, которые приведены на рис. 3.27-3.31. При совпадении магнитных характеристик испытуемых электромашин относительная разность магнитных потоков

где ΔP – потери определённого вида в одной испытуемой электромашине, компенсируемые косвенным способом, приведенные к часовой мощности

Потери $P_{\text{хол}}^{\text{н}}$ могут быть как электрическими $P_{\text{хол}}^{\text{н}} = P_{\text{хол}}^{\text{н}} + P_{\text{хол}}^{\text{н}}$, так и потерями холостого хода $P_{\text{хол}}^{\text{н}}$ в часовом режиме (или другом режиме испытания). С учетом возможного максимально допустимого расхождения магнитных характеристик испытуемых электромашин

где $\Delta \omega$ – максимально допустимое отклонение частоты вращения от типового значения в режиме испытания.

Справедливость данного выражения может быть легко доказана, если принять

где $\Delta \Phi$ и $\Delta \omega$ – относительные расхождения магнитных потоков и частот вращения соответственно в часовом режиме нагрузки.

Для тяговых двигателей подвижного состава магистрального и промышленного транспорта ($\Delta \Phi = \Delta \omega = 0$) [1, 2]

Приведенные потери мощности , которые могут быть компенсированы заданной относительной разностью токов возбуждения могут определены в виде

В табл. 3.4 и 3.5 приведены результаты расчёта зависимостей относительной разности токов возбуждения от приведенных потерь одной электромашин для трёх значений . В табл. 3.4 приведены результаты расчета для режима отпитки, а в табл. 3.5 – для режима подпитки.

Таблица 3.4 – Зависимости для режима отпитки

| | | | | | | | | |
|-------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| =1,67 | | <u>0,019</u> | <u>0,041</u> | <u>0,066</u> | <u>0,104</u> | <u>0,154</u> | – | – |
| | | | 0,011 | 0,036 | 0,074 | 0,124 | – | – |
| =1,91 | | <u>0,016</u> | <u>0,032</u> | <u>0,050</u> | <u>0,070</u> | <u>0,094</u> | <u>0,129</u> | – |
| | | | 0,002 | 0,020 | 0,040 | 0,064 | 0,099 | – |
| =2,15 | | <u>0,011</u> | <u>0,023</u> | <u>0,038</u> | <u>0,054</u> | <u>0,071</u> | <u>0,090</u> | <u>0,113</u> |
| | | | | 0,008 | 0,024 | 0,041 | 0,060 | 0,082 |
| | | 0,077 | 0,154 | 0,231 | 0,308 | 0,385 | 0,462 | 0,538 |

Таблица 3.5 – Зависимости для режима подпитки

| | | | | | | | | |
|-------|--|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| =1,67 | | <u>0,018</u> | <u>0,034</u> 0,004 | <u>0,047</u> 0,017 | <u>0,060</u> 0,030 | <u>0,073</u> 0,043 | | |
| | | 0,111 | 0,222 | 0,333 | 0,444 | 0,556 | | |
| =1,91 | | <u>0,013</u> | <u>0,024</u> | <u>0,036</u> 0,006 | <u>0,047</u> 0,017 | <u>0,057</u> 0,027 | <u>0,066</u> 0,036 | |
| | | 0,091 | 0,182 | 0,273 | 0,364 | 0,455 | 0,545 | |
| =2,15 | | <u>0,011</u> | <u>0,022</u> | <u>0,031</u> 0,001 | <u>0,040</u> 0,010 | <u>0,046</u> 0,016 | <u>0,055</u> 0,025 | <u>0,062</u> 0,032 |
| | | 0,077 | 0,154 | 0,231 | 0,308 | 0,385 | 0,462 | 0,538 |

Значения β , приведенные в числителе, относятся к случаю совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин, а приведенные в знаменателе – к случаю максимального их расхождения ($\beta = 1$).

На рис. 3.32-3.37 зависимости β приведены графически для трёх значений коэффициента насыщения $\beta_{\text{н}}$. Графики на рис. 3.32-3.34 соответствуют режиму отпитки, а на рис. 3.35-3.37 – подпитки. Кривые 1 на рисунках соответствуют случаю совпадения магнитных характеристик, а кривые 2 – случаю максимального их расхождения.

Из графиков на рис. 3.32-3.37 видно, что при использовании режима отпитки для компенсации потерь с заданным значением β требуется разница токов возбуждения электромашин, соответствующие существенно меньшему значению коэффициента β , чем в режиме подпитки. С увеличением коэффициента магнитного насыщения $\beta_{\text{н}}$ значение β , соответствующее заданному β , растёт. Расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин требует существенного запаса диапазона регулирования разницы их токов возбуждения. Для решения данной проблемы в системе взаимного нагружения должна быть предусмотрена возможность удобного взаимного переключения режимов нагружения испытуемых электромашин: «двигатель»-«генератор».

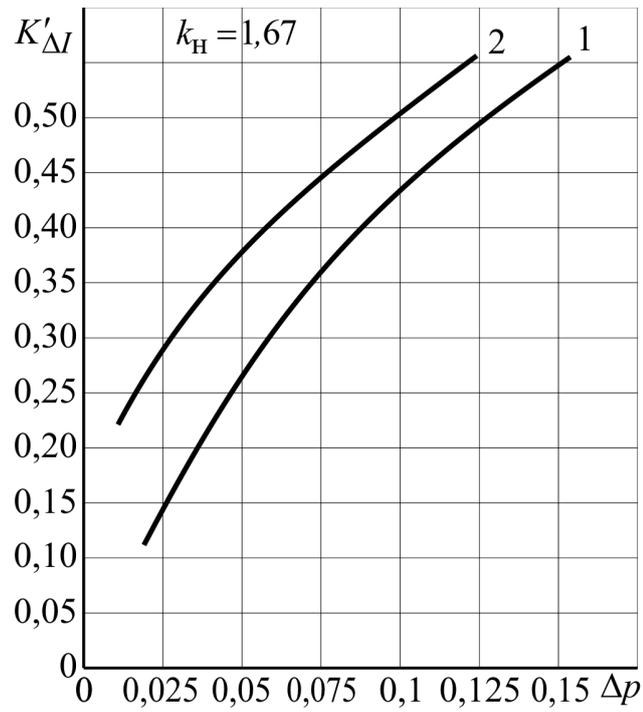


Рисунок 3.32 – Зависимости
для режима отпитки и

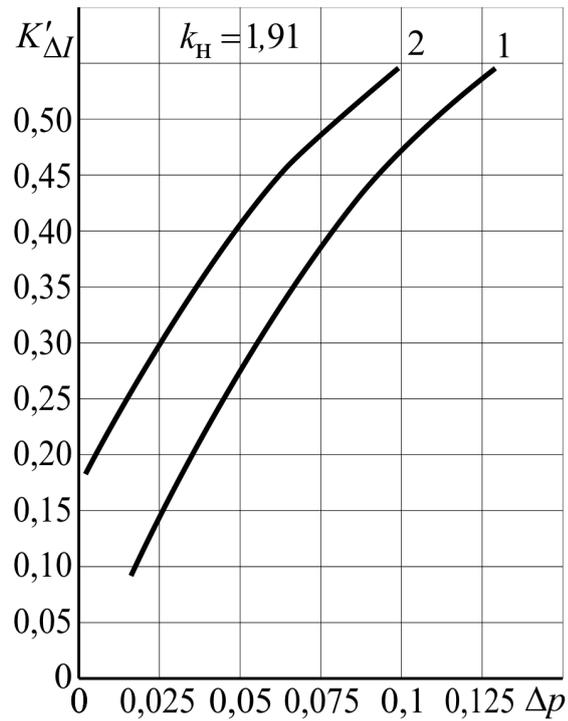


Рисунок 3.33 – Зависимости
для режима отпитки и

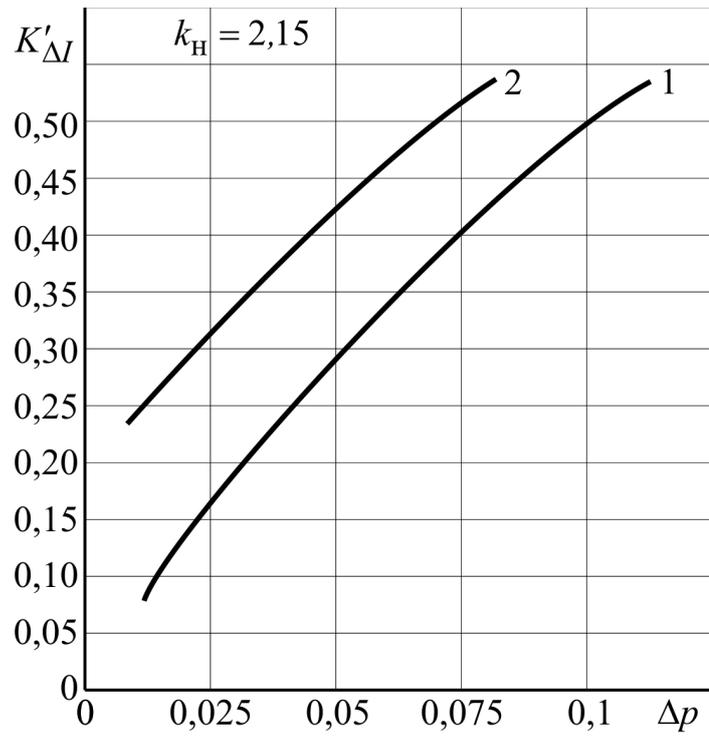


Рисунок 3.34 – Зависимости
для режима отпитки и

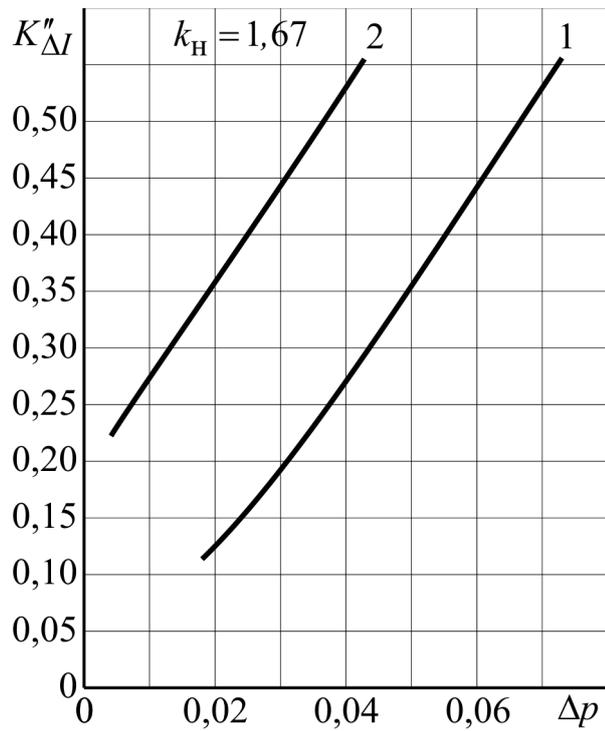


Рисунок 3.35 – Зависимости
для режима подпитки и

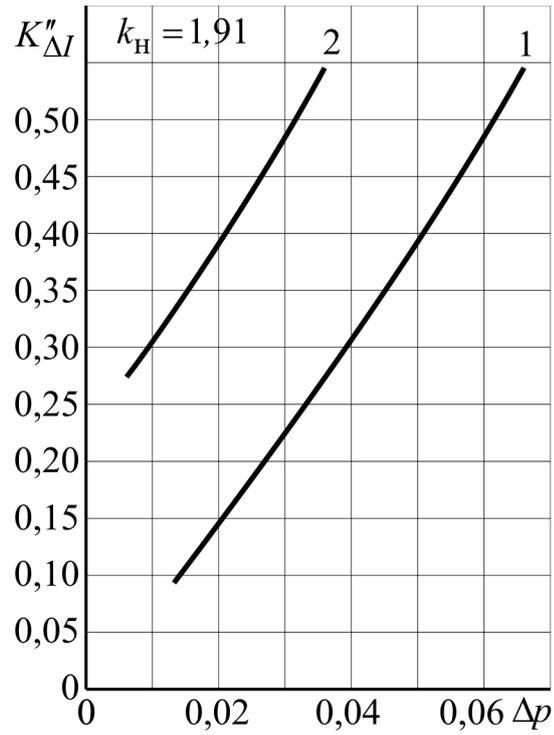


Рисунок 3.36 – Зависимости
для режима подпитки и

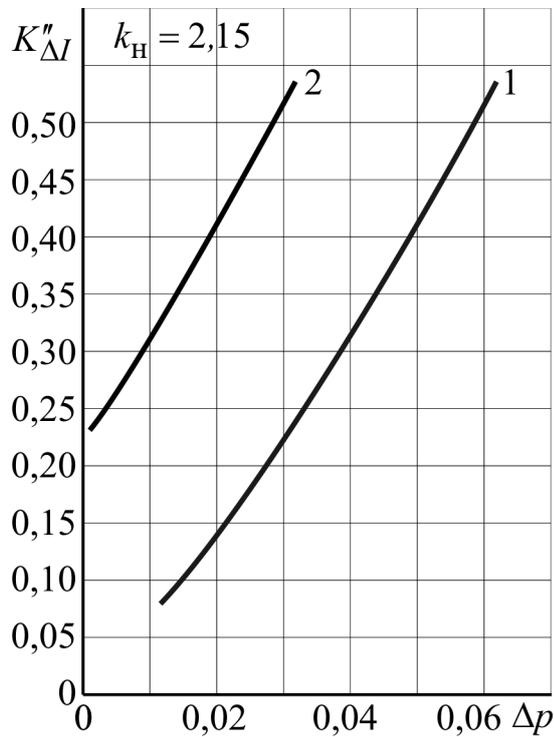


Рисунок 3.37 – Зависимости
для режима подпитки и

3.4 Моделирование магнитных характеристик тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока

Известен целый ряд исследований, посвященных поиску оптимальных аналитических выражений, описывающих кривые намагничивания электрических машин, в том числе – тяговых электродвигателей постоянного тока.

Такое аналитическое выражение с одной стороны должно возможно точно описывать зависимость магнитного потока электромашины от м. д. с. её обмотки возбуждения (тока возбуждения), а с другой стороны – быть достаточно простым и легко дифференцируемым.

Таким требованиям, по мнению многих исследователей, наиболее полно отвечает функция арктангенса [103].

Для практических расчетов наиболее удобным является описание кривой намагничивания электромашины в виде зависимости удельной э. д. с. вращения от тока возбуждения

$$, \quad (3.112)$$

где – удельная э. д. с. вращения якоря;
– ток возбуждения электромашины.

,

где – э. д. с. вращения якоря электромашины;
– угловая скорость вращения якоря.

Аналитическое выражение зависимости может быть представлено в виде

$$, \quad (3.113)$$

где A и B – постоянные коэффициенты.

В практике тягового электромашиностроения достаточно широко используется универсальная магнитная характеристика, достаточно точно описывающая кривые намагничивания электродвигателей тягового подвижного состава [102]. Известны и исследования, посвященные аналитическому описанию данной универсальной характеристики [125]. Самый поверхностный анализ показывает, что выражение (3.113) описывает универсальную магнитную характеристику с достаточной точностью лишь в средней её части. В пропорциональной зоне и зоне насыщения применение выражения (3.113) даёт некоторую ошибку. Асимптота арктангенса горизонтальна, а кривая универсальной магнитной характеристики в зоне насыщения представляет собою наклонную линию.

Однако необходимо отметить, что реальные типовые скоростные характеристики тяговых двигателей [104] дают расчетные приведенные магнитные характеристики, в достаточной степени отличные от универсальной характеристики ($\pm 3\%$). Учитывая тот факт, что допустимые

отклонения для реальных магнитных характеристик в часовом режиме составляют $\pm 3\%$ [1, 2], их описание выражением (3.113) в зоне рабочего диапазона изменения тока является удовлетворительным.

Рассмотрим свойства функции (3.113), как выражения для описания магнитной характеристики, представив её в виде

$$(3.114)$$

где

График функции (3.114) приведен на рис. 3.38 в виде кривой (линия 1).

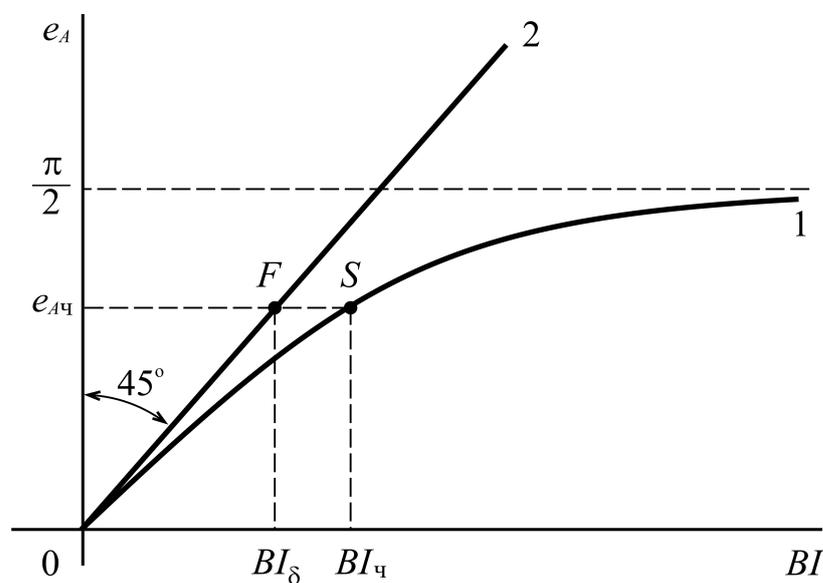


Рисунок 3.38 – Характер зависимости

Допустим точка S соответствует часовому режиму (), для которого . Тогда коэффициент насыщения тяговой электромашины, соответствующий часовому режиму будет равен

$$(3.115)$$

где – параметр , соответствующий падению магнитного напряжения в воздушном зазоре.

Прямая 2 соответствует зависимости удельной э. д. с. от падения магнитного напряжения в воздушном зазоре электромашины. Из свойств функции арктангенса [103] прямая 2, представляющая собой касательную к кривой 1 в точке , описывается уравнением

$$(3.116)$$

а углы её наклона к осям координат равны 45° . Тогда выражение для коэффициента насыщения может быть преобразовано к виду

$$\dots, \quad (3.117)$$

где \dots – параметр \dots , соответствующий часовому току (рис. 3.13).

Таким образом, коэффициент насыщения \dots , соответствующий часовому режиму, определяет параметр \dots , а при известной удельной часовой э. д. с. вращения \dots и сам коэффициент A в выражении (3.113).

$$\dots. \quad (3.118)$$

Значение \dots может быть выражено через типовые параметры тяговой электромашины [107] в виде

$$\dots, \quad (3.119)$$

где \dots – номинальное напряжение;

\dots , \dots – часовые ток и угловая скорость соответственно;

\dots – суммарное сопротивление обмоток электромашины.

Как будет показано ниже, выражения (3.117) и (3.118) могут быть использованы для грубой оценки параметра A в упрощенных расчетах, требующих аналитическое описание магнитных характеристик тяговых электромашин по известному коэффициенту магнитного насыщения \dots .

Коэффициент B при известных значениях A и \dots может быть определён как

$$\dots. \quad (3.120)$$

Рассмотрим основные возможные способы определения уточненных значений коэффициентов A и B , обеспечивающих более корректное аналитическое описание магнитных характеристик известных серий тяговых электромашин. Будем считать известными их типовые скоростные характеристики \dots , номинальное напряжение \dots и суммарное сопротивление обмоток \dots . Тогда не представляет трудности получение реальной магнитной характеристики в виде \dots . Необходимо отметить, что типовые скоростные характеристики, получаемые в результате

квалификационных испытаний тяговых электромашин, представляются в виде конечного числа дискретных точек [29] и являются усреднёнными для данной серии электромашин.

Первый способ определения коэффициентов A и B графически представлен на рис. 3.39. Искомые параметры аппроксимирующей функции (4.110) находятся из условия прохождения кривой через две заданные точки M и N . Предполагается, что I_M и I_N точно определены типовой скоростной характеристикой, то есть I_M и I_N являются табличными данными результатов квалификационных испытаний.

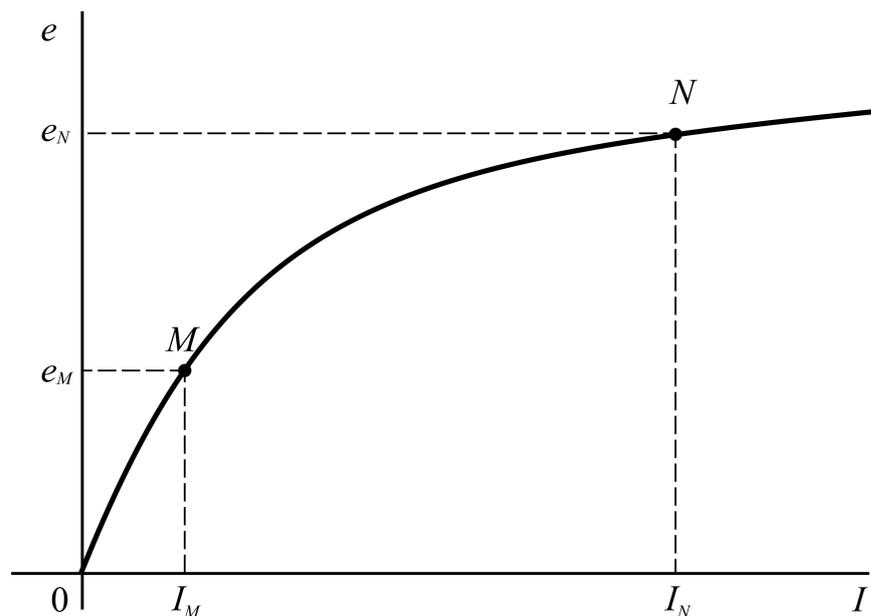


Рисунок 3.39 – Первый способ определения коэффициентов A и B

Коэффициенты A и B в этом случае могут быть определены путём решения системы уравнений:

$$(3.121)$$

Выбор самих точек M и N , в которых реальная характеристика и аппроксимирующая кривая будут пересекаться, может быть осуществлён методом экспертных оценок [108] в зависимости от цели моделирования магнитной характеристики.

Второй способ определения коэффициентов A и B графически представлен на рис. 3.40. Искомые параметры аппроксимирующей функции (3.113) находятся из условия прохождения кривой через заданную точку M

с заданным значением производной e' в данной точке.

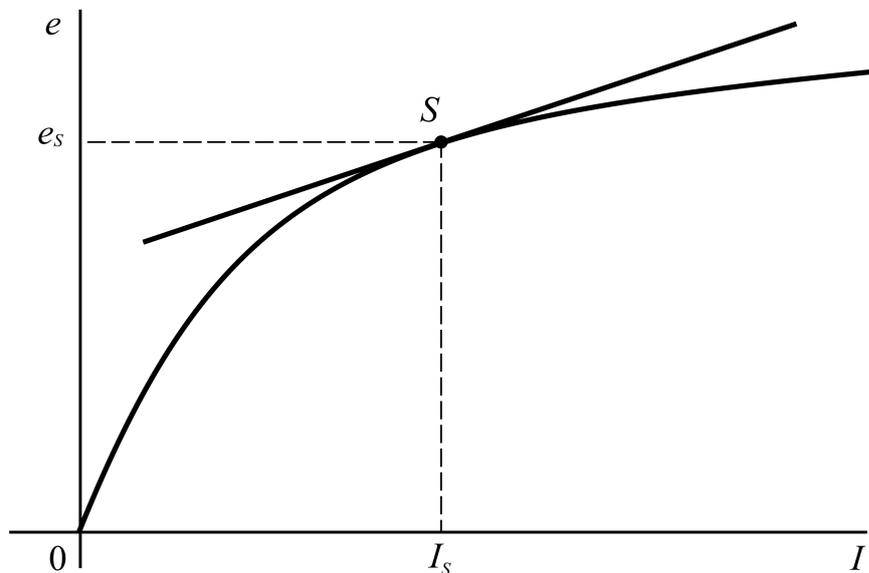


Рисунок 3.40 – Второй способ определения коэффициентов A и B

Здесь предполагается, что e_s точно определена типовой

скоростной характеристикой, а производная $\frac{de}{dI}$ в точке S может быть определена графически достаточно точно.

Коэффициенты A и B в этом случае определяются путем решения системы уравнений:

$$(3.122)$$

В качестве точки S при данном способе аппроксимации имеет смысл выбирать наиболее вероятный режим работы электромашины. Если идет речь о моделировании электромеханических процессов при тепловых испытаниях электромашин, это будет режим, соответствующий часовому или другому эквивалентному току.

Третий способ определения коэффициентов A и B графически представлен на рис. 3.41. Искомые параметры аппроксимирующей функции (3.113) находятся из условия прохождения кривой 2 через заданную точку при максимальном совпадении искомой кривой 2 с реальной кривой намагничивания 1 на заданном отрезке изменения тока I . Критерием степени корректности аппроксимации может быть выбран, например, минимум среднего квадратического отклонения [103].

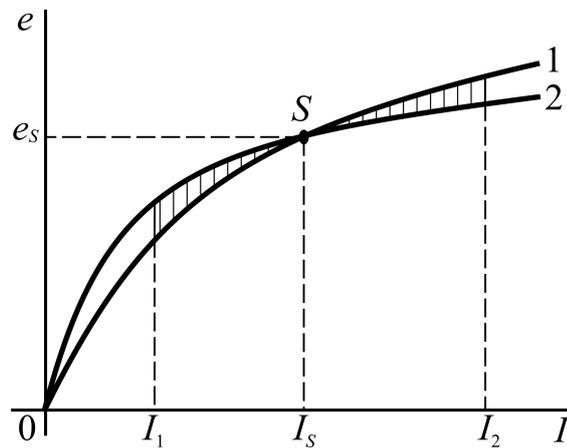


Рисунок 3.41 – Третий способ определения коэффициентов A и B

В качестве точки при заданном способе аппроксимации имеет смысл выбирать режим, соответствующий часовому току $[1, 2]$, то есть

Коэффициенты A и B в этом случае определяются методом подбора с учётом выполнения условий:

$$(3.123)$$

где – среднее квадратическое отклонение.

Выбор отрезка, на котором рассчитывается параметр, осуществляется методом экспертных оценок в зависимости от ожидаемого диапазона изменения тока и целей моделирования магнитной характеристики.

Четвертый способ определения коэффициентов A и B графически представлен на рис. 3.42. Здесь искомые параметры аппроксимирующей функции находятся из условия максимального совпадения искомой кривой 2 с реальной кривой намагничивания 1 на заданном отрезке изменения тока

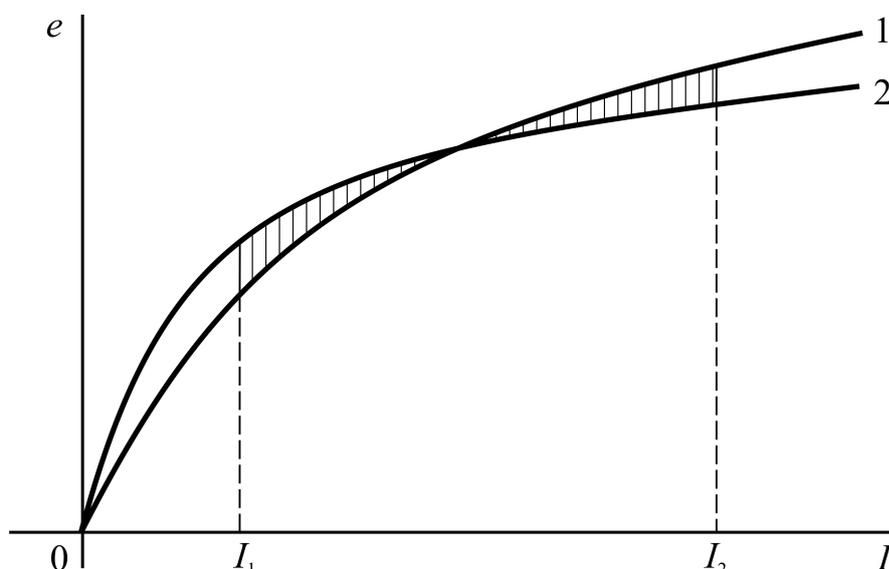


Рисунок 3.42 – Четвертый способ определения коэффициентов A и B

Критерием степени корректности проводимой аппроксимации может быть выбран тот же параметр, что и в третьем способе – минимум среднеквадратического отклонения

$$(3.124)$$

Выбор отрезка осуществляется таким же образом, как и в предыдущем – третьем способе.

В отличие от третьего способа, в котором выбор одного из коэффициентов, например A , определяет значение другого (B), в четвертом способе требуется перебор сочетаний этих двух параметров. Данный способ даёт наиболее точное совпадение аппроксимирующей характеристики с реальной, однако не гарантирует их совпадение в заданной точке, например той, которая соответствует режиму испытания. Кроме того, этот способ в сравнении с другими, описанными выше, является самым трудоёмким.

Анализ приведенных способов определения параметров аппроксимирующей функции (3.113) показывает, что наиболее рациональным для анализа электромеханических процессов в системах взаимного нагружения тяговых электромашин при их тепловых испытаниях является третий способ, формализованный в виде условий (3.123).

Данная методика была использована при определении параметров A и B аппроксимирующей характеристики (3.113) для ряда серий тяговых электрических двигателей электровозов и электропоездов.

Зависимость может быть определена по универсальной магнитной характеристике.

В табл. 3.6 приведены результаты расчёта данной зависимости, проведенного по третьему способу с учётом выполнения условий:

(3.125)

где x и y – координаты точки (в относительных единицах) на универсальной магнитной характеристике [102], соответствующие выбранному коэффициенту насыщения $K_{нч}$ [19, 81] часового режима; a и b – коэффициенты аппроксимации универсальной магнитной характеристики.

Таблица 3.6 – Результаты расчёта зависимости

| | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1,67 | 1,79 | 1,91 | 2,04 | 2,15 | 2,27 | 2,49 |
| | 1,16 | 1,2 | 1,23 | 1,25 | 1,26 | 1,28 | 1,3 |

При этом параметр $e_{Ач}$ рассматривается как отношение

$$\frac{e_{Ач}}{K_{нч}}$$
 (3.126)

где Φ – магнитный поток (в относительных единицах), соответствующий часовому режиму.

Сам часовой режим (положение точки (x, y)) задавался значением коэффициента магнитного насыщения $K_{нч}$.

На рис. 3.43 зависимость $e_{Ач}$, полученная для универсальной магнитной характеристики (табл. 3.6), приведена в графическом виде.

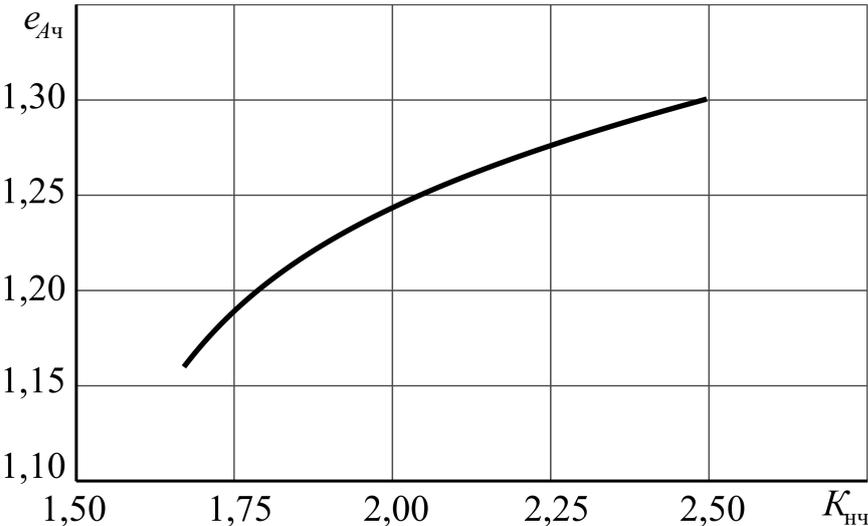


Рисунок 3.43 – Универсальная зависимость

Использование данной зависимости позволяет определить коэффициенты аппроксимации A и B в уравнении (3.113) по изложенной выше методике, не используя саму магнитную характеристику, только по типовым параметрам тяговой электромашины и значению коэффициента насыщения в часовом режиме [106].

3.5 Принципы автоматического управления системами взаимного нагружения тяговых электрических машин

Характер управления параметрами взаимного нагружения тяговых электромашин при их приёмо-сдаточных (послеремонтных) испытаниях во многом определяет как качество самих испытаний, так и общие экономические затраты на их проведение [109]. Существует ряд вариантов систем взаимной нагрузки электромашин, применение которых в ручном режиме регулирование крайне затруднено из-за проблем с их электромеханической устойчивостью [4]. Вопросы, связанные с принципами автоматического регулирования режимами испытаний тяговых электромашин по методу взаимной нагрузки, требуют отдельного рассмотрения.

В соответствии с ГОСТ 2582-81 [1] система автоматического управления стендом взаимного нагружения тяговых электрических машин должна обеспечивать:

- стабилизацию напряжения на тяговой электромашине, работающей двигателем;
- стабилизацию тока тяговой электрической машины, работающей двигателем;
- стабилизацию частоты вращения валов тяговых электромашин;
- защиту от перегрузок по всем трём управляемым параметрам.

Жесткость данных требований для различных режимов испытаний тяговых электромашин самим ГОСТ 2582-81 не оговаривается и является предметом отдельного исследования.

Все три параметра, стабилизация которых требуется в различных режимах испытания тяговых электромашин, связаны между собой известными уравнениями [75]:

$$; \quad (3.127)$$

$$\cdot \quad (3.128)$$

Необходимо отметить, что система взаимного нагружения представляет собой объект регулирования с внутренними связями, объединяющими все параметры, входящие в (3.127) и (3.128).

Для выполнения программы испытаний тяговых электромашин необходимо обеспечение условий протекания токов якорей, вращения валов, а также наличия определённого напряжения на коллекторах [1, 2]. Учитывая

то, что три регулируемых параметра каждой из испытываемых электромашин в стационарном режиме взаимного нагружения жёстко связаны между собой, система управления стендом должна быть двухконтурной. Первый контур должен обеспечивать стабилизацию тока якоря испытываемого двигателя. Второй контур должен обеспечивать стабилизацию либо напряжения на испытываемом двигателе, либо частоты вращения его вала. При проведении испытаний на нагревание не имеет принципиального значения, какой из данных параметров будет стабилизирован.

Проверку частоты вращения ГОСТ 2582-81 [1] требует проводить при номинальных значениях напряжения и тока испытываемого двигателя. Обеспечение постоянства нужного значения напряжения на тяговом двигателе для проведения данной проверки в системах со стабилизацией угловой скорости не представляет трудности. Объектом регулирования в системах управления стендами взаимного нагружения любого варианта являются испытываемые электромашинны, объединенные в общую электромеханическую систему.

Управляемыми параметрами [110, 111] в контурах стабилизации являются: сила тока в обмотке якоря испытываемого двигателя, напряжение на испытываемом двигателе либо частота вращения его якоря.

В системах с параллельным включением источника электрической мощности (источник напряжения) целесообразным является стабилизация напряжения с ограничением тока в параллельной ветви (подчиненное регулирование).

В остальных вариантах систем взаимного нагружения наиболее рациональным является стабилизация угловой скорости вращения якоря двигателя. Это связано с тем, что механическая часть системы взаимного нагружения является более инерционной, чем электрическая часть, а напряжение на испытываемых электромашиннах в таких системах является параметром, определяемым частотой вращения якорей. При стабилизации угловой скорости колебательные процессы в системе автоматического регулирования будут менее вероятны, чем при стабилизации напряжения.

Рассмотрим общие принципы управления системами взаимного нагружения с различными способами компенсации потерь мощности. В качестве систем автоматического управления будем рассматривать астатические замкнутые системы с отрицательной обратной связью, реализующие принцип регулирования по отклонению [110, 111, 126]. Использование таких систем для стабилизации напряжений, токов и частот вращения является наиболее рациональным.

3.5.1 Прямой способ компенсации электрических потерь

Данный способ реализуется за счет включения в последовательный электрический контур испытываемых электромашин внешнего источника электрической мощности (источника напряжения) [67]. Функциональная схема контура стабилизации тока приведена на рис. 3.44. Контур включает в себя задатчик тока ЗТ, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ,

источник напряжения ИН, электрический контур испытуемых электромашин ЭМ и датчик тока ДТ.

Управляющей координатой [110] в данной системе является напряжение на задатчике тока $u_{зТ}$, а управляемой координатой – ток якоря испытуемого двигателя $I_{д}$. Напряжение управления Δu определяет величину напряжения источника $u_{у}$ и, в свою очередь, связано с напряжением рассогласования ΔE принятым законом регулирования.

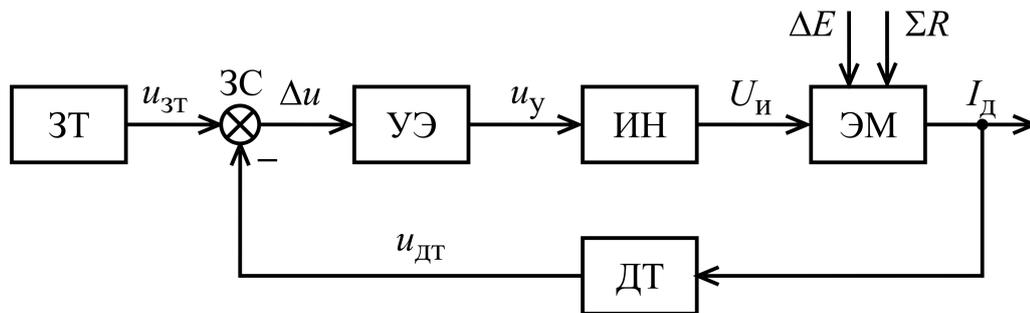


Рисунок 3.44 - Функциональная схема контура стабилизации тока

Внешними воздействиями для данного контура регулирования является приведенная небалансная э. д. с. якорей испытуемых генератора и двигателя ΔE и суммарное сопротивление обмоток электромашин ΣR .

Значение ΔE растёт с течением времени тепловых испытаний и может считаться практически постоянной при проверках частоты вращения и коммутации. Небалансная э. д. с. ΔE – величина, имеющая характер варьирования, зависящий от варианта схемы взаимного нагружения, в том числе – от принятого способа компенсации потерь холостого хода.

3.5.2 Прямой способ компенсации потерь холостого хода

Данный способ реализуется путем использования внешнего источника механической мощности (дополнительного двигателя), соединенного с валами испытуемых электромашин [67].

Функциональная схема контура стабилизации угловой скорости вращения приведена на рис. 3.45. Контур включает в себя задатчик угловой скорости ЗУС, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, источник момента ИМ (дополнительный двигатель), роторы испытуемых электромашин ММ (механическая часть машин) и датчик угловой скорости ДУС [112].

Управляющей координатой в данной системе является напряжение задатчика скорости $u_{зС}$, а управляемой координатой – угловая скорость вращения вала двигателя $\omega_{д}$.

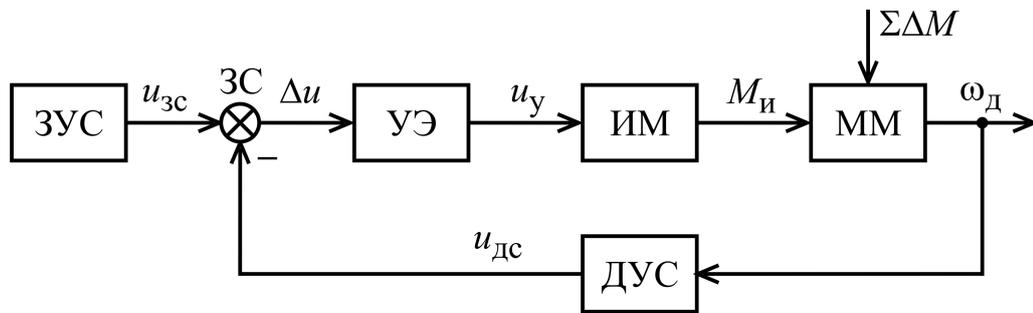


Рисунок 3.45 - Функциональная схема контура стабилизации угловой скорости

Напряжение управления u_y определяет величину механического момента $M_{и}$, развиваемого источником момента ИМ и, в свою очередь, связано с напряжением рассогласования Δu принятым законом регулирования.

Внешним воздействием для данного контура регулирования является момент сопротивления $\Sigma \Delta M$, приведенный к валу двигателя и обусловленный потерями холостого хода.

3.5.3 Косвенные способы компенсации электрических потерь

Такой способ заключается в создании небалансной положительной э. д. с. в электрическом контуре последовательно включенных обмоток испытуемых электромашин [99].

Электрические потери компенсируются либо источником механической мощности, либо параллельно включенным источником электрической мощности.

В обоих случаях добавочная мощность дополнительного источника преобразуется из механической в электрическую в испытуемом генераторе.

В случае использования параллельного источника напряжения его добавочная электрическая мощность предварительно преобразовывается в механическую испытуемым двигателем.

Универсальная функциональная схема контура стабилизации тока для систем с косвенным способом компенсации электрических потерь приведена на рис. 3.46. Контур включает в себя датчик тока ЗТ, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, регулятор небалансной э. д. с. РНЭ, электрический контур испытуемых электромашин ЭМ и датчик тока ДТ.

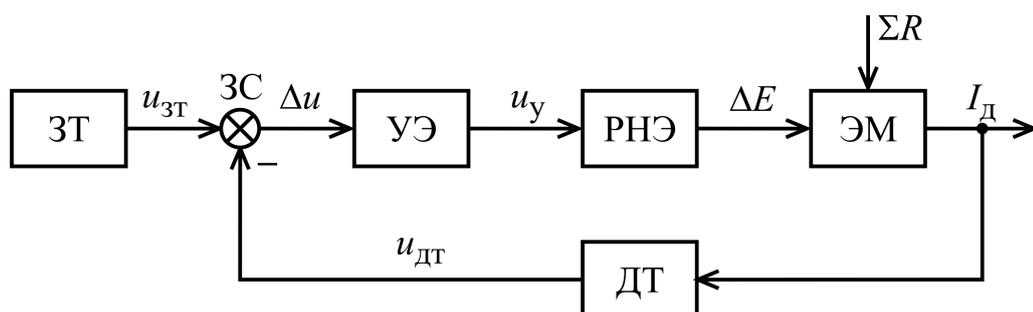


Рисунок 3.46 – Функциональная схема контура стабилизации тока для систем с косвенным способом компенсации электрических потерь

Управляющей координатой является напряжение на задатчике тока , а управляемой координатой – ток якоря испытуемого двигателя .

Управляющее воздействие связано с напряжением рассогласования принятым законом регулирования. Внешним воздействием для данного контура регулирования является суммарное сопротивление обмоток испытуемых электромашин .

В качестве регулятора небалансной э. д. с. (РНЭ) в зависимости от варианта схемы взаимного нагружения используется: регулятор поля, механический вариатор, конвертор напряжения (тока), источник угловой скорости [99].

Путем изменения напряжения , в соответствии с принятым вариантом, системой автоматического управления могут регулироваться: разница магнитных потоков испытуемых электромашин, передаточное число вариатора, коэффициент передачи по напряжению (току) конвертора, величина добавки угловой скорости источника.

3.5.4 Косвенные способы компенсации потерь холостого хода

Такие способы заключаются в создании положительного небалансного электромагнитного момента испытуемого двигателя [99]. Сами потери холостого хода компенсируются либо источником напряжения, включенным последовательно, либо источником угловой скорости. При этом добавочная мощность дополнительного источника преобразуется из электрической в механическую в испытуемом двигателе. В случае использования источника угловой скорости, его добавочная механическая мощность предварительно преобразуется в электрическую в испытуемом генераторе [66].

Универсальная функциональная схема контура стабилизации угловой скорости для систем с косвенным способом компенсации потерь холостого хода приведена на рис. 3.47.

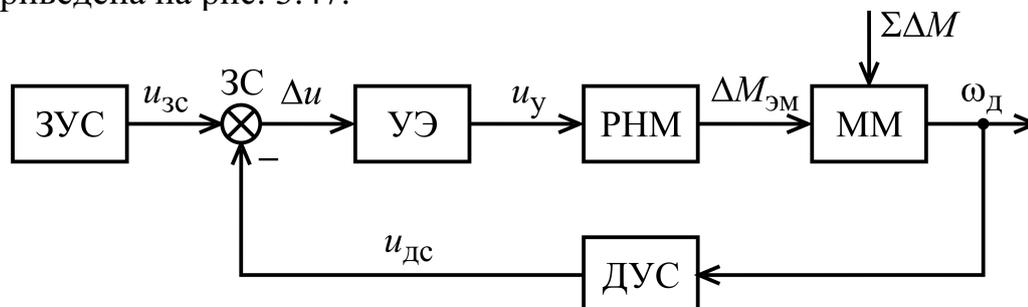


Рисунок 3.47 - Функциональная схема контура стабилизации угловой скорости при косвенном способе компенсации потерь холостого хода

Контур включает в себя задатчик угловой скорости ЗУС, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, регулятор небалансного электромагнитного момента РНМ, роторы испытуемых электромашин ММ и датчик угловой скорости ДУС.

Управляющей координатой является напряжение задатчика угловой скорости $U_{\text{ЗУС}}$, а управляемой координатой – угловая скорость вала испытуемого двигателя $\omega_{\text{в}}$.

Напряжение управления $U_{\text{уп}}$ связано с напряжением рассогласования $U_{\text{р}}$ принятым законом регулирования. Внешним воздействием для данного контура регулирования является момент сопротивления $M_{\text{ср}}$.

В качестве регулятора небалансного электромагнитного момента РНМ в зависимости от варианта схемы взаимного нагружения используется: регулятор поля, механический вариатор, конвертор напряжения (тока), параллельный источник напряжения.

Изменением напряжения $U_{\text{уп}}$ в системе автоматического управления регулируется разница магнитных потоков испытуемых электромашин, передаточное число вариатора, коэффициент передачи конвертора напряжения (тока), напряжение параллельно включенного источника.

Вариант компенсации потерь холостого хода источником напряжения, включенным параллельно испытуемому двигателю, требует отдельного рассмотрения.

3.5.5 Компенсация потерь холостого хода источником напряжения, включенным параллельно

При данном способе компенсации потерь небалансная электромагнитная мощность испытуемых электромашин создаётся за счет подпитки обмотки якоря испытуемого двигателя током параллельного источника электрической мощности [66]. Как правило, такой источник называют линейным генератором (преобразователем).

Строго говоря, исходя из электромеханических принципов обеспечения взаимной нагрузки электромашин [67], данный источник электрической мощности должен быть источником тока. Учитывая тот факт, что потери холостого хода не зависят от температуры перегрева обмоток электрической машины, стабилизация частоты вращения при стабилизированном токе в последовательном контуре обмоток испытуемых электромашин может быть достигнута путем обеспечения постоянства тока параллельного источника. При этом в цепи обратной связи системы автоматического управления используется датчик тока параллельного источника электрической мощности. Это в значительной степени смягчает характер протекания переходных и аварийных процессов в системе взаимного нагружения.

Широкое распространение систем взаимной нагрузки с параллельным источником напряжения объясняется, прежде всего, простотой ручного регулирования напряжения на испытуемых электромашинах [19].

По своей сути такой источник является стабилизатором напряжения. Как правило, это генератор постоянного тока с многократным запасом мощности, приводимый во вращение асинхронным двигателем. Жесткость характеристики асинхронного двигателя и насыщенность магнитной системы генератора обеспечивают удовлетворительную стабилизацию напряжения на испытуемых электромашинах. При переходных процессах электромашиный источник может переходить в двигательный режим и допускает многократные кратковременные перегрузки по току. При использовании статического преобразователя стабилизация напряжения на его выходе требует высокой степени защиты данного источника от перегрузок при переходных и аварийных процессах.

Как показывает опыт эксплуатации испытательных станций, появление кругового огня на одной из испытуемых электромашин практически всегда влечет за собой круговой огонь на коллекторе линейного генератора. Выход из строя линейного генератора – нередкий случай в опыте эксплуатации испытательных станций без применения специальной токовой защиты в цепи параллельного источника напряжения.

На рис. 3.48 приведена функциональная схема контура стабилизации угловой скорости для систем взаимного нагружения с параллельным источником. Контур включает в себя задатчик тока подпитки якоря испытуемого генератора ЗТП, звено сравнения ЗС, управляющий элемент УЭ, источник напряжения ИН, электрический контур испытуемых электромашин ЭМ, их механическая часть (роторы) ММ и датчик тока подпитки ДТП.

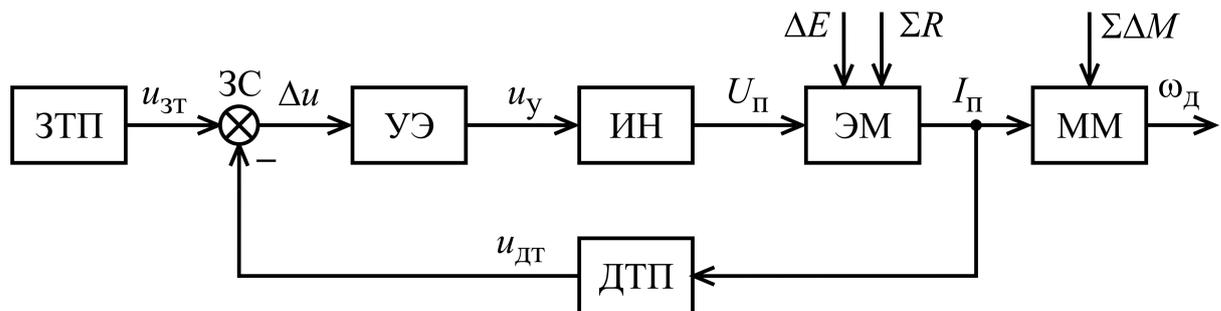


Рисунок 3.48 - Функциональная схема контура стабилизации угловой скорости для систем взаимного нагружения с параллельным источником

Управляющей координатой является напряжение на задатчике тока, а управляемой координатой – ток параллельного источника , который в статическом режиме определяет угловую скорость .

Напряжение управления определяет величину напряжения на выходе источника и связано, в свою очередь, с напряжением рассогласования принятым законом регулирования.

Внешними воздействиями для рассматриваемого контура регулирования являются небалансная э. д. с. якорей и суммарное сопротивление обмоток испытуемых электромашин. Суммарный момент сопротивления является внешним воздействием для части функциональной схемы, включающей звено ММ. Зависимость и определяет статическую характеристику, которая для определённой испытуемой электромашин является однозначной.

Применение систем автоматической стабилизации параметров нагружения тяговых электрических машин при их испытаниях по методу взаимной нагрузки позволяют применять схемы взаимной нагрузки, обеспечение устойчивости которых при ручном управлении весьма проблематично.

3.6 Выводы по разделу 3

В результате исследований, проведенных в разделе 3, получены следующие выводы:

- регулирование небалансной электромагнитной мощности взаимно нагруженных тяговых электромашин может осуществляться изменением разницы токов якорей, разницы магнитных потоков и разницы угловых скоростей вращения якорей;
- регулирование разницы магнитных потоков взаимно нагруженных тяговых электромашин путём подпитки имеет ограничение, связанное с насыщением магнитной системы электромашин;
- расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин существенно расширяет необходимый диапазон регулирования их магнитных потоков при использовании косвенных способов компенсации потерь;
- предложенная методика моделирования магнитных характеристик позволяет определять коэффициенты аппроксимирующей зависимости удельной э. д. с. от тока возбуждения по одним только типовым параметрам тяговой электромашин;
- в качестве обратных связей в системах автоматического регулирования системами взаимного нагружения рационально использовать величины тока нагрузки электромашин и угловой скорости.

РАЗДЕЛ 4

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПРИ ИХ ИСПЫТАНИИ НА НАГРЕВ МЕТОДОМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ

4.1 Потери мощности в тяговых электромашинах при испытании

4.1.1 Электрические потери

Электрические потери мощности при испытании электромашины определяются в виде [75, 80]

$$\begin{aligned}
 & \text{где } I_{\text{н}} \text{ – ток нагрузки при испытании;} \\
 & \quad R_{\text{д}} \text{ – общее сопротивление обмоток двигателя;} \\
 & \quad U_{\text{щ}} \text{ – падение напряжения на щётках;} \\
 & \quad W_{\text{эл}} \text{ Энергия электрических потерь при испытании электромашины} \\
 & \quad t_{\text{исп}} \text{ ,} \tag{4.1}
 \end{aligned}$$

где $t_{\text{исп}}$ – время проведения испытания.
Учитывая, что испытания электрических машин проводят при условии [1] и то, что большую часть электрических потерь составляют потери в обмотках электромашины, формулу для определения можно записать в упрощенном виде

$$\tag{4.2}$$

Сопротивление складывается из сопротивлений отдельных обмоток

$$\tag{4.3}$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря;
 $R_{\text{дп}}$ – сопротивление обмоток дополнительных полюсов;
 $R_{\text{к}}$ – сопротивление компенсационных обмоток;

– сопротивление обмоток возбуждения.

Сопротивление каждой из обмоток является функцией температуры и изменяется в течение времени испытания [113]

$$R_{\theta} = R_{15} [1 + \alpha (\theta - 15)] \quad (4.4)$$

где R_{15} – сопротивление обмотки при температуре 15 °С;

α – температурный коэффициент сопротивления, отнесенный к температуре 15 °С (для меди $\alpha = 0,00393$);

θ_0 – температура обмотки в холодном состоянии (в начале испытания);

θ_{∞} – температура перегрева обмотки над температурой окружающего воздуха ($\theta_{\infty} = \theta_0 + \Delta\theta$).

В процессе испытания температура перегрева $\Delta\theta$ изменяется по закону, близкому к экспоненциальному [114]. Зависимость сопротивления каждой обмотки от температуры перегрева имеет вид

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\infty} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.5)$$

$$R_{\theta} = R_{15} [1 + \alpha (\theta_0 + \Delta\theta_{\infty} (1 - e^{-t/\tau}) - 15)] \quad (4.6)$$

или $R_{\theta} = R_{15} [1 + \alpha (\theta_0 + \Delta\theta_{\infty} (1 - e^{-t/\tau}) - 15)]$,

где R_{15} – сопротивление обмотки в холодном состоянии.

Так как каждая обмотки двигателя нагревается по своему закону изменения [105], строго говоря, для определения зависимости необходимо отдельно рассматривать зависимости:

• Тогда электрические потери в меди обмоток

$$P_{\text{мед}} = I_a^2 R_{a\theta} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}\theta} \quad (4.7)$$

где I_a , $I_{\text{в}}$ – токи якоря и возбуждения испытуемой электромашинны соответственно.

$$P_{\text{мед}} = I_a^2 R_{a15} [1 + \alpha (\theta_0 + \Delta\theta_{a\infty} (1 - e^{-t/\tau_a}) - 15)] + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}15} [1 + \alpha (\theta_0 + \Delta\theta_{\text{в}\infty} (1 - e^{-t/\tau_{\text{в}}}) - 15)] \quad (4.8)$$

Здесь необходимо заметить, что для многих вариантов схем взаимной нагрузки для одной из испытуемых электромашин (двигателя или генератора) [68].

4.1.2 Магнитные потери

К магнитным потерям в тяговых электрических машинах относятся потери в ярме и зубцах сердечника якоря, а также потери в стали полюсных наконечников главных полюсов, обусловленные зубчатым строением якоря и самого полюсного наконечника.

Наиболее широко известна формула для определения магнитных потерь в виде [80,81]

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} \quad (4.9)$$

где m_1 , m_2 – массы стали ярма и зубцов якоря соответственно;

p_1 , p_2 – удельные потери в стали ярма и зубцов якоря соответственно.

Удельные потери в каждом из элементов могут быть определены по формулам:

$$p_1 = k_1 f B_1^2 \quad (4.10)$$

$$p_2 = k_2 f B_2^2 \quad (4.11)$$

где k_1 , k_2 – удельные потери от гистерезиса в ярме и зубцах якоря соответственно;

k_3 , k_4 – удельные потери от вихревых токов в ярме и зубцах якоря соответственно.

Определяются перечисленные составляющие удельных магнитных потерь следующим образом [80]:

$$k_1 = 0,0001 \quad (4.12)$$

$$k_2 = 0,0001 \quad (4.13)$$

$$k_3 = 0,0001 \quad (4.14)$$

$$k_4 = 0,0001 \quad (4.15)$$

где f – частота перемагничивания стали якоря;

B_1 , B_2 – индукции в ярме и зубцах якоря соответственно.

Объединив формулы (4.9)-(4.15), после преобразований получим

$$\dots \quad (4.16)$$

Индукции в рассматриваемых элементах могут быть определены как:

$$\dots; \quad (4.17)$$

$$\dots, \quad (4.18)$$

где Φ – магнитный поток тягового электродвигателя;

S_1, S_2 – площади поперечного сечения соответствующих элементов.

Магнитный поток может быть найден из формулы для э. д. с.

$$\dots, \quad (4.19)$$

где σ – конструктивная постоянная электромашины;

ω – угловая скорость вращения якоря.

Конструктивная постоянная определяется как [75]

$$\dots, \quad (4.20)$$

где p и m – число пар полюсов и параллельных ветвей электромашины соответственно;

α – число активных проводников якоря.

Угловая скорость вращения якоря может быть выражена через частоту перемагничивания якоря f как [75]

$$\dots. \quad (4.21)$$

Объединив формулы (4.19) - (4.21), после преобразований получим выражение для магнитного потока электромашины в виде зависимости от э. д. с. и частоты перемагничивания

$$\dots. \quad (4.22)$$

Объединив формулы (4.16) - (4.18) и (4.22), после преобразований получим выражение для определения магнитных потерь в виде

$$\dots \quad (4.23)$$

Выполнив замену

$$\dots \quad (4.24)$$

получим более простое выражение

$$\dots \quad (4.25)$$

Заметим, что \dots – постоянная для данной электромашины. Таким образом, магнитные потери в тяговой электромашине вне зависимости от вида её возбуждения пропорциональны квадрату э. д. с. и выражению

, где \dots измеряется в герцах.

$$\dots \quad (4.26)$$

Для большинства тяговых электромашин э. д. с. с приемлемой для данного анализа степенью допущений можно считать приблизительно равной напряжению на якоре [19]. При этом ошибка для режимов работы электромашины, близких к номинальному, не будет превышать 4 %.

$$\dots \quad (4.27)$$

Тогда магнитные потери в тяговой электромашине будут пропорциональны квадрату напряжения

$$\dots \quad (4.28)$$

Выражение (4.28), полученное в данном анализе, даёт возможность построить универсальную зависимость магнитных потерь в тяговых электродвигателях в относительных единицах от частоты перемагничивания якоря в герцах.

Магнитные потери в относительных единицах могут быть определены по формуле

(4.29)

Результаты расчета зависимости по формуле (4.29) приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1 – Результаты расчета зависимости

| , Гц | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| , о.е. | 0,113 | 0,063 | 0,046 | 0,038 | 0,033 | 0,029 | 0,027 | 0,025 | 0,024 | 0,023 |

Учитывая, что значения получены в относительных единицах, и для удобства пользования зависимостью есть смысл привести

относительные потери к частоте перемагничивания. Эта частота приблизительно соответствует часовому режиму работы многих современных шестиполюсных тяговых электродвигателей электровозов.

После преобразований получим новые, более удобные, значения

в относительных единицах, которые приведены в табл. 4.2. График полученной зависимости приведен на рис. 4.1.

Таблица 4.2 – Результаты расчета универсальной зависимости

| , Гц | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|--------|------|------|------|------|----|-------|-------|------|-------|-------|
| , о.е. | 3,45 | 1,92 | 1,41 | 1,15 | 1 | 0,898 | 0,825 | 0,77 | 0,728 | 0,694 |

Отметим, что полученная универсальная зависимость является общей для всех тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока вне зависимости от способа их возбуждения (последовательное, параллельное, смешанное). Она может использоваться как для двигательного, так и генераторного режимов работы электромашин.

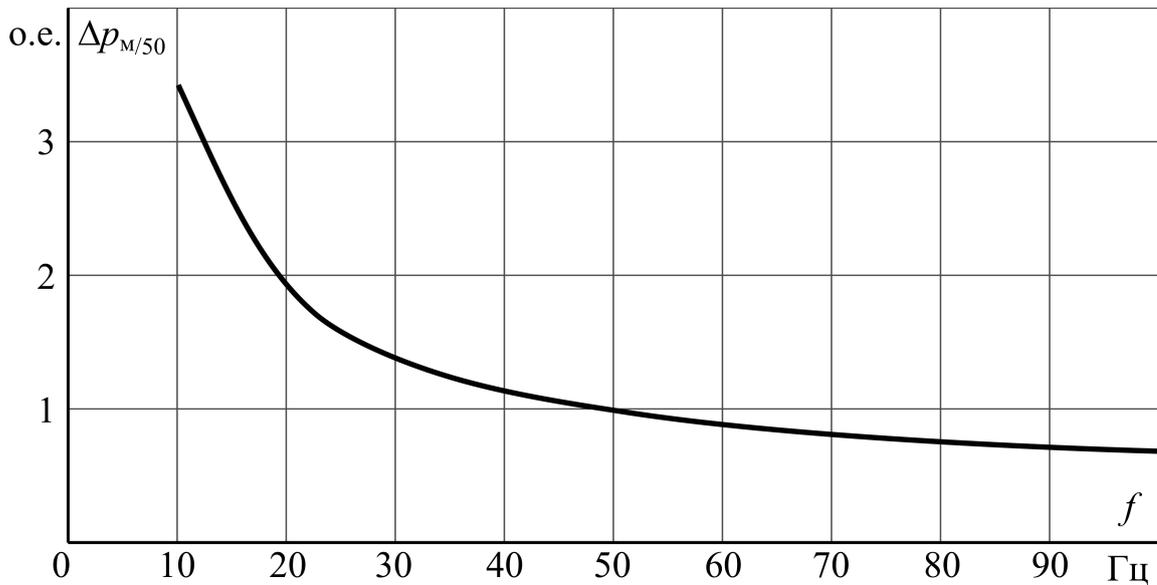


Рисунок 4.1 – Универсальная зависимость

Формула для определения относительных магнитных потерь, приведенных к частоте перемагничивания, равной 50 Гц (табл. 4.2), будет иметь вид

$$(4.30)$$

Эта же формула может быть преобразована к виду, удобному для проведения расчетов магнитных потерь тяговых электродвигателей через частоту вращения в об/мин.

$$(4.31)$$

Для шестиполюсных тяговых двигателей при

$$(4.32)$$

Подставив (4.32) в (4.31), получим формулу для относительных магнитных потерь, приведенных к частоте вращения якоря в виде

$$(4.33)$$

Результаты расчета по формуле (4.33) приведены в табл. 4.3, а графически эта же зависимость представлена на рис. 4.2.

Таблица 4.3 – Результаты расчёта универсальной зависимости

| | | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| , об/мин | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
| , о.е. | 3,45 | 1,92 | 1,41 | 1,15 | 1 | 0,898 | 0,825 | 0,77 | 0,728 | 0,694 |

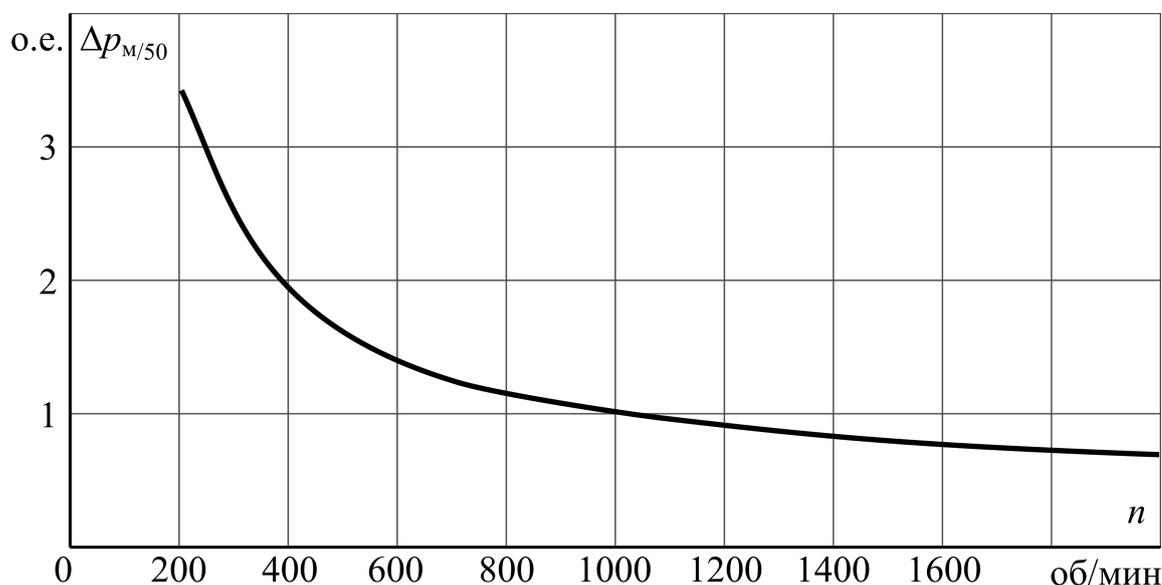


Рисунок 4.2 – Универсальная зависимость
для шести полюсных тяговых электродвигателей

Для проверки адекватности полученной характеристики произведем по ней расчет зависимости магнитных потерь двигателя ДТК-820 от частоты вращения его якоря при номинальном напряжении, равном 1000 В. В качестве исходных данных будем использовать значения магнитных потерь, полученные для часовой частоты вращения якоря при проведении квалификационных испытаний данного тягового электродвигателя.

Магнитные потери при нормальном поле в часовом режиме

Часовая частота вращения якоря электродвигателя

Частота перемагничивания якоря в часовом режиме

Значения , соответствующие частоте 46 Гц,

Результаты расчета зависимости для тягового электродвигателя ДТК-820 приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчёта зависимости для тягового электродвигателя ДТК-820

| | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| , об/мин | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
| , Вт | 29460 | 16390 | 12030 | 9850 | 8550 | 7680 | 7050 | 6580 | 6220 | 5930 |

Графически эта зависимость представлена на рис. 4.3 в виде непрерывной кривой. Отдельными маркерами на этом же рисунке показаны значения магнитных потерь, полученные в результате квалификационных испытаний этого электродвигателя. Приведенные данные получены для номинального значения напряжения на тяговом двигателе и соответствуют трем различным режимам ослабления поля: ; ;

Как видно из рис. 4.3, магнитные потери при постоянном напряжении практически не зависят от степени ослабления поля тягового двигателя. Совпадение данных эксперимента с результатами расчетов в диапазоне частот от 800 об/мин и выше практически полное. Плохое совпадение теоретических результатов и данных эксперимента наблюдается при частотах вращения, близких к 800 об/мин. Здесь необходимо отметить, что этим частотам при номинальном напряжении, для которого приведены данные, соответствуют значения тока якоря, намного превышающие часовой ток тягового двигателя.

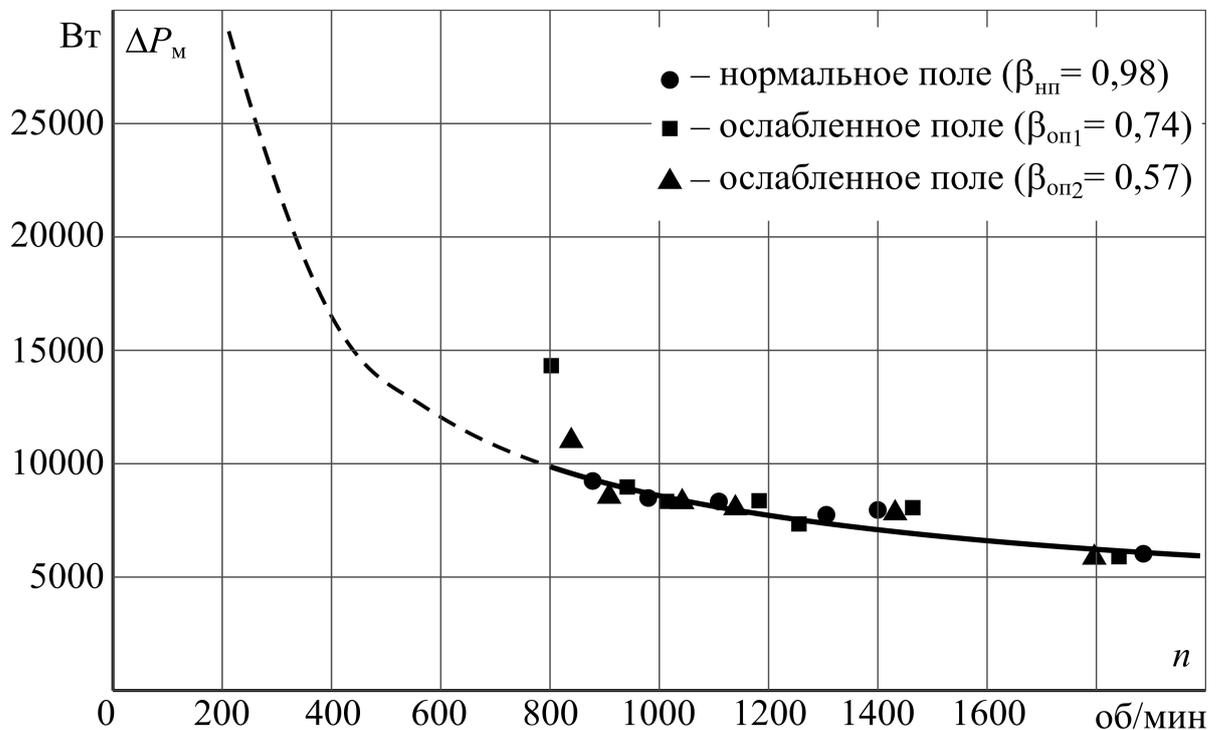


Рисунок 4.3 – Реальная и расчётная зависимости для тягового электродвигателя ДТК-820

Участок кривой зависимости , соответствующий частотам вращения менее 800 об/мин, для номинального напряжения является фиктивным именно по причине нереально больших значений тока якоря. На рис. 4.3 этот участок показан пунктирной линией. При напряжениях, меньших номинального значения, этот участок универсальной характеристики будет реальным и может использоваться в расчетах магнитных потерь в тяговых электромашинах.

Проведенный анализ позволяет сделать выводы о том, что при постоянном напряжении на зажимах тягового электродвигателя потери от вихревых токов не зависят от частоты вращения якоря, а потери от гистерезиса – обратно пропорциональны частоте его вращения.

При этом потери на вихревые токи пропорциональны квадрату напряжения и не зависят от частоты вращения якоря, а потери на гистерезис пропорциональны квадрату напряжения при фиксированной частоте вращения якоря.

Данные выводы справедливы как для двигательного, так и генераторного режимов работы тяговых электромашин при любом способе их возбуждения. Результаты проведенного анализа могут быть использованы для определения магнитных потерь в тяговых электрических машинах при любых режимах их эксплуатации или испытаний.

4.1.3 Механические потери

Механические потери в тяговых электрических машинах состоят из потерь [80]:

- от трения в якорных подшипниках;
- от трения щеток о коллектор;
- на вентиляцию (при самовентиляции).

Потери на трение в тяговых подшипниках при часовом режиме определяются в упрощённом виде [80]

$$P_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \omega, \quad (4.34)$$

где $P_{\text{тр}}$ – часовая мощность тяговой электромашин.

Зависимость потерь на трение в подшипниках от угловой скорости может быть представлена в виде

$$P_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \omega,$$

где $M_{\text{тр}}$ – суммарный момент трения в подшипниках;
 ω – угловая скорость.

Момент трения пропорционален коэффициенту трения и нагрузке на подшипник. Если нагрузку и коэффициент трения считать постоянными, то зависимость является прямо пропорциональной,

так как

Потери от трения щёток о коллектор определяются в виде [80]

$$P_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \omega, \quad (4.35)$$

где $F_{\text{тр}}$ – общая сила трения щёток о коллектор;
 v – линейная скорость коллектора.

Сила трения пропорциональна давлению на щётку и коэффициенту трения щётки о коллектор. Если эти параметры считать неизменными, то зависимость $F_{\text{тр}}$ будет также прямо

пропорциональной, так как

Затраты мощности на вентиляцию (при самовентиляции) определяются в виде [19]

$$P_{\text{вент}} = \frac{1}{2} \rho V v^2 \quad (4.36)$$

где V и v – расход и напор охлаждающего воздуха соответственно;
 ρ – к. п. д. вентилятора.

Зависимость затрат мощности на самовентиляцию от угловой скорости вала электромашины может быть представлена в виде

$$P_{\text{вент}} = A \omega^2 + B \omega \quad (4.37)$$

где $P_{\text{вент}}$ – затраты мощности на самовентиляцию при часовой частоте вращения;

ω и $\omega_{\text{ч}}$ – текущее и часовое значение угловой скорости соответственно.

Зависимость механических потерь от угловой скорости (частоты вращения) является характеристикой, которая в соответствии с [1] снимается для каждой тяговой электромашины при проведении квалификационных испытаний.

Предварительный анализ характеристик механических потерь в тяговых двигателях с внешней независимой вентиляцией показывает, что они имеют вид парабол и удовлетворительно описываются уравнением вида [115]

$$P_{\text{мех}} = A \omega^2 + B \omega$$

где A и B – постоянные коэффициенты.

При этом момент сопротивления от механических потерь может быть найден как

Анализ протоколов квалификационных испытаний современных тяговых двигателей показывает, что зависимости механических потерь от угловой скорости для всех тяговых двигателей электровозов могут быть представлены в виде универсальной зависимости

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{мех}}^0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2, \quad (4.38)$$

где $P_{\text{мех}}$ – приведенные механические потери;
 ω – приведенная угловая скорость (частота вращения).

где $P_{\text{мех}}^0$ – механические потери при часовом значении угловой скорости.

где ω_0 – значение угловой скорости в часовом режиме.
 Приведенный момент сопротивления от механических потерь мощности может быть представлен в виде

где $M_{\text{сопр}}^0$ – момент сопротивления от механических потерь мощности при часовом значении угловой скорости.

Нетрудно убедиться в справедливости выражения для приведенного момента сопротивления от механических потерь мощности

Для часового режима:

;

Если задаться условием прохождения аппроксимирующей зависимости (4.38) через точку с координатами (1; 1), соответствующую часовому режиму, то коэффициенты a и b в выражении (4.38) будут связаны между собой формулой вида

Анализ протоколов квалификационных испытаний тяговых двигателей электровозов с независимой вентиляцией показывает, что коэффициент « a » изменяется в интервале , а коэффициент « b » – соответственно в интервале . Необходимо отметить, что, несмотря на достаточно широкий диапазон изменения коэффициентов a и b , сами зависимости расходятся при диапазоне изменения не более, чем на 20 %.

Для практической оценки степени зависимости механических потерь от угловой скорости (частоты вращения) для тяговых двигателей с независимой вентиляцией может быть использована универсальная зависимость

(4.39)

Приведенный момент сопротивления, обусловленный механическими потерями, для данного типа тяговых двигателей

(4.40)

Результаты расчета зависимости по выражению (4.39) представлены в табл. 4.5. Графически зависимость представлена на рис.4.4.

Таблица 4.5 – Универсальная характеристика механических потерь для тяговых электродвигателей с независимой вентиляцией

| | | | | | | | | |
|--|------|-----|------|-----|------|-----|-----|------|
| | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 |
| | 0,87 | 1,0 | 1,29 | 1,6 | 1,94 | 2,3 | 2,7 | 3,12 |

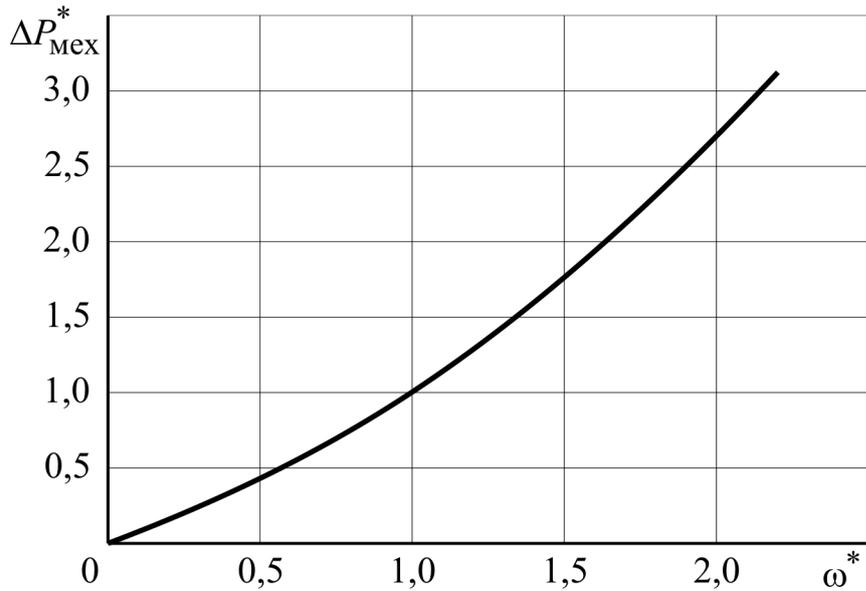


Рисунок 4.4 – Универсальная характеристика механических потерь для тяговых электродвигателей с независимой вентиляцией

Ошибка при использовании данной характеристики для реальных тяговых двигателей может достигать до 10 %. Необходимо отметить, что зависимости механических потерь от частоты вращения тяговых двигателей одного типа на практике могут отличаться друг от друга на эти же 10 %, что позволяет считать такое упрощение допустимым, а саму универсальную характеристику, приведенную на рис. 4.4, как удовлетворительно

описывающую зависимость для тяговых электродвигателей с независимой вентиляцией.

Характеристика для тяговых двигателей с независимой вентиляцией, рассчитанная по формуле (4.40), графически представлена на рис. 4.5.

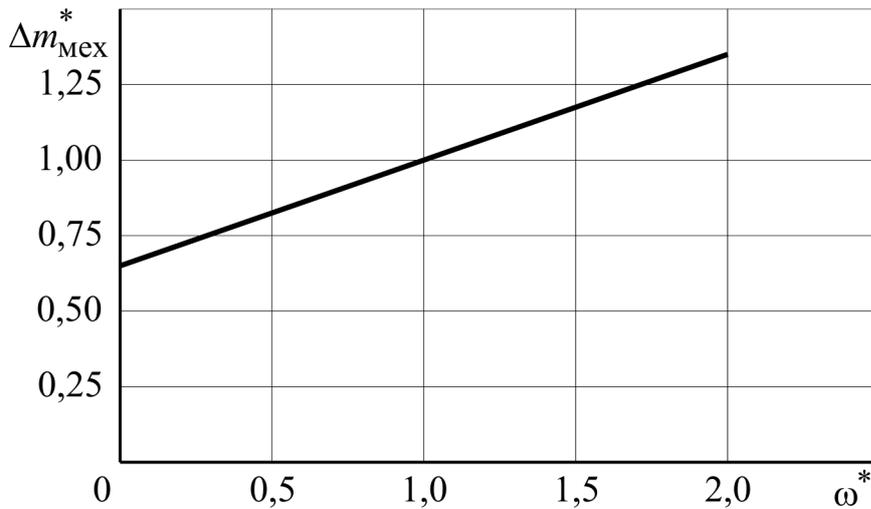


Рисунок 4.5 – Универсальная характеристика момента сопротивления для тяговых электродвигателей с независимой вентиляцией

Анализ зависимостей механических потерь от частоты вращения тяговых электрических двигателей электропоездов с самовентиляцией показывает, что и для описания характеристики $M_{\text{мех}}$ для данного типа электромашин также подходит аналитическое выражение (4.38). Отличие будет лишь в значениях коэффициентов a и b . Для тяговых двигателей с самовентиляцией характеристики $M_{\text{мех}}$ более круто возрастающие, в сравнении с этими же характеристиками тяговых электродвигателей с независимой вентиляцией.

Зависимость приведенных механических потерь, достаточно точно описывающая реальные характеристики механических потерь тяговых электродвигателей с самовентиляцией, имеет вид

$$M_{\text{мех}} = a \cdot \omega^b \quad (4.41)$$

Приведенный момент сопротивления, обусловленный механическими потерями, для данного типа тяговых двигателей

$$M_{\text{соп}} = M_{\text{мех}} \quad (4.42)$$

Результаты расчета зависимости $M_{\text{соп}}$ по выражению (4.41) представлены в табл. 4.6. Графически данная зависимость представлена на рис. 4.6.

Таблица 4.6 – Универсальная характеристика механических потерь для тяговых электродвигателей с самовентиляцией

| | | | | | | | | |
|--|------|-----|------|------|------|------|-----|------|
| | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 |
| | 0,84 | 1,0 | 1,36 | 1,77 | 2,22 | 2,74 | 3,3 | 3,92 |

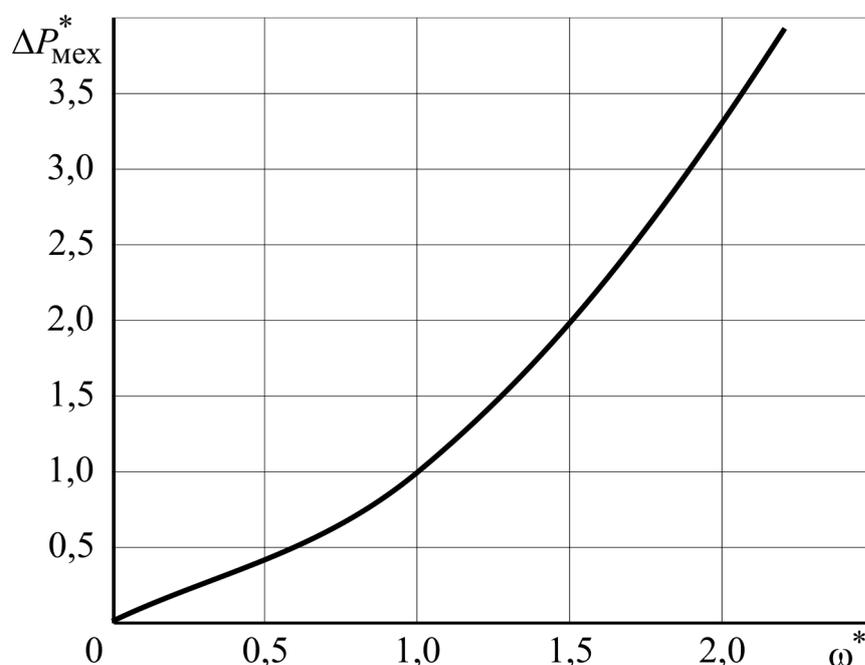


Рисунок 4.6 – Универсальная характеристика механических потерь для тяговых электродвигателей с самовентиляцией

Характеристика для тяговых электродвигателей с самовентиляцией, рассчитанная по формуле (4.42), графически представлена на рис. 4.7.

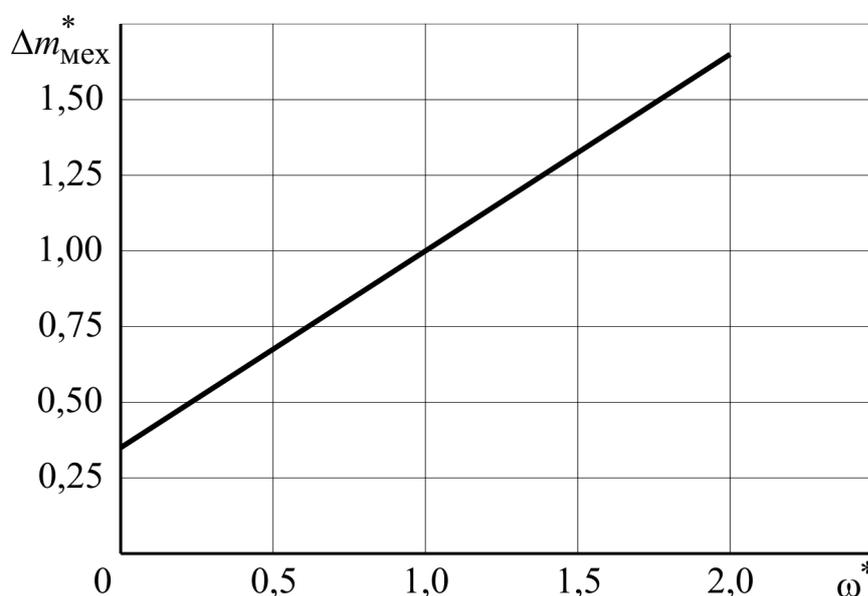


Рисунок 4.7 – Универсальная характеристика момента сопротивления для тяговых электродвигателей с самовентиляцией

4.2 Влияние видов потерь мощности на превышение температуры обмоток тяговых электромашин при их испытании

Степень соответствия характеров тепловых процессов, протекающих в обмотках тяговых электромашин при их испытании, и в условиях

эксплуатации во многом определяется принятой схемой испытаний. В соответствии с ГОСТ 2582-81 [1] при приемо-сдаточных испытаниях методом взаимной нагрузки режимы работы обеих испытуемых электромашин считают действительными несмотря на то, что тепловая нагруженность их обмоток может различаться [97]. Степень различия тепловой нагруженности обмоток пары испытуемых электромашин будет определяться принятым способом компенсации потерь в схеме взаимной нагрузки и степенью зависимости тепловых потенциалов обмоток от потерь мощности в различных активных частях электромашин [116-121].

Одним из важных условий обеспечения высокой информативности результатов и качества тепловых испытаний является одинаковая тепловая нагруженность лимитирующих обмоток испытуемого двигателя и генератора [104]. Тепловая перегрузка или недогрузка лимитирующей обмотки одной из испытуемых электромашин не даёт возможности адекватной оценки результатов испытаний на нагрев в случае перегрева перегруженной обмотки или недогрева недогруженной [96].

Требование ГОСТ 2582-81[1] в части токовой нагруженности испытуемых двигателей и генераторов является формальным, так как не учитывает ни схемы испытания, ни то, какая из обмоток электромашин является лимитирующей. Такая формализация оправдана самим декларативным принципом ограничения температуры перегрева обмоток по классу их изоляции.

Рассмотрим влияние каждого вида потерь в якоре на перегрев его обмотки. Для упрощения анализа будем учитывать только электрические и магнитные потери в активных частях якоря электромашин [19]. Общие добавочные потери при этом могут быть разделены на потери в меди и в стали, а следовательно отнесены к потерям, греющим медь и сталь соответственно [95]. Для решения поставленной задачи будем использовать упрощённую тепловую схему замещения якоря [19, 80], приведенную на рис. 4.8.

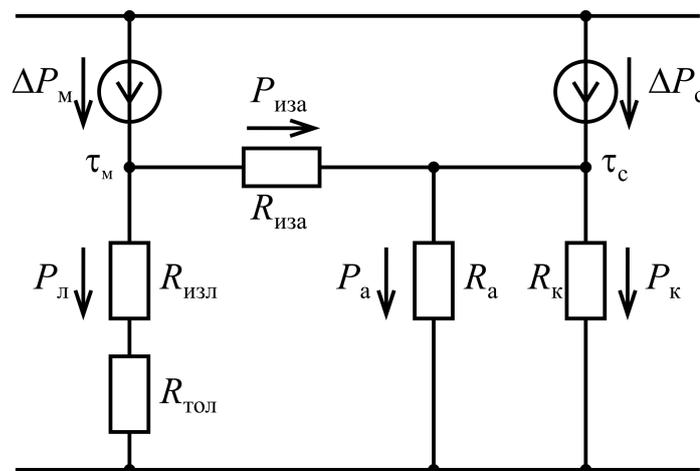


Рисунок 4.8 – Упрощённая тепловая схема замещения якоря

В схеме приняты следующие обозначения:

– превышение температуры меди обмотки якоря;

- превышение температуры стали якоря;
 - суммарные потери мощности в меди обмотки якоря;
 - суммарные потери мощности в стали якоря;
 - тепловое сопротивление потоку $Q_{акт}$ сквозь изоляцию активной части проводников якоря;
 - тепловое сопротивление потоку $Q_{лб}$ сквозь изоляцию лобовых частей проводников якоря;
 - тепловое сопротивление потоку $Q_{лбк}$ конвективного рассеивания с поверхности лобовых частей обмотки якоря;
 - тепловое сопротивление потоку $Q_{ср}$ конвективного рассеивания с поверхности сердечника якоря;
 - тепловое сопротивление потоку $Q_{вн}$ конвективного рассеивания с поверхности внутренних вентиляционных каналов сердечника якоря.
- Посредством теплового потока $Q_{акт}$ происходит кондуктивный теплообмен между медью и сталью якоря.

$$Q_{акт} = \lambda_{акт} \cdot F_{акт} \cdot \Delta T_{акт} \quad (4.42)$$

где $\lambda_{акт}$ – тепловая проводимость слоя изоляции обмотки якоря.

$$Q_{лб} = \lambda_{лб} \cdot F_{лб} \cdot \Delta T_{лб} \quad (4.43)$$

Передача тепла в окружающую среду от лобовых частей обмотки якоря носит кондуктивно-конвективный характер и может быть описана выражением

$$Q_{лбк} = \lambda_{лбк} \cdot F_{лбк} \cdot \Delta T_{лбк} \quad (4.44)$$

где $\lambda_{лбк}$ – эквивалентная тепловая проводимость лобовых частей, обусловленная теплопроводностью и теплоотдачей.

Конвективный теплообмен стали якоря с окружающей средой может быть описан уравнениями:

$$, \quad (4.45)$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ – тепловая проводимость, обусловленная конвективной теплоотдачей с поверхности стального пакета якоря;

$$, \quad (4.46)$$

где $\lambda_{\text{вк}}$ – тепловая проводимость, обусловленная конвективной теплоотдачей с поверхности вентиляционных каналов сердечника якоря.

Тепловые проводимости конвективной теплоотдачи с поверхности пакета якоря и вентиляционных каналов в нем:

$$; \quad (4.47)$$

Для тепловой схемы замещения (рис. 4.8) будут справедливы выражения:

$$; \quad (4.48)$$

$$. \quad (4.49)$$

В результате совместного решения уравнений (4.42) – (4.49) после ряда преобразований получим выражение для определения установившегося значения превышения температуры меди обмотки якоря в виде

$$. \quad (4.50)$$

Выражение (4.50) может быть представлено в виде

$$, \quad (4.51)$$

где α_1 и α_2 – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния каждого из видов потерь в якоре на температуру его обмотки.

$$. \quad (4.52)$$

$$\dots \quad (4.53)$$

В относительных параметрах выражение (4.51) можно представить в виде [122]

$$\dots \quad (4.54)$$

где θ – установившаяся температура меди обмотки якоря, отнесенная к установившемуся её значению $\theta_{\text{ном}}$ при номинальном режиме;

α_{Cu} , α_{St} – удельные значения потерь в меди и стали, отнесенные к соответствующим потерям $\alpha_{\text{Cu, ном}}$, $\alpha_{\text{St, ном}}$ в номинальном режиме;

β_{Cu} и β_{St} – удельные безразмерные весовые коэффициенты влияния потерь в меди и стали соответственно.

$$\dots \quad (4.55)$$

$$\dots \quad (4.56)$$

$$\dots \quad (4.57)$$

$$\dots \quad (4.58)$$

Нетрудно убедиться в справедливости выражения

$$\dots \quad (4.59)$$

Отметим, что коэффициенты β_{Cu} и β_{St} определяются самим исполнением электромашин и, по сути, являются конструктивными. Они могут быть рассчитаны для каждого типа тягового электродвигателя по чертежным размерам и данным квалификационных испытаний.

Для практических расчетов степени влияния перегрузки или недогрузки по току и магнитному потоку на температуру обмотки якоря

испытываемой электромашини могут быть использованы известные формулы [80] для определения тепловых сопротивлений схемы замещения, приведенной на рис. 4.8.

$$R_{\text{теп}} = \frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}} S_{\text{л}}}, \quad (4.60)$$

где $\delta_{\text{л}}$ – эквивалентная толщина изоляции лобовых частей;
 $\lambda_{\text{л}}$ – удельная теплопроводность изоляции;
 $S_{\text{л}}$ – площадь поверхности лобовых частей.

$$R_{\text{теп}} = \frac{L_{\text{л}}}{\alpha_{\text{л}} D_{\text{я}}}, \quad (4.61)$$

где $D_{\text{я}}$ – диаметр якоря;
 $L_{\text{л}}$ – суммарная длина вылетов передней и задней лобовых частей обмотки.

$$R_{\text{теп}} = \frac{L_{\text{л}}}{\alpha_{\text{л}} D_{\text{я}}}, \quad (4.62)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи.

$$R_{\text{теп}} = \frac{L_{\text{л}}}{\alpha_{\text{л}} D_{\text{я}}}, \quad (4.63)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи в спокойной атмосфере;
 $v_{\text{охлажд}}$ – скорость охлаждающего воздуха в осевом направлении;
 $v_{\text{якоря}}$ – линейная скорость якоря.

$$R_{\text{теп}} = \frac{L_{\text{л}}}{\alpha_{\text{л}} D_{\text{я}}}, \quad (4.64)$$

где $\delta_{\text{акт}}$ – эквивалентная толщина изоляции активных частей проводников обмотки якоря;
 $n_{\text{пазов}}$ – число пазов якоря;
 $L_{\text{акт}}$ – длина активной части якоря;
 $P_{\text{паза}}$ – расчетный периметр паза.

где b и h – ширина и глубина паза соответственно.

$$\dots \quad (4.65)$$

$$\dots \quad (4.66)$$

где n – число вентиляционных каналов;

d – диаметр вентиляционного канала.

Необходимо отметить, что выражение (4.50), полученное в результате проведенного анализа, справедливо для установившегося режима и не подходит для определения температуры перегрева обмотки якоря в часовом режиме, который является нестационарным. В соответствии с ГОСТ 8582-81 приемо-сдаточные испытания тяговых электродвигателей электроподвижного состава проводят именно в часовом режиме. Учитывая монотонно возрастающий характер функции θ [19], можно сделать вывод о том, что выражение (4.54), записанное в относительных единицах, будет справедливо и для нестационарного часового режима. При этом все параметры, входящие в выражение (4.54) должны быть приведены к часовым значениям потерь мощности. При правильно определенных часовом и длительном режиме тягового электродвигателя реальное превышение температуры θ будет одинаковым для обоих режимов и равным допустимому значению перегрева.

Определение превышения температуры θ не является целью данного анализа, однако необходимо отметить, что решение этой задачи возможно только с учётом изменения сопротивления обмотки якоря в течение времени испытания. Потери $P_{\text{св}}$ сами являются величинами, зависимыми от температуры, а следовательно, и времени испытания [19].

$$\dots \quad (4.67)$$

где I – ток якоря;

R_{20} – сопротивление обмотки якоря при температуре 20 °С;

σ – коммутационные потери;

$\sigma_{\text{мед}}$ – потери в меди якоря от главного пазового поля.

Строго говоря, коэффициенты k_1 и k_2 для часового и длительного режимов будут отличаться. Однако, учитывая существенную сложность расчета нестационарных тепловых процессов, качественный анализ влияния различных видов потерь на значение превышения температуры обмотки яко

ря в часовом режиме испытания может быть проведен с использованием коэффициентов α и β , полученных для стационарного длительного режима нагрузки.

Графически зависимость удельного превышения температуры якоря испытуемого электродвигателя от удельных потерь в меди и в стали для тягового двигателя НБ-406 [107], полученная по данной методике, приведена на рис. 4.9. Значения коэффициентов, полученные в результате расчета: $\alpha = 0,76$; $\beta = 0,24$.

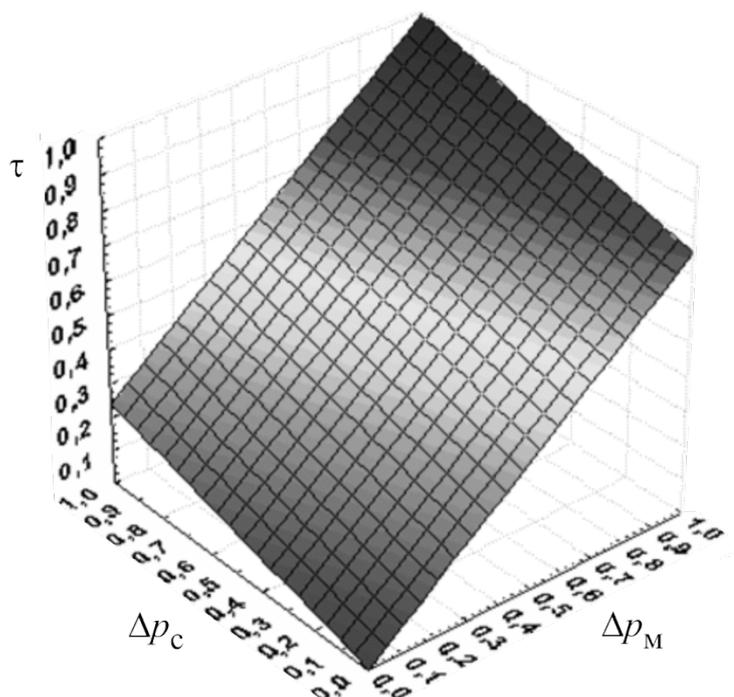


Рисунок 4.9 – Зависимость τ от Δp_c и Δp_m для тягового двигателя НБ-406

Из рисунка видно, что в большей степени тепловой потенциал обмотки якоря формируется электрическими потерями в ней и в меньшей степени магнитными потерями. Отношение относительных коэффициентов влияния данных видов потерь $\alpha/\beta = 0,76/0,24 = 3,17$. Как показывают расчёты, такое отношение весовых коэффициентов соответствует практически всем типам тяговых двигателей электровозов, электропоездов, тяговых агрегатов и тепловозов [107, 187].

4.3 Определение расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей взаимно нагруженных тяговых электромашин

Расхождение тепловой нагруженности обмоток якорей испытуемых тяговых электромашин будет наблюдаться при использовании схем взаимной нагрузки либо с параллельным источником электрической мощности, либо с конвертором напряжения (тока). К таким схемам относятся варианты: «AG»,

«AJ», «BG», «CG», «DG», «EF», «EG». Во всех этих вариантах, кроме «EF», положительная разница токов якорей двигателя и генератора обусловлена необходимостью создания избыточного (небалансного) электромагнитного момента двигателя для компенсации потерь холостого хода («AG», «AJ», «BG», «EF») или суммарных потерь в системе («CG», «DG», «EG»). Представим такую положительную разницу токов якорей в виде

$$,$$

где I_A и I_G – токи якорей испытуемого двигателя и генератора соответственно.

Относительная разница токов, приведенная к току якоря испытуемого двигателя, может быть определена в виде

или

$$,$$

где K – отношение токов якорей испытуемого генератора и двигателя.

Как показывают расчёты [123, 124] и опыт проведения испытаний, ток испытуемого генератора при часовом токе двигателя может изменяться в диапазоне

$$,$$

где I_{ch} – часовое значение тока, которое устанавливается при испытаниях на электромашине, которая работает в режиме двигателя.

Качество тепловых испытаний тяговых электромашин, нагруженных с расхождением токов ΔI , может быть оценено разностью превышений температур обмоток якорей ΔT_A или их отношением $\frac{\Delta T_A}{T_A}$ в момент времени окончания испытания при условии равенства тепловых параметров и условий охлаждения [97]:

$$;$$

$$,$$

где θ_1 и θ_2 – превышения температур обмоток якорей двигателя и генератора соответственно.

Относительная разность превышений температур якорей двигателя и генератора может быть представлена в виде

Нетрудно убедиться в справедливости выражения

Изменение превышения температуры обмотки якоря во времени при испытании может быть описано уравнением [19, 114]

где θ_{∞} – установившееся превышение температуры;

τ – эквивалентная постоянная времени нагревания.

Установившееся превышение и эквивалентная постоянная времени могут быть определены в виде [114]:

где $P_{\text{экв}}$ – эквивалентные потери;

$P_{\text{пр}}$ – приведенная теплоотдача;

$C_{\text{пр}}$ – приведенная теплоёмкость;

$R_{\text{н}}$ – сопротивление обмотки при нулевом превышении температуры;

α – температурный коэффициент сопротивления.

Эквивалентные потери $P_{\text{экв}}$ с допустимой степенью упрощения могут быть приняты пропорциональными квадрату тока якоря

Зависимости $\theta_{\text{я}} = f(I_{\text{я}})$ и $\theta_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ являются тепловыми характеристиками тяговой электромашины, относятся к типовым и, в принципе, известны для каждого типа тягового двигателя [104]. Эти характеристики также могут быть построены по кривым нагревания обмоток тяговой электромашины, которые снимаются при квалификационных испытаниях и являются частью протоколов этих испытаний [1].

Исходя из своей природы, зависимость $\theta_{\text{я}} = f(I_{\text{я}})$ должна хорошо описываться аналитически функцией вида

$$\theta_{\text{я}} = k_1 + k_2 I_{\text{я}}^2,$$

где k_1 и k_2 – постоянные коэффициенты.

Однако, как показывает анализ тепловых характеристик реальных тяговых двигателей [104], данная функция достаточно точно описывает зависимость $\theta_{\text{я}} = f(I_{\text{я}})$ только на отдельных отрезках изменения тока. Для многих тяговых двигателей более точно данная характеристика описывается в окрестностях точки часового режима функцией вида

$$\theta_{\text{я}} = k_1 + k_2 I_{\text{я}}^2 + k_3 I_{\text{я}}^4,$$

Зависимость $\theta_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ является менее выраженной, чем $\theta_{\text{я}} = f(I_{\text{я}})$. В тяговых расчетах при определении превышения температуры $\theta_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ величина $\theta_{\text{д}}$ для тяговых двигателей электровозов вообще принимается постоянной [104]

$$\theta_{\text{д}} = \theta_{\text{д0}},$$

Если принять допущение, что на интервале изменения тока $I_{\text{д}}$ установившееся превышение температуры $\theta_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ пропорционально квадрату тока якоря $I_{\text{я}}^2$, а постоянная времени нагревания $\tau_{\text{д}}$ неизменна, то отношение температур обмотки якорей в любой момент времени с допустимой степенью упрощения можно принять постоянным и равным

$$\theta_{\text{д}} = k_4 \theta_{\text{я}},$$

где k_4 и k_5 – установившиеся превышения температур якорей генератора и двигателя соответственно.

Таким образом, отношение превышений температур обмоток якорей испытуемых тяговых электромашин будет равно отношению их тепловых факторов.

Для схем взаимного нагружения с одним параллельным источником электрической мощности

$$,$$

где $\Sigma P_{\text{пот}}^{\text{исп}}$ – суммарные потери мощности испытуемых электромашин;
 $U_{\text{дв}}$ – э. д. с. испытуемого двигателя.

Для систем взаимного нагружения с двумя источниками, один из которых – параллельный источник электрической мощности,

$$,$$

где $\Sigma P_{\text{хол}}^{\text{исп}}$ – суммарные потери холостого хода испытуемых электромашин;
 $U_{\text{дв}}$ – разница э. д. с. испытуемого двигателя и генератора ,
 обусловленная расхождением их магнитных характеристик

$$.$$

Приведенная разница токов якорей генератора и двигателя для схем с одним параллельным источником будет определяться в виде

$$,$$

где $P_{\text{пол}}^{\text{исп}}$ – полные суммарные приведенные потери мощности испытуемых электромашин.

$$,$$

где $P_{\text{эм}}^{\text{исп}}$ – электромагнитная мощность испытуемого двигателя.

Приведенная разница токов якорей генератора и двигателя для схем с двумя источниками будет определяться выражением

$$,$$

где $\Sigma P_{\text{хол}}^{\text{пр}}$ – суммарные приведенные потери холостого хода испытуемых электромашин;

– приведенная разность э. д. с. электромашин, обусловленная расхождением их магнитных характеристик.

;

Минимальное значение отрицательной приведенной разности э. д. с. испытуемых электромашин может быть принято равным

,

где – максимально допустимое положительное отклонение частоты вращения электромашин от типового значения часовой частоты вращения.

Для удобства расчётов с допустимой степенью упрощения можно принять:

;

,

где – мощность часового режима.

Для тяговых двигателей электропоездов и тяговых агрегатов [1, 2]. Тогда

.

Отношения токов якорей пары испытуемых тяговых электромашин, выраженные через приведенные потери, будут иметь вид:

;

.

Тогда отношения тепловых факторов для двух вариантов схем:

;

В расчетах можно принять:

;

где – полные приведенные потери одной испытуемой электромашины;
– приведенные потери холостого хода одной испытуемой электромашины.

Приведенные потери одной тяговой электромашины могут быть определены в виде:

;

где – к. п. д. тяговой электромашины в часовом режиме;

– приведенные электрические потери одной испытуемой тяговой электромашины.

,

где – суммарное сопротивление обмоток одной испытуемой электромашины.

В табл. 4.7 приведены результаты расчётов отношений тепловых факторов и , полученные для различных типов тяговых двигателей электропоездов, электропоездов и тяговых агрегатов

Таблица 4.7 – Результаты расчёта отношений тепловых факторов и

| Тип ТЭД | НБ-406 | НБ-418К | УРТ-110А | РТ-51Д | НБ-511 | ДТ-9Н |
|---------|--------|---------|----------|--------|--------|-------|
| | 0,71 | 0,789 | 0,673 | 0,672 | 0,751 | 0,72 |
| | 0,754 | 0,823 | 0,776 | 0,854 | 0, 81 | 0,76 |

Как видно из результатов расчётов и , при использовании для испытаний на нагрев схем взаимного нагружения с параллельным источником тепловая нагрузка обмоток якорей пары испытуемых тяговых

электромашин может различаться более чем на 30%. Наибольшее расхождение тепловых нагрузок якорей тяговых электромашин будет наблюдаться при использовании схем взаимного нагружения с одним параллельным источником.

4.4 Определение расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения взаимно нагруженных тяговых электромашин

Расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения испытываемых тяговых электромашин характерно для систем взаимного нагружения с регулированием магнитных потоков путём отпитки либо подпитки обмоток возбуждения [68, 99]. К таким схемам относятся «AH», «BH», «CF», «CG». В данных вариантах за счёт разности токов возбуждения испытываемых электромашин создаётся небалансная электромагнитная мощность, компенсирующая один из видов потерь (электрические или холостого хода).

Разницу токов возбуждения испытываемых электромашин для случая отпитки представим в виде

$$,$$

где $I_{\text{ч}}$ – часовой ток (или другой эквивалентный ток, при котором проводится испытание);

$I_{\text{в}}$ – ток возбуждения в регулируемой обмотке.

Разницу токов возбуждения для случая подпитки представим в виде

$$.$$

Оба параметра $\Delta I_{\text{в}}$ и $\Delta I_{\text{п}}$ принимаем положительными для удобства анализа.

Относительные (приведенные к часовому току) разности токов возбуждения:

$$;$$

$$.$$

В пункте 3.3.3 были получены зависимости параметров $\Delta I_{\text{в}}$ и $\Delta I_{\text{п}}$ от приведенных потерь (одного из видов) $P_{\text{в}}$ одной испытываемой электромашин: $\Delta I_{\text{в}} = f(P_{\text{в}})$ и $\Delta I_{\text{п}} = f(P_{\text{в}})$.

В качестве критерия расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения будет целесообразным использовать отношение квадратов

токов возбуждения. Аналогично отношению тепловых факторов обмоток якорей [97] отношение тепловых нагрузок обмоток возбуждения

где β – отношение токов возбуждения тяговых электромашин при отпитке.

Для случая отпитки $\beta_{от}$, для случая подпитки $\beta_{под}$.

Отношения токов возбуждения $I_{в}$ могут быть выражены через их относительные разности как:

;

Тогда отношение тепловых нагрузок обмоток возбуждения для отпитки и подпитки соответственно:

$$\beta_{от} = \frac{I_{вот}}{I_{впод}} \quad (4.68)$$

$$\beta_{под} = \frac{I_{впод}}{I_{вот}} \quad (4.69)$$

Универсальный характер зависимостей $\beta_{от}$ и $\beta_{под}$ позволяет рассчитать отношение тепловых факторов $K_{тот}$ и $K_{тпод}$ для заданных коэффициентов магнитного насыщения $\mu_{н}$ в зависимости от приведенных потерь $P_{пр}$.

В табл. 4.8 и 4.9 приведены результаты расчета зависимостей $\beta_{от}$ и $\beta_{под}$ соответственно, полученные по формулам (4.68) и (4.69) для трёх значений коэффициента магнитного насыщения $\mu_{н}$ (1,67; 1,91; 2,15).

Значения $\beta_{от}$, приведенные в числителе, относятся к случаю совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин, а в знаменателе – к случаю максимального их расхождения ($\mu_{н} = 1,67$).

Таблица 4.8 – Результаты расчета зависимостей $\beta_{от}$ (способ отпитки)

| | | | | | | | | |
|-------|--|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| =1,67 | | <u>0,019</u> | <u>0,041</u> 0,011 | <u>0,066</u> 0,036 | <u>0,104</u> 0,074 | <u>0,154</u> 0,124 | | |
| | | 0,79 | 0,60 | 0,44 | 0,31 | 0,20 | | |
| =1,91 | | <u>0,016</u> | <u>0,032</u> 0,002 | <u>0,050</u> 0,020 | <u>0,070</u> 0,040 | <u>0,094</u> 0,064 | <u>0,129</u> 0,099 | |
| | | 0,83 | 0,67 | 0,53 | 0,40 | 0,30 | 0,21 | |
| =2,15 | | <u>0,011</u> | <u>0,023</u> | <u>0,038</u> 0,008 | <u>0,054</u> 0,024 | <u>0,071</u> 0,041 | <u>0,090</u> 0,060 | <u>0,112</u> 0,082 |
| | | 0,85 | 0,72 | 0,59 | 0,48 | 0,38 | 0,29 | 0,21 |

Таблица 4.9 – Результаты расчета зависимостей (способ подпитки)

| | | | | | | | | |
|-------|--|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| =1,67 | | <u>0,018</u> | <u>0,034</u> 0,004 | <u>0,047</u> 0,017 | <u>0,060</u> 0,030 | <u>0,073</u> 0,043 | – | – |
| | | 1,23 | 1,49 | 1,78 | 2,09 | 2,42 | – | – |
| =1,91 | | <u>0,013</u> | <u>0,024</u> | <u>0,036</u> 0,006 | <u>0,047</u> 0,017 | <u>0,057</u> 0,027 | <u>0,066</u> 0,036 | – |
| | | 1,19 | 1,40 | 1,62 | 1,86 | 2,12 | 2,39 | – |
| =2,15 | | <u>0,011</u> | <u>0,022</u> | <u>0,031</u> 0,001 | <u>0,040</u> 0,010 | <u>0,046</u> 0,016 | <u>0,055</u> 0,025 | <u>0,062</u> 0,032 |
| | | 1,16 | 1,33 | 1,51 | 1,71 | 1,92 | 2,14 | 2,37 |

На рис. 4.10 – 4.15 зависимости и представлены графически. Из данных графиков видно, что степень расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения испытуемых тяговых электромашин зависит как от способа регулирования их возбуждения, так и коэффициента магнитного насыщения. При способе подпитки расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения существенно выше, чем при способе отпитки. Чем выше коэффициент магнитного насыщения тяговых электромашин, тем выше степень расхождения тепловых нагрузок их обмоток возбуждения при обоих способах регулирования поля. Существенное влияние на степень расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения оказывает расхождение магнитных характеристик пары взаимно нагруженных тяговых электромашин.

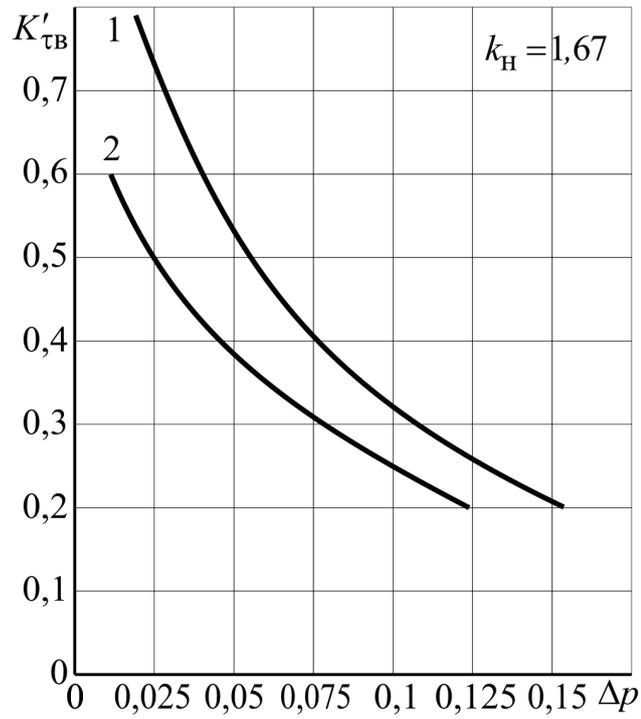


Рисунок 4.10 – Зависимости K'_{TB} для режима отпитки и

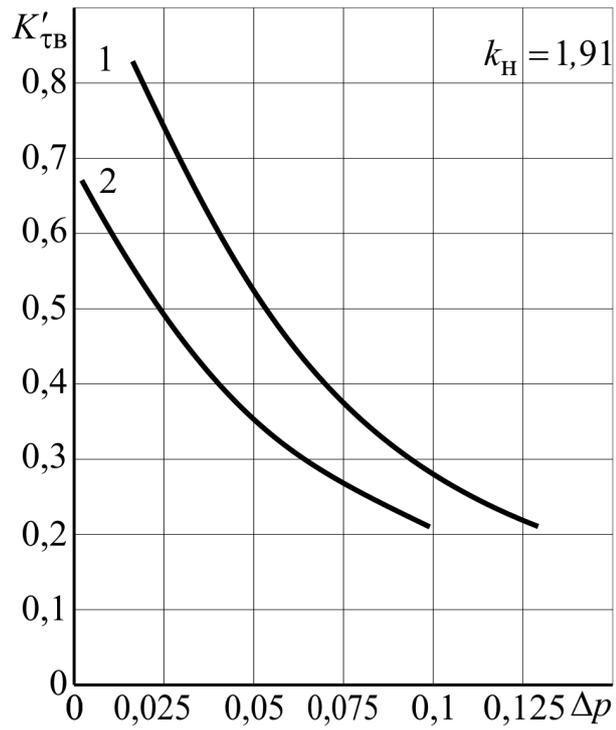


Рисунок 4.11 – Зависимости K'_{TB} для режима отпитки и

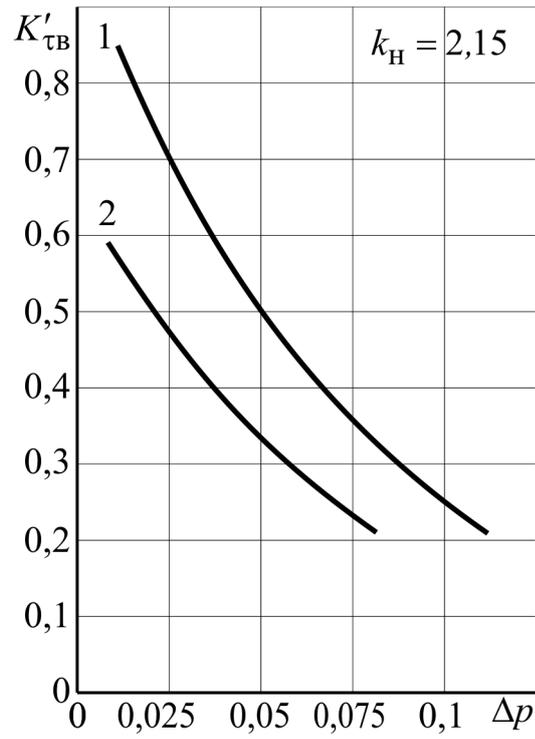


Рисунок 4.12 – Зависимости
для режима отпитки и

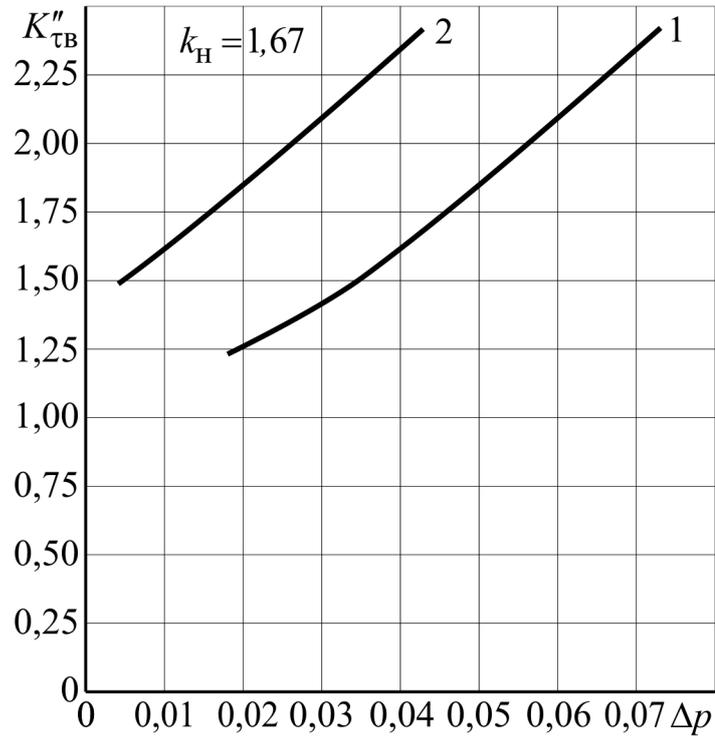


Рисунок 4.13 – Зависимости
для режима подпитки и

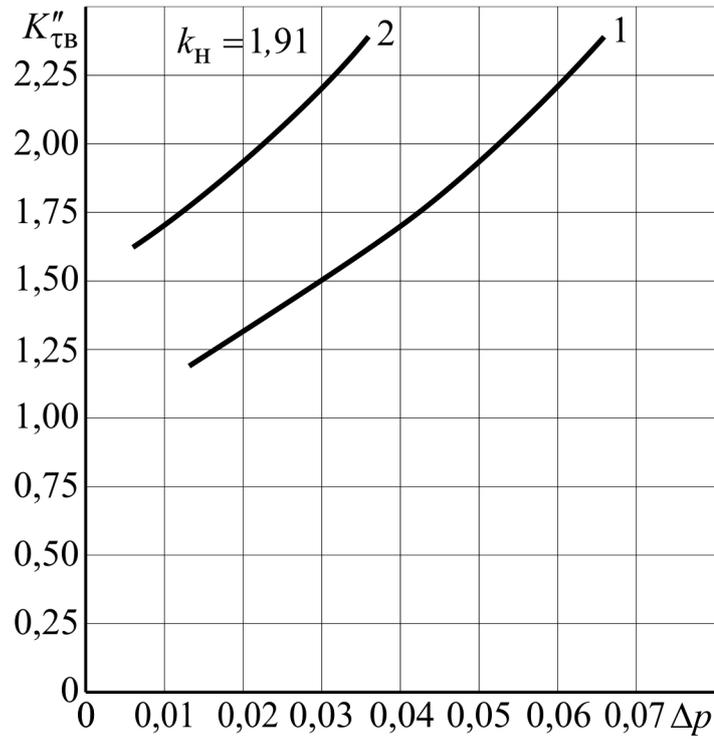


Рисунок 4.14 – Зависимости
для режима подпитки и

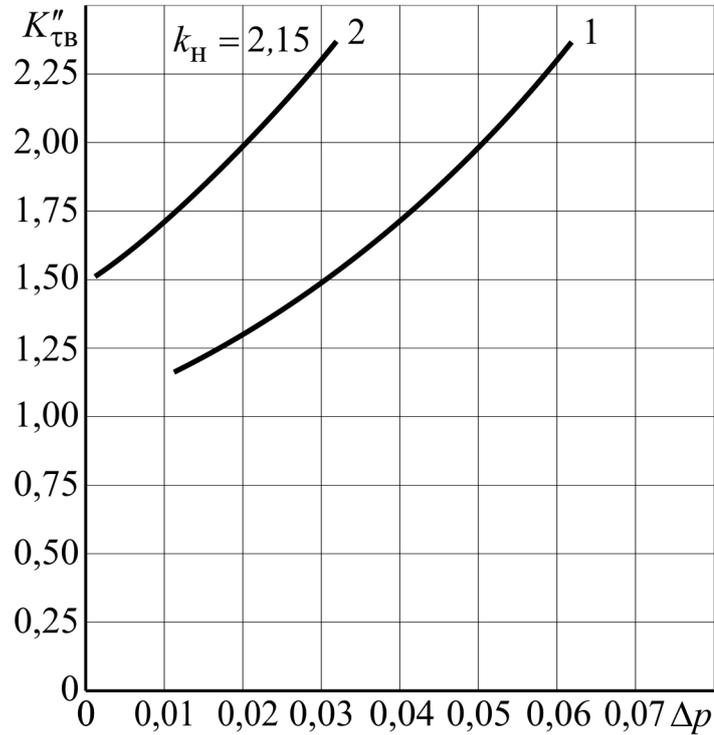


Рисунок 4.15 – Зависимости
для режима подпитки и

4.5 Выводы по разделу 4

В результате исследований, проведенных в разделе 4, можно сделать следующие выводы:

- магнитные потери в тяговых электромашинах могут быть представлены в виде универсальной характеристики, представляющей собой зависимость удельных магнитных потерь от частоты перемагничивания или частоты вращения якоря;
- механические потери в тяговых электромашинах могут быть представлены в виде универсальных зависимостей удельных механических потерь мощности от приведенной угловой скорости;
- наибольшую степень влияния (до 75%) на превышение температуры обмотки якоря электромашины имеют электрические потери в меди и меньшую степень влияния (до 25%) – магнитные потери в стали якоря ;
- использование в системах взаимного нагружения параллельного источника тока приводит к существенному расхождению тепловых нагрузок обмоток якорей пары испытуемых тяговых электромашин, которое становится недопустимым с точки зрения обеспечения качества испытаний на нагрев в случае максимального расхождения магнитных характеристик электрических машин;
- использование взаимного нагружения с регулированием разницы магнитных потоков пары испытуемых тяговых электромашин приводит к расхождению тепловых нагрузок их обмоток возбуждения, которое зависит от коэффициента магнитного насыщения тяговых электромашин и усиливается в случае расхождения их магнитных характеристик;
- расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения пары взаимно нагруженных тяговых электромашин при использовании способа подпитки обмотки возбуждения одной из электромашин намного больше, чем при использовании способа отпитки.

РАДЕЛ 5

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ

5.1 Определение необходимой суммарной мощности источников питания системы взаимного нагружения

Максимальная суммарная мощность источников питания системы взаимного нагружения тяговых электромашин является одним из критериев рациональности и схемы, и режима нагружения электромашин при их испытаниях [70, 72, 109]. Из практики и теоретических исследований [19, 123, 126] известно, что потребная типовая мощность источников питания стенда взаимной нагрузки определяется как величиной потерь мощности в испытываемых электромашинах, так и степенью расхождения их магнитных характеристик.

Величина потерь мощности в испытываемых электромашинах зависит от режима нагружения (ток нагрузки, магнитный поток, частота вращения) и температуры обмоток, последняя непрерывно растёт в течение времени испытания на нагрев и максимальна в конце испытания. Типовая мощность источников испытательного стенда должна быть рассчитана на максимальные значения потерь мощности и взаимное расхождение магнитных характеристик испытываемых электромашин, соответствующие нормируемым максимально допустимым отклонениям сопротивлений обмоток и частот вращения тяговых электромашин.

Подробный анализ влияния расхождения магнитных характеристик испытываемых электромашин на максимальную потребную мощность источников питания системы взаимного нагружения проведен в приложении «Б». В результате анализа установлено, что в системах взаимного нагружения с двумя источниками питания необходим запас мощности каждого из источников, обусловленный возможностью появления составляющей небалансной электромагнитной мощности испытываемых электромашин, вызванной расхождением их магнитных характеристик [127]. Рассмотрим общие закономерности перераспределения мощностей двух источников питания систем взаимного нагружения и характер его влияния на суммарную приведенную мощность источников испытательной станции, которая определяет рациональность схемы взаимного нагружения тяговых электромашин.

На рис. 5.1 приведена универсальная схема характера распределения мощностей в системе взаимного нагружения при совпадении магнитных характеристик и равенстве магнитных потоков испытываемых электромашин.

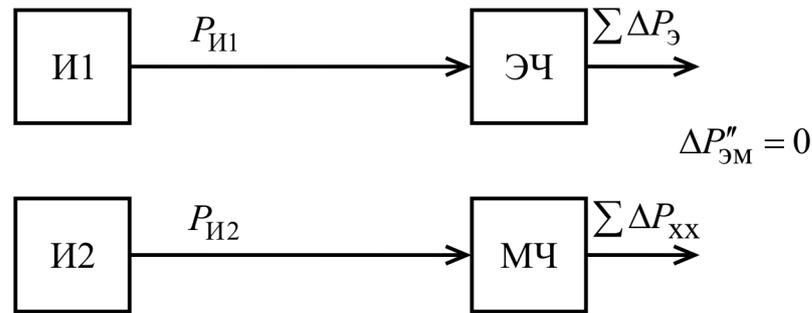


Рисунок 5.1 – Характер распределения мощностей источников при

Источник И1 компенсирует электрические потери в электрической части системы взаимного нагружения ЭЧ. Источник И2 компенсирует потери холостого хода в механической части МЧ. Для данного случая при допустимых упрощениях справедливы выражения:

$$; \quad (5.1)$$

$$, \quad (5.2)$$

где $P_{И1}$, $P_{И2}$ – полезные мощности источников И1 и И2 соответственно;

$\sum \Delta P_{\Sigma}$, $\sum \Delta P_{\Sigma}$ – суммарные электрические потери и потери холостого хода в системе взаимного нагружения соответственно.

Здесь необходимо отметить, что как И1, так и И2 могут быть источниками как электрической, так и механической мощности. Также отметим, что в реальности, даже при полном совпадении магнитных характеристик испытуемых электромашин, такое распределение мощности, какое показано на рис. 5.1, возможно только для одного варианта, когда электрические потери и потери холостого хода компенсируются электрическим и механическим источниками соответственно. При других вариантах неизбежны дополнительные потери, связанные с необходимостью, преобразования вида мощности в самих испытуемых электромашинах [128, 129].

При электрическом способе компенсации потерь холостого хода электрическая мощность источника И2 преобразуется в механическую в испытуемом двигателе. При механическом способе компенсации электрических потерь механическая мощность источника И1 преобразуется в электрическую в испытуемом генераторе. При проведении данного анализа дополнительными потерями, вызванными преобразованиями вида мощности, можно пренебречь.

В общем случае разница электромагнитных мощностей испытуемых электромашин может быть представлена в виде

$$, \quad (5.3)$$

где $P_{И1}$, $P_{И2}$ – электромагнитные мощности испытуемого двигателя и генератора соответственно.

С другой стороны

$$P_{И1} - \Delta P''_{ЭМ} = P_{И2} + \Delta P''_{ЭМ} \tag{5.4}$$

где $\Delta P''_{ЭМ}$ – составляющая небалансной электромагнитной мощности, которая идёт на покрытие одного из видов потерь;

$\Delta P''_{ЭМ}$ – составляющая небалансной электромагнитной мощности, вызванная расхождением магнитных потоков $\Phi_{И1}$ и $\Phi_{И2}$.

$$\Delta P''_{ЭМ} = P_{И1} - P_{И2} \tag{5.5}$$

где $\Phi_{И1}$, $\Phi_{И2}$ – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно.

На рис. 5.2 приведена схема распределения мощностей в системе взаимного нагружения при таком расхождении магнитных характеристик, что магнитный поток испытуемого двигателя больше, чем магнитный поток испытуемого генератора. Условно принимаем такую разницу магнитных потоков положительной

$$\Delta P''_{ЭМ} > 0 \tag{5.6}$$

Тогда разница электромагнитных мощностей, вызванная разницей магнитных потоков $\Delta P''_{ЭМ}$, также положительна

$$\Delta P''_{ЭМ} > 0 \tag{5.7}$$

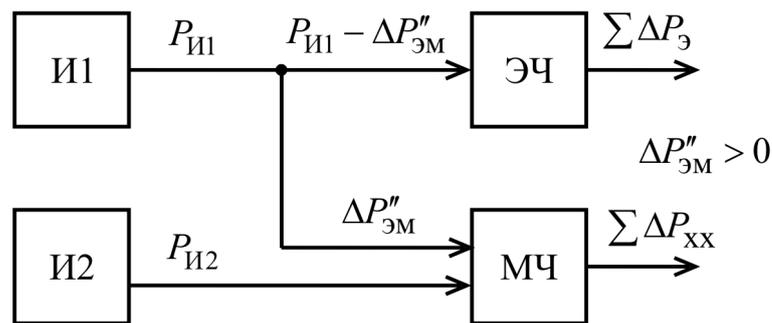


Рисунок 5.2 – Характер распределения мощностей источников при

В соответствии со схемой на рис. 5.2:

$$P_{И1} - \Delta P''_{ЭМ} = P_{И2} + \Delta P''_{ЭМ} \tag{5.8}$$

$$\Delta P''_{ЭМ} = P_{И1} - P_{И2} \tag{5.9}$$

Эти же выражения могут быть записаны в относительных параметрах, приведенных к часовой мощности испытываемых тяговых электромашин:

$$; \quad (5.10)$$

$$. \quad (5.11)$$

Данные относительные параметры более удобны для проведения дальнейшего анализа, так как одни из них (,) изменяются для данного типа электромашин в достаточно узких пределах, а другие являются нормируемыми ().

Максимальное значение относительной мощности источника И1

$$. \quad (5.12)$$

Максимальное относительное значение электрических потерь соответствует максимально возможному (с учётом допустимых отклонений) сопротивлению обмоток испытываемых электромашин в нагретом состоянии.

Максимальное значение приведенной составляющей небалансной электромагнитной мощности может быть определено в виде

$$, \quad (5.13)$$

где – максимальная разница магнитных потоков испытываемых электромашин в часовом режиме;

– магнитный поток в часовом режиме (типовое значение).

Отметим, что ГОСТом 2582-81 [1] нормируется максимально допустимое относительное отклонение частоты вращения

$$, \quad (5.14)$$

где – максимальное абсолютное отклонение частоты вращения в часовом режиме от типового значения часовой частоты вращения .

Найдем параметр , выраженный через относительное отклонение частоты . Будем считать, что испытания электромашин проводится в часовом режиме. При часовом токе и при условии равенства сопротивлений обмоток типовым параметрам тяговой электромашин будет справедливым выражение [75]

$$\dots, \quad (5.15)$$

где Φ и ω – действительные значения магнитного потока и частоты вращения при часовом режиме испытания.

Представим Φ и ω в виде:

$$\dots; \quad (5.16)$$

$$\dots, \quad (5.17)$$

где $\Delta\Phi$ и $\Delta\omega$ – действительные абсолютные отклонения магнитного потока и частоты вращения одной электромашины от часовых значений.

Путём совместного решения уравнений (5.15) – (5.17), получим относительное отклонение магнитного потока

$$\dots, \quad (5.18)$$

где $\Delta\omega/\omega$ – относительное отклонение частоты

$$\dots. \quad (5.19)$$

Максимальное положительное значение $\Delta\Phi/\Phi$ будет соответствовать допустимому отрицательному относительному отклонению частоты вращения $\Delta\omega/\omega$. Для тяговых двигателей электровозов, электропоездов и тяговых агрегатов ($\Delta\omega/\omega < 0$)

$$\dots. \quad (5.20)$$

Таким образом, при значениях $\Delta\omega/\omega$, находящихся для тяговых двигателей в пределах, допустимых ГОСТ 2582-81, можно принять

$$\dots. \quad (5.21)$$

Минимальное (отрицательное) значение $\Delta\Phi/\Phi$ будет соответствовать допустимому положительному отклонению частоты вращения $\Delta\omega/\omega$. Для тяговых электрических двигателей электровозов, электропоездов и тяговых агрегатов ($\Delta\omega/\omega > 0$)

$$\dots. \quad (5.22)$$

Таким образом, с учётом тех же допущений, можно принять

$$\dots \quad (5.23)$$

Эти же допущения могут быть использованы и для вспомогательных электрических машин тягового подвижного состава с более высокими допустимыми относительными отклонениями частоты вращения

Для режима, соответствующего условию \dots , приведенная мощность источника И2 будет определяться в виде

$$\dots \quad (5.24)$$

Таким образом, максимальная приведенная мощность источника И1 для случая \dots будет определяться по формуле

$$\dots \quad (5.25)$$

Максимальное значение полного возможного относительного расхождения магнитных потоков двух испытуемых электромашин

$$\dots \quad (5.26)$$

Или, с учётом (5.21) и (5.23)

$$\dots \quad (5.27)$$

Тогда, в соответствии с (5.13)

$$\dots \quad (5.28)$$

На рис. 5.3 приведена схема распределения мощностей в системе взаимного нагружения при таком расхождении магнитных характеристик, когда магнитный поток испытуемого двигателя меньше, чем магнитный поток испытуемого генератора. Условно принимаем такую разницу магнитных потоков отрицательной

$$\dots \quad (5.29)$$

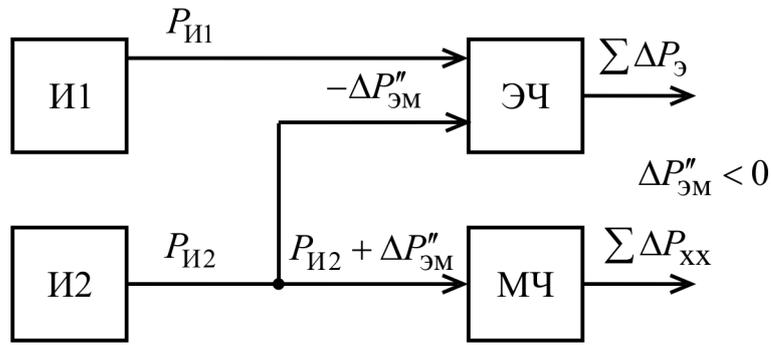


Рисунок 5.3 – Характер распределения мощностей источников при

Тогда составляющая небалансной электромагнитной мощности

$$(5.30)$$

В соответствии со схемой рис. 5.3

$$(5.31)$$

$$(5.32)$$

Таким образом, уравнения для определения мощностей источников питания универсальны для случаев и .

Максимальное значение относительной мощности источника И2

$$(5.33)$$

где – минимальное значение приведенной составляющей небалансной электромагнитной мощности.

Учитывая допущения, принятые при проведении анализа по условию (рис. 5.2), максимальная приведенная мощность источника И2 для случая (рис. 5.3) будет определяться по формуле

$$(5.34)$$

Для данного режима приведенная мощность источника И1 будет определяться в виде

$$(5.35)$$

Так как реально возможны оба варианта расхождения магнитных характеристик, рассмотренные выше, максимальная суммарная приведенная мощность источников системы взаимного нагружения будет определяться по формуле

$$(5.36)$$

Если считать потери мощности в двух испытуемых электромашинах одинаковыми, и пренебречь потерями в соединительных проводах и коммутационной аппаратуре стенда взаимной нагрузки, можно принять

$$, \quad (5.37)$$

где η – коэффициент полезного действия однотипных испытуемых тяговых электромашин в часовом режиме.

В соответствии с [1] типовое значение к. п. д. тяговой электромашины в часовом режиме соответствует нагретому состоянию, то есть

Тогда выражение (5.36) запишем в виде

$$. \quad (5.38)$$

Для режимов тепловых испытаний, отличных от часового (эквивалентные режимы), выражение (5.38) будет иметь общий вид

$$, \quad (5.39)$$

где η – коэффициент полезного действия однотипных испытуемых электромашин, соответствующий испытательному значению тока нагрузки.

Запас суммарной мощности источников питания системы взаимного нагружения может быть оценен коэффициентом запаса мощности в виде

$$. \quad (5.40)$$

В табл. 5.1 приведены значения η и K , полученные по формулам (5.39) и (5.40) для реального диапазона изменения к. п. д. тяговых двигателей тягового подвижного состава и

Как видно из табл. 5.1, для тяговых двигателей с высоким коэффициентом полезного действия (до 0,95) [79,107, 183,184] необходимый запас суммарной мощности двух источников системы взаимного нагружения, обусловленный возможным расхождением магнитных характеристик испытуемых электромашин, является более чем двукратным.

Таблица 5.1 – Результаты расчёта зависимостей

| К. п. д. | 0,9 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,96 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,22 | 0,2 | 0,17 | 0,15 | 0,13 | 0,11 | 0,08 |

| | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|-----|
| | 0,34 | 0,32 | 0,29 | 0,27 | 0,25 | 0,23 | 0,2 |
| | 1,54 | 1,6 | 1,69 | 1,8 | 1,94 | 2,14 | 2,5 |

Данные выводы относятся ко всем вариантам системы взаимного нагружения, в которых отдельные виды потерь (электрические и холостого хода) компенсируются отдельными источниками мощности. Снижение коэффициента запаса мощности может быть достигнуто путём использования систем взаимной нагрузки с одним источником питания, компенсирующим как электрические, так и потери холостого хода [127].

Анализ статистических данных результатов приёмо-сдаточных испытаний электрических машин тягового подвижного состава, результаты которого приведены в приложении «В», показывает, что вероятность попадания на стенд взаимной нагрузки пары тяговых электромашин с максимально расходящимися магнитными характеристиками () достаточно высока. Проведение испытания таких тяговых электромашин на стенде взаимной нагрузки с двумя источниками питания без соответствующего запаса их мощностей невозможно в принципе. На практике в таких случаях производят подбор отремонтированных тяговых электромашин случайным поиском. Как правило, это занимает достаточно много времени и существенно повышает трудоёмкость испытаний. В условиях ограниченного выбора отремонтированных тяговых электромашин проведение таких испытаний часто откладывается на большой срок.

Результаты теоретических исследований влияния расхождения магнитных характеристик взаимно нагруженных тяговых электромашин на мощность источников питания испытательного стенда подтверждены экспериментально (см. Приложение Г).

5.2 Понятие энергетической эффективности процесса испытания тяговых электрических машин методом взаимного нагружения

Под термином энергетической эффективности в целом понимается рациональное использование энергетических ресурсов при выполнении какого-либо технологического процесса [129-131]. Наиболее известным показателем энергетической эффективности какого-либо устройства, выполняющего полезную работу, является его коэффициент полезного действия (к. п. д.), представляющий собой отношение этой полезной работы к энергии, потреблённой устройством из сети.

В качестве показателя энергоэффективности технологического процесса, как правило, принимают удельные энергозатраты (приведенные к единице продукции). Энергетическая эффективность процесса испытания тяговых электромашин также может быть оценена как затраты электроэнергии на проведение испытаний одной электромашин (или пары электромашин).

Недостатком использования такого показателя энергетической эффективности процесса испытания является необходимость в нормировании

расхода электроэнергии для каждого типа испытываемых тяговых электромашин. Такое нормирование должно проводиться с использованием эталонного оборудования (системы взаимного нагружения), характеристики которого должны быть оптимальными для данного типа электромашин.

При решении задачи выбора рациональной структуры испытательного стенда для данного типа тяговой электромашин данная методика оценки энергетической эффективности неприемлема из-за того, что суть решения задачи заключается как раз в определении того самого эталона – оптимального для данного типа электромашин.

Известны работы, в которых в качестве показателя энергетической эффективности испытания электромашин предлагается использовать коэффициент, представляющий собой отношение общей мощности, потребляемой стендом взаимной нагрузки, к номинальной типовой мощности одной испытываемой электромашин. По своей сути использование такого показателя аналогично оценке энергетической эффективности с помощью затрат электроэнергии, приведенных к единице продукции (одной электромашине). Такой подход также требует нормирования расхода электроэнергии, но приведенной не к единице продукции, а к единице мощности.

Наиболее точно отражающим суть понятия энергетической эффективности испытания электромашин будет параметр, аналогичный к. п. д. и представляющий собой отношение полезной работы к общему количеству электроэнергии, израсходованной на испытания.

Тогда коэффициент энергетической эффективности системы взаимного нагружения может быть представлен в виде

,

где $W_{\text{п}}$ и $W_{\text{з}}$ – полезная и затраченная энергии соответственно.

Затраченная энергия является понятием, которое не нуждается в подробном объяснении, но, тем не менее, отметим, что под ним будем рассматривать суммарное количество электроэнергии, потреблённое за время испытания тяговых электромашин всеми источниками системы из трёхфазной сети переменного тока с линейным напряжением $U_{\text{л}}$. Именно эта сеть должна быть принята за базовый источник питания системы взаимного нагружения.

Вопрос о том, что следует считать полезной энергией, затраченной на испытание, требует отдельного детального рассмотрения. Если целью взаимного нагружения является обеспечение протекания тока нагрузки электромашин и вращения их якорей (роторов), то полезной мощностью является суммарная мощность всех видов потерь в испытываемых электромашинах. Компенсация всех потерь мощности в электромашинах и

есть главное назначение источников энергии в системе взаимного нагружения. В целом система взаимного нагружения не совершает никакой полезной работы, но сам факт протекания тока нагрузки электромашин и вращения их якорей является достижением цели процесса взаимного нагружения, а именно – обеспечения испытания электромашин под нагрузкой.

С этой точки зрения полезная мощность источников системы взаимного нагружения

,

где – суммарные потери мощности в испытуемых электромашинах (двигателе и генераторе).

Тогда коэффициент энергетической эффективности системы взаимного нагружения

,

где – суммарная мощность, потребляемая системой взаимного нагружения из сети;

– время проведения испытаний.

Суммарная потребляемая мощность складывается из суммарных потерь мощности в испытуемых электромашинах и суммарных потерь в регуляторах и преобразователях .

.

Если целью испытаний является нагревание обмоток тяговых электромашин (испытание на нагрев) до заданного превышения температуры, то полезной является та часть суммарной мощности потерь в них, которая идет на повышение температуры обмоток. Тогда коэффициент энергетической эффективности процесса испытаний на нагрев будет определяться в виде

,

где W_{Σ} – общая энергия, затраченная на повышение температуры обмоток электромашин.

Энергия W_{Σ} определяется превышением температуры в конце испытаний ΔT_{Σ} и приведенной теплоёмкостью испытуемых электромашин C_{Σ}

Если рассматривать отдельно сам процесс нагревания обмоток тяговых электромашин под действием мощности потерь в них P_{Σ} , то энергетическая эффективность данного процесса (нагревания) [132,133] может быть оценена коэффициентом энергетической эффективности нагревания, представляющим собой отношение

Нетрудно убедиться в справедливости выражения

То есть результирующий коэффициент энергетической эффективности испытания на нагрев определяется значениями коэффициентов энергетической эффективности системы взаимного нагружения η_{Σ} и коэффициента энергетической эффективности нагревания обмоток η_{Σ} .

При испытаниях на нагрев целью процесса является нагревание обмоток испытуемых электромашин до превышения температуры, соответствующему номинальному режиму нагрузки, при заданных значениях тока и напряжения. Коэффициент энергетической эффективности данного процесса равен η_{Σ} .

При проведении других испытаний и проверок на нагретой электромашине коэффициент энергетической эффективности должен быть принят, равным η_{Σ} , так как целью процесса в данных режимах является только обеспечение компенсации всех потерь мощности. То есть для данных режимов не важно, в каких условиях была нагрета испытуемая электромашин, и какое количество электроэнергии было на это предварительно затрачено.

Если мощность потерь в испытуемых электромашин принять постоянной, что допустимо при рассмотрении относительно недлительных проверок на нагретой электромашин, то коэффициент энергетической

эффективности системы взаимного нагружения для этого режима может быть определён в более простом виде

Эта же упрощённая формула может быть использована и при определении мгновенного значения коэффициента энергетической эффективности системы взаимного нагружения для любого режима испытаний тяговых электромашин.

5.3 Определение показателей энергетической эффективности испытаний тяговых электрических машин

5.3.1 Энергетическая эффективность системы взаимного нагружения тяговых электрических машин

Энергетическая эффективность системы взаимного нагружения, как было показано выше, представляет собой отношение суммарных потерь мощности в испытуемых тяговых электромашинах, соответствующих параметрам принятого режима нагружения, к суммарной мощности, потребляемой источниками питания системы взаимного нагружения из сети. Характер зависимости данного показателя от структуры системы взаимного нагружения может быть определён по универсальной схеме энергетических преобразований, приведенной на рис. 5.4.

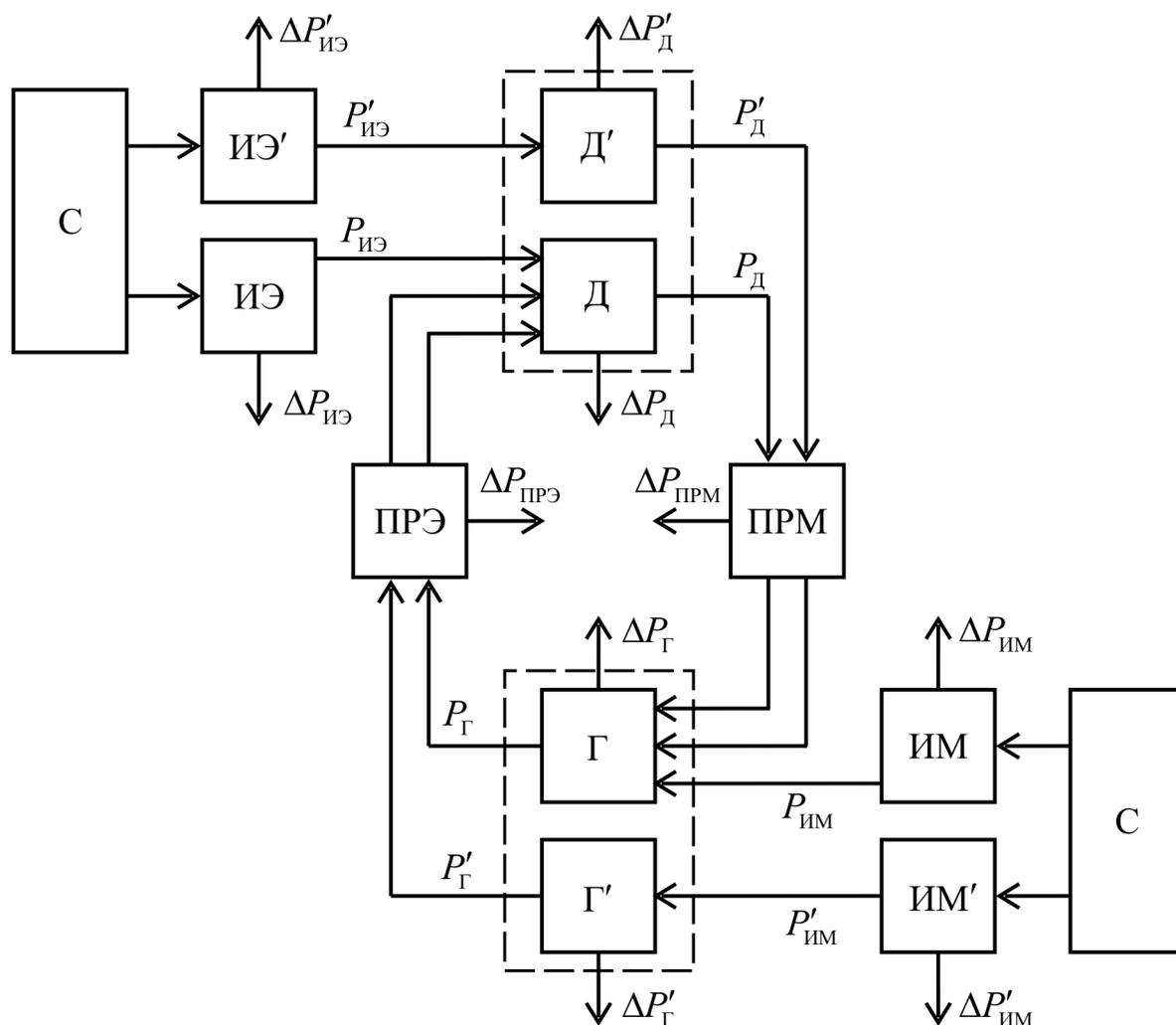


Рисунок 5.4 - Универсальная схема энергетических преобразований в системе взаимного нагружения тяговых электромашин

Данная схема является универсальной и учитывает все возможные варианты компенсации потерь мощности в испытуемых электромашинах:

- прямую компенсацию электрических потерь;
- косвенную компенсацию электрических потерь;
- прямую компенсацию потерь холостого хода;
- косвенную компенсацию потерь холостого хода.

В схеме предусмотрены варианты передачи электрической и механической мощности в основном контуре преобразований с использованием преобразователей электрической и механической мощности соответственно.

Источник электрической мощности ИЭ компенсирует электрические потери в системе взаимного нагружения прямым способом, а источник электрической мощности ИЭ' – потери холостого хода косвенным способом. Источник механической мощности ИМ компенсирует потери холостого хода в системе прямым способом, а источник механической мощности ИМ' – электрические потери косвенным способом. Все четыре возможных источника мощности подключены к сети «С».

Испытуемый двигатель условно разбит на две части: Д и Д'. Условная часть Д включена в основной контур энергетических преобразований, а часть Д' является условным преобразователем электрической мощности источника ИЭ' в механическую, передаваемую генератору Г. Испытуемый генератор условно также разбит на две части: Г и Г'. Условная часть Г включена в основной контур энергетических преобразований, а часть Г' является условным преобразователем механической мощности источника ИМ' в электрическую мощность, передаваемую двигателю Д.

Передача мощности источника ИЭ к двигателю Д осуществляется непосредственно, а мощности источника ИЭ' к генератору Г – через двигатель Д' и преобразователь механической мощности ПРМ. Передача мощности источника ИМ к генератору Г осуществляется непосредственно, а мощности источника ИМ' к двигателю Д – через генератор Г' и преобразователь электрической мощности ПРЭ. Передача механической мощности от испытуемого двигателя Д к испытуемому генератору Г осуществляется через преобразователь ПРМ, а электрической мощности от испытуемого генератора Г к двигателю Д – через преобразователь ПРЭ.

Контур энергетических преобразований, включающий в себя условную часть двигателя Д, условную часть генератора Г, преобразователи ПРМ и ПРЭ, является основным. Суммарные потери в испытуемом двигателе и генераторе, обусловленные преобразованиями в данном контуре, представляют собой полезную мощность системы взаимного нагружения

Суммарная мощность, потребляемая системой взаимного нагружения из сети,

где $P_{ИЭ}$, $P_{ИЭ'}$, $P_{ИМ}$, $P_{ИМ'}$ – мощности, потребляемые из сети источниками ИЭ, ИЭ', ИМ, ИМ' соответственно.

В соответствии со схемой энергетических преобразований, приведенной на рис. 5.3, баланс мощностей может быть представлен в виде

где $P_{ИЭ}$, $P_{ИЭ'}$, $P_{ИМ}$, $P_{ИМ'}$ – потери мощности в источниках ИЭ, ИЭ', ИМ, ИМ' соответственно;

$P_{ПРМ}$, $P_{ПРЭ}$ – потери в преобразователях механической и электрической мощности соответственно;

, — дополнительные потери мощности в испытуемых двигателе и генераторе соответственно;

Коэффициент энергетической эффективности системы взаимного нагружения можно представить в виде

где

Потери мощности в источниках и преобразователях определяются их к. п. д. и полезной мощностью на выходе, требуемой для работы системы взаимного нагружения в заданных режимах [134-139].

Отметим, что схема на рис. 5.3 является универсальной и учитывает все возможные энергетические преобразования в системе взаимного нагружения. Для конкретной электромеханической схемы системы взаимного нагружения большая часть элементов данной энергетической схемы будет отсутствовать.

Значение коэффициента энергетической эффективности будет определяться к. п. д. источников ИЭ, ИЭ', ИМ, ИМ', преобразователей ПРЭ, ПРМ, а также коэффициентами энергетической эффективности преобразования мощности в условных частях Д' и Г'.

Коэффициент энергетической эффективности преобразования электрической мощности в механическую в двигателе Д' может быть представлен в виде [128]

или

Коэффициент энергетической эффективности преобразования механической мощности в электрическую в генераторе Г' может быть представлен в виде [129]

или

Необходимо отметить, что дополнительные потери и связаны, в том числе, и с параметрами энергетических процессов в основном контуре, то есть зависят от и соответственно. Также отметим, что во всех вариантах систем взаимного нагружения, кроме варианта AF , используется хотя бы один из косвенных способов компенсации хотя бы одного из видов потерь в испытуемых электромашинах [66].

Коэффициенты и в совокупности с к. п. д. всех источников и преобразователей мощности определяют общую энергетическую эффективность системы взаимного нагружения .

5.3.2 Энергетическая эффективность механического способа компенсации электрических потерь

Рассмотрим процесс компенсации электрических потерь в испытуемых электромашинах источником механической мощности. Такая компенсация обеспечивается за счёт превышения электромагнитной мощностью генератора одноименной мощности двигателя [66]. Характер преобразования и передачи мощности в испытуемом генераторе показан на рис. 5.5.

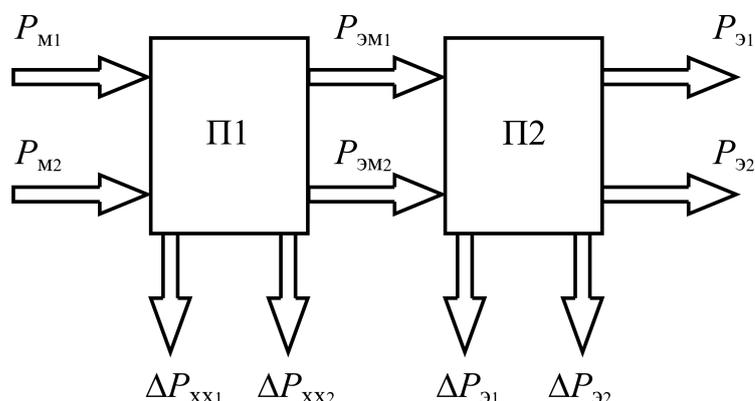


Рисунок 5.5 – Характер преобразования мощности в испытуемом генераторе

Условно электромашина, работающая в режиме генератора, энергетически разделена на две части. Первая часть П1 является преобразователем механической мощности на валу генератора в электромагнитную, вторая часть П2 является преобразователем электромагнитной мощности в электрическую.

К генератору, испытываемому по методу взаимной нагрузки, подводится два условных потока механической энергии: мощностью — от испытуемого двигателя и мощностью — от дополнительного источника. В результате преобразования в первой части П1 возникает две условные составляющие электромагнитной мощности и .

Деление общей мощности генератора на две составляющие, как и деление самой электромашины на два преобразователя, условно и обусловлено характером принятого метода исследования энергетических процессов. Преобразование каждой из этих составляющих мощности будем рассматривать отдельно. При этом будем учитывать, что потери мощности в генераторе не пропорциональны подведенной механической мощности и принцип суперпозиции для данного анализа неприемлем.

Преобразование каждой из составляющих P_1 и P_2 в электромагнитные мощности $P_{1\text{эм}}$ и $P_{2\text{эм}}$ сопровождается соответствующими потерями холостого хода $P_{1\text{хх}}$ и $P_{2\text{хх}}$.

В результате преобразования во второй части генератора P_2 электромагнитных мощностей $P_{2\text{эм}}$ и $P_{2\text{хх}}$ в соответствующие электрические мощности $P_{2\text{эл}}$ и $P_{2\text{элх}}$ возникают электрические потери $P_{2\text{элх}}$ и соответственно.

Все электрические потери в испытуемых электромашинах и преобразователях $P_{2\text{элх}}$ компенсируются при таком способе за счёт добавочной электромагнитной мощности генератора [66]

$$P_{2\text{элх}} = P_{2\text{эл}} - P_{2\text{эм}} \quad (5.41)$$

Каждый из процессов преобразования мощности можно охарактеризовать своим условным коэффициентом энергетической эффективности преобразования мощности. Для преобразователя П1 это будет два коэффициента энергетической эффективности $\eta_{1\text{эм}}$ и $\eta_{1\text{эл}}$, которые характеризуют преобразования P_1 в $P_{1\text{эм}}$ и $P_{1\text{эм}}$ в $P_{1\text{эл}}$ соответственно. Выражения для определения данных коэффициентов будут иметь вид:

$$\eta_{1\text{эм}} = \frac{P_{1\text{эм}}}{P_1}; \quad (5.42)$$

$$\eta_{1\text{эл}} = \frac{P_{1\text{эл}}}{P_{1\text{эм}}}. \quad (5.43)$$

С учетом того, что

$$P_{1\text{эл}} = P_{1\text{эм}} - P_{1\text{элх}}, \quad (5.44)$$

выражение для определения $\eta_{1\text{эл}}$ может быть представлено в виде

$$\eta_{1\text{эл}} = \frac{P_{1\text{эм}} - P_{1\text{элх}}}{P_{1\text{эм}}}. \quad (5.45)$$

Для преобразователя П2 также будут характерны два коэффициента энергетической эффективности.

Один будет соответствовать процессу преобразования в , а другой – процессу преобразования в . Выражения для определения данных коэффициентов будут иметь вид:

$$; \quad (5.46)$$

$$. \quad (5.47)$$

С учетом того, что

$$, \quad (5.48)$$

выражение (5.47) может быть преобразовано к виду

Результирующий коэффициент энергетической эффективности преобразования в определяется как произведение коэффициентов и , и является, по своей сути, коэффициентом полезного действия испытуемого генератора . С допустимой для данного анализа степенью упрощения можно считать, что этот к. п. д. не зависит от дополнительной механической мощности на валу генератора .

$$. \quad (5.49)$$

Результирующий коэффициент эффективности преобразования механической мощности дополнительного источника в добавочную электрическую мощность на выходе генератора может быть определен как

$$. \quad (5.50)$$

Основная электромагнитная мощность генератора , которая является преобразованной механической мощностью на валу генератора , поступающей от испытуемого двигателя, определяется в виде

$$, \quad (5.51)$$

где M и ω – основные составляющие электромагнитного момента и угловой скорости вала генератора соответственно, обеспечиваемые мощностью двигателя.

Добавочная электромагнитная мощность $M_{\text{д}}$, которая возникает в результате преобразования механической мощности дополнительного источника и компенсирует все электрические потери в стенде взаимной нагрузки, определяется в виде

$$, \quad (5.52)$$

где $M_{\text{д}}$ и $\omega_{\text{д}}$ – добавочные электромагнитный момент и угловая скорость, создаваемые дополнительным источником механической мощности $P_{\text{м}}$.

Из формулы (5.52) имеем три варианта условия компенсации электрических потерь:

а)
$$, \quad (5.53)$$

б)
$$, \quad (5.54)$$

в)
$$, \quad (5.55)$$

Варианты «б» и «в» требуют использования источника угловой скорости, который при передаче неизменного момента будет обеспечивать добавку угловой скорости вращения вала к входному значению скорости вращения [67].

Наиболее целесообразным с точки зрения простоты технической реализации является вариант «а». Примером конструктивного решения этого варианта является схема взаимной нагрузки с использованием одного механического источника – дополнительного приводного двигателя, непосредственно соединённого с валами испытуемых электромашин. Положительная разница электромагнитных моментов испытуемых генератора и двигателя в этой схеме обеспечивается за счёт соответствующей разницы токов возбуждения электромашин.

Варианты «б» и «в» требуют использование либо механического конвертора, либо источника угловой скорости. Рассмотрим особенности энергетических процессов в схемах взаимного нагружения по каждому из

вариантов, не вдаваясь в технические подробности их схемной реализации.

Основной электромагнитный момент генератора может быть представлен в виде

$$M_{\text{осн}} = k_{\text{осн}} I_{\text{я}} \Phi_{\text{осн}}, \quad (5.56)$$

где $k_{\text{осн}}$ – конструктивная постоянная испытуемой электромашины – генератора;

$\Phi_{\text{осн}}$ – магнитный поток генератора;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря генератора.

Добавочный электромагнитный момент генератора будет определяться в виде суммы

$$M_{\text{доб}} = k_{\text{доб}} I_{\text{я}} \Phi_{\text{доб}}, \quad (5.57)$$

где $k_{\text{доб}}$ и $\Phi_{\text{доб}}$ – добавочные значения магнитного потока и тока якоря генератора, обеспечивающие электромагнитный момент $M_{\text{доб}}$.

Таким образом, условие $M_{\text{осн}} + M_{\text{доб}} = M_{\text{н}} \cos \alpha$ может быть выполнено путём сочетания соотношений $M_{\text{осн}} = k_{\text{осн}} I_{\text{я}} \Phi_{\text{осн}}$ и $M_{\text{доб}} = k_{\text{доб}} I_{\text{я}} \Phi_{\text{доб}}$ по трём вариантам:

г) $M_{\text{осн}} = M_{\text{н}} \cos \alpha$ и $M_{\text{доб}} = 0$ (5.58)

д) $M_{\text{осн}} = 0$ и $M_{\text{доб}} = M_{\text{н}} \cos \alpha$ (5.59)

е) $M_{\text{осн}} = M_{\text{н}} \cos \alpha$ и $M_{\text{доб}} = 0$ (5.60)

Следовательно, каждое из условий (5.53) и (5.55) будет распадаться на три варианта по (5.58)-(5.60).

Для примера приведем сочетание условий «а» и «г» по системам (5.53) и (5.58) соответственно:

$$M_{\text{осн}} = M_{\text{н}} \cos \alpha \quad (5.61)$$

Потери $P_{\text{мех}}$ и $P_{\text{э}}$ в преобразователе П1 представляют собою соответствующие суммы магнитных и механической потерь:

$$\dots \quad (5.62)$$

$$\dots \quad (5.63)$$

где P_m и P_{me} – магнитные и механические потери в генераторе соответственно, обусловленные основными составляющими электромагнитного момента M и угловой скорости ω ;

P_{m2} и P_{me2} – дополнительные магнитные и механические потери в генераторе соответственно, вызванные добавочными значениями электромагнитного момента M_2 и угловой скорости ω_2 .

Магнитные потери при преобразовании основной составляющей мощности P_m в P_{m2} могут быть представлены в виде [140]

$$P_{m2} = k_m P_m \quad (5.64)$$

где k_m и k_{me} – коэффициенты пропорциональности магнитных потерь от вихревых токов и гистерезиса соответственно.

Суммарные магнитные потери P_{m2} при преобразовании двух условных мощностей P_m и P_{m2} в P_{m2} в общем виде будут определяться как

$$P_{m2} = k_m P_m + k_{me} P_{me} \quad (5.65)$$

После преобразований выражение (5.65) может быть представлено в виде

$$\dots \quad (5.66)$$

Тогда, учитывая, что $P_{m2} = k_m P_m + k_{me} P_{me}$, условно разделив сумму (5.66) на соответствующие составляющие P_m и P_{me} , получим выражение для P_{m2} в виде

$$\dots \quad (5.67)$$

Механические потери при преобразовании основной составляющей
в для тяговых электромашин и с независимой, и с самовентиляцией
могут быть представлены в виде

где и – постоянные коэффициенты.

Суммарные механические потери при преобразовании двух
условных составляющих мощности и в и в общем виде
будут определяться как

$$(5.68)$$

После преобразований уравнение (5.68) может быть представлено в
виде

$$(5.69)$$

Тогда, учитывая, что , условно разделив
сумму (5.88) на составляющие и , получим

$$(5.70)$$

Суммарные электрические потери в условном преобразователе П2
могут быть представлены в виде

$$(5.71)$$

где – сопротивление электрической цепи генератора.

Учитывая, что , условно разделив сумму на
соответствующие составляющие, получим:

$$(5.72)$$

$$(5.73)$$

Полученные в анализе формулы (5.67), (5.70), (5.73) являются
универсальными для всех сочетаний условий (5.53) – (5.55) с условиями (5.58
) – (5.60).

Для случая сочетания условий (5.53) и (5.58) (один источник момента) будут справедливы частные выражения:

;

;

;

;

;

;

;

.

Для варианта «б» (применение конвертора механической мощности) будут иметь место другие частные выражения:

;

;

;

;

;

;

;

Для сочетания условий «а» и «д» (использование конвертора напряжения или тока) частные выражения будут иметь вид:

$$\begin{aligned} & \cdot \\ & \quad ; \\ & \quad ; \\ & \quad \cdot \\ & \quad ; \\ & \quad \cdot \end{aligned}$$

Анализ полученных выражений показывает, что выбор рационального варианта компенсации электрических потерь в схеме взаимной нагрузки для заданной типовой мощности испытуемых электромашин будет определяться номинальными значениями тока якоря и частоты вращения, а также относительными значениями каждого из видов потерь (электрических, магнитных, механических).

Критерием рациональности для любого из вариантов будет максимум результирующего коэффициента энергетической эффективности преобразования механической мощности дополнительного источника в добавочную электрическую мощность на выходе испытуемого генератора.

Полученные в результате проведенного анализа выражения являются универсальными и будут справедливы для любой конфигурации принципиальной схемы стенда взаимной нагрузки с использованием механического способа компенсацией электрических потерь в испытуемых электромашинах.

5.3.3 Энергетическая эффективность электрического способа компенсации потерь холостого хода

Рассмотрим процесс компенсации механических и магнитных потерь в испытуемых тяговых электромашинах источником электрической мощности. Такая компенсация обеспечивается за счет превышения электромагнитной мощностью двигателя одноименной мощности генератора [66].

Характер преобразования и передачи мощности в двигателе для данного варианта показан в виде структурной схемы, представленной на рис. 5.6.

Условно электрическая машина, работающая в двигательном режиме, энергетически разделена на две части. Первая часть П1 является преобразователем электрической мощности в электромагнитную, вторая часть П2 является преобразователем электромагнитной мощности в механическую.

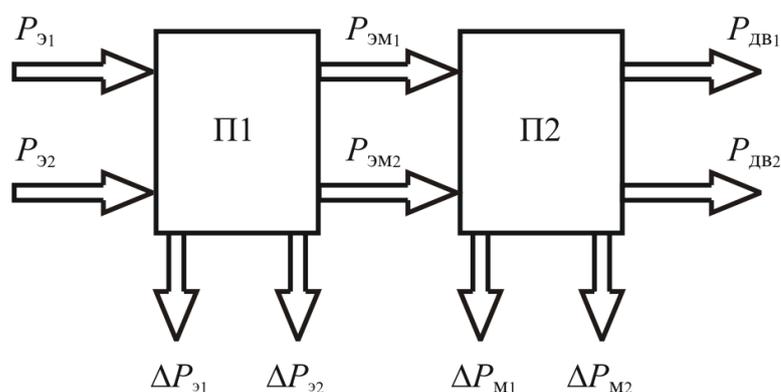


Рисунок 5.6 – Характер преобразования мощности в испытуемом двигателе

К двигателю в стенде взаимной нагрузки подводится два условных потока электрической энергии: мощностью $P_{э1}$ – от цепи испытуемого генератора и мощностью $P_{э2}$ – от дополнительного источника. В результате преобразования в первой части П1 возникает две условных соответствующих электромагнитной мощности $P_{эм1}$ и $P_{эм2}$.

Отметим, что деление общей мощности двигателя на два потока, как и деление самого двигателя на два преобразователя, условно и обусловлено лишь характером принятого метода анализа энергетических процессов. Будем рассматривать преобразование условных составляющих мощности независимо друг от друга. При этом будем учитывать, что ни электрические, ни магнитные потери в испытуемом электродвигателе не являются величинами, пропорциональными подведенной электрической мощности, и принцип суперпозиции для данного анализа неприемлем.

Преобразование каждой из электрических мощностей $P_{э1}$ и $P_{э2}$ в электромагнитные мощности $P_{эм1}$ и $P_{эм2}$ сопровождается

соответствующими электрическими потерями $P_{\text{эл}}$ и $P_{\text{мех}}$.

В результате преобразования электромагнитных мощностей $P_{\text{эл}}$ и $P_{\text{мех}}$ во второй части двигателя П2 возникает две соответствующих составляющих механической мощности $P_{\text{мех1}}$ и $P_{\text{мех2}}$. Преобразование каждой из составляющих электромагнитной мощности $P_{\text{эл1}}$ и $P_{\text{эл2}}$ в механические $P_{\text{мех1}}$ и $P_{\text{мех2}}$ сопровождается соответствующими потерями холостого хода $P_{\text{хх1}}$ и $P_{\text{хх2}}$.

Отметим, что все потери холостого хода $P_{\text{хх}}$ в стенде взаимной нагрузки рассматриваемого варианта компенсируется за счет добавочной электромагнитной мощности двигателя [66]

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}} + P_{\text{хх}} \quad (5.74)$$

Каждый из процессов преобразования мощности можно охарактеризовать своим условным коэффициентом энергетической эффективности. Для преобразователя П1 это будет коэффициент энергетической эффективности $\eta_{\text{эл1}}$, который характеризует преобразование $P_{\text{эл1}}$ в $P_{\text{мех1}}$, и коэффициент $\eta_{\text{мех1}}$, который характеризует преобразование $P_{\text{мех1}}$ в $P_{\text{мех2}}$. Выражения для определения данных коэффициентов будут иметь вид:

$$\eta_{\text{эл1}} = \frac{P_{\text{мех1}}}{P_{\text{эл1}}} \quad ; \quad (5.75)$$

$$\eta_{\text{мех1}} = \frac{P_{\text{мех2}}}{P_{\text{мех1}}} \quad . \quad (5.76)$$

С учетом того, что

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{эл1}} + P_{\text{эл2}} \quad , \quad (5.77)$$

выражение для определения коэффициента $\eta_{\text{эл}}$ может быть представлено в виде

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}} \quad . \quad (5.78)$$

Для преобразователя П2 также будут характерны два коэффициента преобразований каждой из составляющих мощности $P_{\text{мех1}}$ и $P_{\text{мех2}}$. Это будет

коэффициент $\eta_{\text{в}}$, характеризующий преобразование $P_{\text{в}}$ в $P_{\text{м}}$ и
 коэффициент $\eta_{\text{с}}$, характеризующий преобразование $P_{\text{с}}$ в $P_{\text{м}}$.
 Выражения для определения данных коэффициентов будут иметь вид:

$$\eta_{\text{в}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{в}}} \quad ; \quad (5.79)$$

$$\eta_{\text{с}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{с}}} \quad . \quad (5.80)$$

С учетом того, что

$$P_{\text{с}} = P_{\text{в}} + P_{\text{л}} \quad , \quad (5.81)$$

выражение для определения $\eta_{\text{с}}$ может быть представлено в виде

$$\eta_{\text{с}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{в}} + P_{\text{л}}} \quad . \quad (5.82)$$

Результирующий коэффициент энергетической эффективности преобразования $P_{\text{в}}$ в $P_{\text{м}}$ определяется в виде произведения условных коэффициентов $\eta_{\text{в}}$, $\eta_{\text{с}}$ и является в своей сущности к. п. д. двигателя $\eta_{\text{д}}$, соответствующим основным составляющим его э. д. с. и силы тока. С допустимой для данного анализа степенью упрощения можно считать этот к. п. д. независимым от дополнительной электрической мощности $P_{\text{л}}$.

$$\eta_{\text{с}} = \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{с}} \quad . \quad (5.83)$$

Результирующий коэффициент энергетической эффективности преобразования электрической мощности дополнительного источника $P_{\text{л}}$ в добавочную механическую мощность на валу двигателя $P_{\text{м}}$ может быть определен в виде

$$\eta_{\text{л}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{л}}} \quad . \quad (5.84)$$

Основная электромагнитная мощность двигателя $P_{\text{э}}$, которая представляет собою преобразованную электрическую мощность цепи испытуемого генератора $P_{\text{г}}$, определяется в виде

$$, \quad (5.85)$$

где E и I – основные составляющие э. д. с. и силы тока якоря двигателя, обеспечиваемые мощностью цепи генератора.

Добавочная электромагнитная мощность $P_{\text{д}}$, которая возникает в результате преобразования электрической мощности дополнительного источника и компенсирует все потери холостого хода в стенде взаимной нагрузки, определяется в виде суммы произведений

$$, \quad (5.86)$$

где $E_{\text{д}}$ и $I_{\text{д}}$ – добавочные э. д. с. и сила тока, создаваемые дополнительным источником электрической мощности $P_{\text{д}}$.

Из формулы (5.86) имеем три варианта условия компенсации магнитных и механических потерь:

а)
$$, \quad (5.87)$$

б)
$$, \quad (5.88)$$

в)
$$, \quad (5.89)$$

Наиболее целесообразными из приведенных вариантов являются варианты «а» и «б». Вариант «в» является случаем сочетания вариантов «а» и «б».

Примером конструктивного решения варианта «а» является классическая схема взаимной нагрузки с использованием вольтодобавочной машины и линейного генератора. Примером конструктивного решения варианта «б» является схема взаимной нагрузки с одним источником напряжения, в которой положительная разница э. д. с. якорей двигателя и генератора обеспечивается соответствующей разницей токов возбуждения испытуемых электромашин [69].

Рассмотрим особенности энергетических процессов, присущие каждому варианту. Суммарные электрические потери в условном преобразователе П1

$$, \quad (5.90)$$

где R – сопротивление цепи двигателя.

Учитывая, что $P_{\text{доп}}$, условно разделив общую сумму по выражению (5.90) на соответствующие составляющие, получим:

$$P_{\text{доп}} = P_{\text{доп1}} + P_{\text{доп2}}; \quad (5.91)$$

$$P_{\text{доп}} = P_{\text{доп1}} + P_{\text{доп2}}. \quad (5.92)$$

К потерям $P_{\text{доп}}$ по формуле (5.92) отнесены все дополнительные электрические потери в двигателе, вызванные добавочным током $I_{\text{доп}}$. Здесь необходимо отметить, что потери $P_{\text{доп1}}$ и часть потерь $P_{\text{доп2}}$, равная $P_{\text{доп1}}$, компенсируется за счет электрической мощности цепи испытуемого генератора $P_{\text{ген}}$, а часть потерь $P_{\text{доп2}}$, равная $P_{\text{доп1}}$, компенсируется за счет электрической мощности дополнительного источника $P_{\text{доп}}$.

Суммарные потери холостого хода $P_{\text{хх}}$ и $P_{\text{доп}}$ представляют собою суммы [80]:

$$P_{\text{хх}} = P_{\text{хх1}} + P_{\text{хх2}}; \quad (5.93)$$

$$P_{\text{доп}} = P_{\text{доп1}} + P_{\text{доп2}}. \quad (5.94)$$

где $P_{\text{хх1}}$ и $P_{\text{хх2}}$ – магнитные и механические потери в электродвигателе соответственно, обусловленные основной составляющей э. д. с. E ;

$P_{\text{доп1}}$ и $P_{\text{доп2}}$ – дополнительные магнитные и механические потери в электродвигателе, обусловленные добавочной э. д. с. $E_{\text{доп}}$.

Магнитные потери в условном преобразователе П2 при постоянной частоте вращения якоря двигателя [140]

$$P_{\text{м}} = P_{\text{м1}} + P_{\text{м2}}. \quad (5.95)$$

где $P_{\text{м}}$ – постоянная, зависящая от конструкции электромашины и частоты перемагничивания якоря.

Учитывая, что $P_{\text{доп}}$, условно разделив суммарные потери $P_{\text{доп}}$ по выражению (5.95) на соответствующие составляющие, получим:

$$P_{\text{доп}} = P_{\text{доп1}} + P_{\text{доп2}}; \quad (5.96)$$

(5.97)

К потерям по формуле (5.97) отнесены все дополнительные магнитные потери в электродвигателе, вызванные добавочной э. д. с.

Отметим, что и потери, и потери компенсируются только за счёт электрической мощности дополнительного источника.

Механические потери в условном преобразователе П2 при неизменной частоте вращения якоря электродвигателя постоянны и не зависят от выбранного варианта их компенсации.

Ни добавочный ток якоря, ни добавочная э. д. с. не влияют на механические потери в электромашинах.

Суммарные потери холостого хода в преобразователе П2:

$$; \quad (5.98)$$

$$. \quad (5.99)$$

Формулы (5.91), (5.92), (5.98), (5.99), полученные в проведенном анализе, являются общими для любого из трёх вариантов компенсации магнитных и механических потерь источником электрической мощности («а», «б», «в»).

Для варианта «а» будут справедливы частные выражения:

$$;$$

$$;$$

$$;$$

$$;$$

$$;$$

Для варианта «б» эти же параметры будут определяться в виде:

;

.

;

;

;

.

Анализ полученных выражений показывает, что выбор рационального варианта компенсации магнитных и механических потерь в схеме взаимной нагрузки будет определяться для заданной типовой мощности испытуемых электромашин номинальным значением тока якоря и относительными значениями каждого из видов потерь (электрических, магнитных, механических). Критерием рациональности для любого из вариантов будет максимум результирующего коэффициента энергетической эффективности преобразования электрической мощности дополнительного источника в добавочную механическую мощность на валу испытуемого двигателя.

.

Полученные в результате проведенного анализа и приведенные выше выражения являются универсальными и будут справедливы для любой конфигурации принципиальной схемы стенда взаимной нагрузки с использованием электрического способа компенсации потерь холостого хода в испытуемых тяговых электромашинах.

5.3.4 Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электромашин

В соответствии с ГОСТ 2582-81 [1] электрические машины тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта испытывают при приёмо-сдаточных испытаниях в течение одного часа при номинальном напряжении и токе, дающем превышение температуры, соответствующее превышению температуры при номинальном режиме. Фактически это значение тока соответствует часовому режиму.

Тяговые двигатели с независимой вентиляцией при приёмо-сдаточных испытаниях требуется испытывать на нагревание при расходе охлаждающего

воздуха, равном номинальному.

Правила ремонта тяговых электромашин [2] допускают проведение тепловых испытаний при расходе охлаждающего воздуха, меньшем номинального значения, и эквивалентном токе, дающем превышение температуры, соответствующее превышению температуры при номинальном режиме.

ГОСТ 2582-81[1] предусматривает определение эквивалентных токов, дающих превышение температуры номинального режима при расходе охлаждающего воздуха, равном 0,75 и 0,5 от номинального, а также без вентиляции еще при проведении квалификационных испытаний тяговых электромашин. Следовательно, ряд значений эквивалентных токов для проведения тепловых испытаний с расходом охлаждающего воздуха, меньшим номинального, может быть определён из данных протоколов квалификационных испытаний тяговых электромашин.

Известны научные исследования, направленные на определение аналитических выражений для эквивалентного тока, соответствующего режиму тепловых испытаний без вентиляции [32 - 35].

Сама идея проведения тепловых испытаний тяговых электромашин без вентиляции не нова и в известных научных работах рассматривается только как способ снижения общих затрат на испытания путём исключения затрат электроэнергии на работу вентилятора охлаждения.

Следует иметь в виду, что при таких тепловых испытаниях не производится проверка эффективности конвективной теплоотдачи с вентилируемых поверхностей тяговой электромашин, что, по сути, существенно снижает качество самих тепловых испытаний [120].

Очевидно, что в течение времени испытаний на нагрев, часть тепловой энергии, выделяющейся в обмотках испытуемой электромашин, отдаётся в окружающую среду и не участвует в формировании теплового потенциала обмоток. Целью же тепловых испытаний является нагрев обмоток тяговой электромашин до определённого превышения температуры за определенное время [1]. Таким образом, полезной является та часть энергии, выделяющаяся в обмотках, которая идет на повышение их температуры. Сама же эта полезная часть энергии, которая определяется эквивалентной теплоёмкостью и заданным превышением температуры, не зависит от режима испытания. Следовательно, снижение расхода электроэнергии на тепловые испытания может быть достигнуто путём минимизации общей энергии теплоотдачи за время нагревания до заданного превышения температуры [132].

Общий качественный анализ тепловых процессов, протекающих при данных испытаниях, показывает, что энергия теплоотдачи за время нагревания до заданного превышения температуры обмоток электромашин с ростом тока, а, следовательно, уменьшением времени нагревания, уменьшается. Следовательно, чем больше значение тока нагрузки испытуемой электромашин, тем, при прочих равных условиях, расход электроэнергии на её нагрев меньше.

Для более точной, количественной, оценки влияния испытательного значения силы тока на расход электроэнергии более подробно рассмотрим тепловые процессы, протекающие при нагревании обмотки якоря тяговой электромашины во время её испытания с постоянным током нагрузки. Для большинства тяговых электродвигателей тягового подвижного состава именно эта обмотка является лимитирующей по нагреву [79, 104, 141-143].

Дифференциальное уравнение нагревания обмотки якоря тяговой электрической машины имеет вид [19, 114]

$$\dots, \quad (5.100)$$

где \dots – приведенные потери мощности;

\dots – приведенная теплоёмкость;

\dots – приведенная теплоотдача;

\dots – превышение температуры;

\dots – текущее время.

Разделив левую и правую части выражения (5.100) на \dots , получим уравнение баланса мощностей в виде

$$\dots \quad (5.101)$$

Введем обозначения для слагаемых правой части уравнения (5.101):

$$\dots; \quad (5.102)$$

$$\dots \quad (5.103)$$

Тогда уравнение (5.101) примет вид

$$\dots \quad (5.104)$$

Проинтегрировав правую и левую части выражения (5.100) получим уравнение баланса тепловых энергий в виде

$$\dots, \quad (5.105)$$

где \dots – время испытания;

\dots – превышение температуры на момент времени \dots .

Определенный интеграл $\int_{t_0}^t P dt$ представляет собой полную тепловую энергию, выделившуюся в обмотке якоря. На момент времени одна часть этой энергии, равная $\int_{t_0}^t P_{\text{ст}} dt$, израсходована на повышение

температуры обмотки, а другая, равная $\int_{t_0}^t P_{\text{ст}} dt$, рассеяна в окружающую среду.

Приведенные потери мощности $P_{\text{ст}}$ могут быть представлены в виде [114]

$$P_{\text{ст}} = R_{\text{я}} I^2 + k_{\text{ст}} I^2 \theta + P_{\text{ст,ст}}, \quad (5.106)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря при температуре окружающей среды;
 $k_{\text{ст}}$ – температурный коэффициент сопротивления;
 θ – коэффициент, учитывающий влияние потерь в стали на нагрев обмотки якоря;
 $P_{\text{ст,ст}}$ – потери мощности в стали.

В целом потери $P_{\text{ст}}$ могут быть представлены в виде

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст,экв}} + P_{\text{ст,доп}}, \quad (5.107)$$

где $P_{\text{ст,экв}}$ – эквивалентные потери при $\theta = 0$;
 $P_{\text{ст,доп}}$ – дополнительные потери, зависящие от превышения температуры.

Для удобства введем обозначения для членов уравнения баланса тепловых энергий (5.105):

$$P_{\text{ст,экв}} = P_{\text{я}} + P_{\text{ст}}; \quad P_{\text{ст,доп}} = P_{\text{ст,ст}} + P_{\text{ст,в}}. \quad (5.108)$$

Тогда уравнение (5.100) примет вид

$$C \frac{d\theta}{dt} + P_{\text{ст,экв}} + P_{\text{ст,доп}} = P_{\text{я}} + P_{\text{ст}}. \quad (5.109)$$

Если целью тепловых испытаний является нагревание якорной обмотки при заданном токе I и теплоотдаче $P_{\text{ст,в}}$ до превышения

температуры за время , то энергия – является полезной, то есть расходуемой только на повышение . Отношение этой энергии к полной энергии и будет характеризовать энергетическую эффективность испытания на нагрев. Коэффициент энергетической эффективности нагревания

$$(5.110)$$

Он будет показывать, какая часть тепловой энергии, выделившейся в обмотке якоря, потрачена на повышение её температуры.

Для выполнения условия при необходимо обеспечение условия .

На рис. 5.7 приведены кривые изменения превышения температуры и мощностей , , , , входящих в уравнение (5.104).

Площадь фигуры $ABE0$ представляет собой полную тепловую энергию , выделившуюся в обмотке за время . Площадь фигуры $0CE$ является энергией , которая рассеяна в окружающую среду. Площадь фигуры $ADE0$ представляет собой энергию , которая пошла на нагревание до превышения температуры .

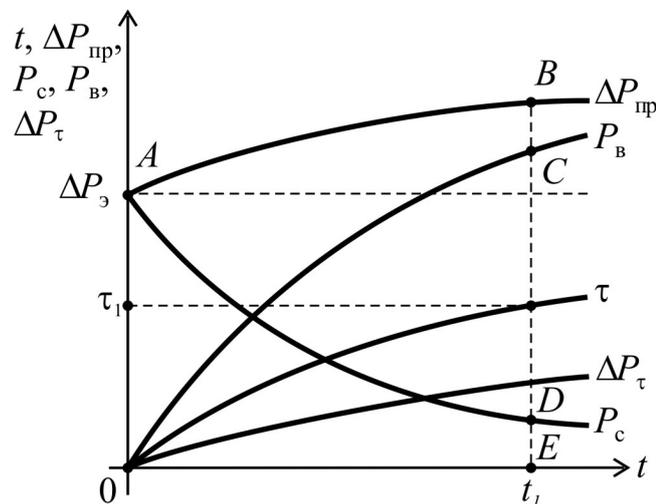


Рисунок 5.7 – Кривые изменения во времени превышения температуры и мощностей , , , при испытании на нагрев

Предварительный анализ кривых на рис. 5.7 показывает, что с увеличением скорости нагревания при фиксированном значении энергия будет уменьшаться. Следовательно, с ростом тока

коэффициент будет увеличиваться.

Для возможности количественного анализа влияния величина тока на расход энергии на проведение испытания найдем зависимость

в аналитическом виде по формуле (5.129).

Зависимость превышения температуры от времени может быть представлена в виде [114]

$$, \quad (5.111)$$

где – установившееся значение превышения температуры;

– эквивалентная постоянная времени нагревания.

Установившееся превышение температуры и эквивалентная постоянная времени могут быть найдены в виде [114]:

$$; \quad (5.112)$$

$$. \quad (5.113)$$

При известном значении время испытания , может быть найдено из формулы (5.111) в виде

$$. \quad (5.114)$$

Найдем выражение для , взяв определённый интеграл [144]

$$. \quad (5.115)$$

Подставив выражения (5.108) и (5.115) для и соответственно в формулу (5.108), после преобразований получим

$$. \quad (5.116)$$

Отношение найдем из выражения (5.113) для в виде

$$\dots \quad (5.117)$$

Отношение может быть найдено из анализа уравнения (5.101) баланса мощностей для момента времени . Для этого момента времени справедливы выражения:

$$\dots ; \quad (5.118)$$

$$\dots \quad (5.119)$$

Тогда выражение (5.101) можно записать в виде

$$\dots \quad (5.120)$$

Производная в момент времени может быть найдена из выражения (5.111) как

$$\dots \quad (5.121)$$

Тогда справедливо равенство

$$\dots \quad (5.122)$$

Следовательно, отношение может быть найдено в виде

$$\dots \quad (5.123)$$

После соответствующих преобразований выражение (5.117) может быть записано как

$$\dots \quad (5.124)$$

Путём подстановки (5.124) в выражение (5.116) после преобразований получим

$$(5.125)$$

Величина, обратная $\eta_{\text{я}}$, представляет собой отношение

которое показывает во сколько раз полная энергия потерь в якоре тягового электродвигателя при его испытании больше энергии, затраченной на нагревание обмотки якоря.

В табл. 5.2 для примера приведены результаты расчёта зависимостей $\eta_{\text{я}}$ и $\eta_{\text{я}}^{-1}$, полученные для тягового электродвигателя НБ-406Б магистрального грузового электровоза ВЛ8 с использованием тепловых характеристик его обмотки якоря ($\theta = 120^\circ \text{C}$) [104].

Таблица 5.2 – Результаты расчёта зависимостей $\eta_{\text{я}}$ и $\eta_{\text{я}}^{-1}$ для тягового электродвигателя НБ-406Б

| | | | | | | |
|------------------------|----------|------|------|------|------|------|
| $I_{\text{я}}$, А | 340 | 380 | 440 | 485 | 530 | 600 |
| $t_{\text{я}}$, мин | ∞ | 56,5 | 28,9 | 20,4 | 14,9 | 10,4 |
| $\eta_{\text{я}}$ | 0 | 0,43 | 0,57 | 0,63 | 0,67 | 0,7 |
| $\eta_{\text{я}}^{-1}$ | ∞ | 2,32 | 1,75 | 1,59 | 1,5 | 1,42 |

В табл. 5.3 для примера приведены результаты расчёта зависимостей $\eta_{\text{я}}$ и $\eta_{\text{я}}^{-1}$, полученные для тягового электродвигателя ДТ-9Н тягового агрегата ПЭ2М с использованием тепловых характеристик его обмотки якоря ($\theta = 120^\circ \text{C}$) [186, 187].

Таблица 5.3 – Результаты расчёта зависимостей $\eta_{\text{я}}$ и $\eta_{\text{я}}^{-1}$ для тягового электродвигателя ДТ-9Н

| | | | | | | |
|----------------------|----------|------|------|------|------|------|
| $I_{\text{я}}$, А | 300 | 335 | 400 | 450 | 500 | 550 |
| $t_{\text{я}}$, мин | ∞ | 55,5 | 25,2 | 20,5 | 13,4 | 10,9 |
| $\eta_{\text{я}}$ | 0 | 0,43 | 0,63 | 0,68 | 0,73 | 0,74 |

| | | | | | | |
|--|----------|------|-----|------|------|------|
| | ∞ | 2,32 | 1,6 | 1,47 | 1,37 | 1,34 |
|--|----------|------|-----|------|------|------|

Графически зависимости $k_{\text{эф}}$, t_1 и $1/k_{\text{эф}}$, полученные для тягового двигателя НБ-406Б (табл. 5.2), представлены на рис 5.8, а для тягового двигателя ДТ-9Н (табл. 5.3) – на рис. 5.9.

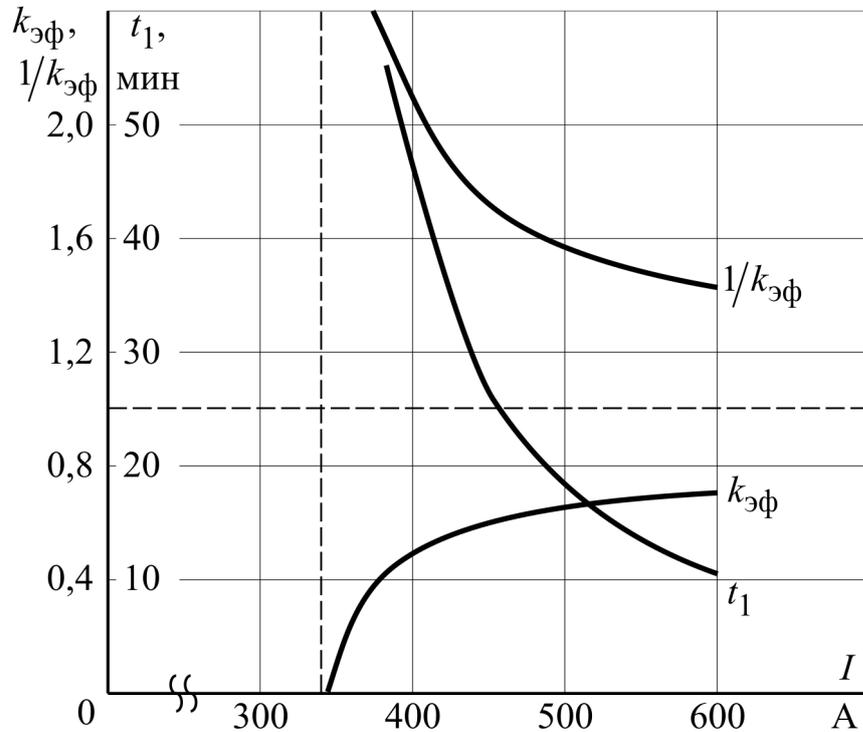


Рисунок 5.8 – Зависимости $k_{\text{эф}}$, t_1 и $1/k_{\text{эф}}$ для тягового двигателя НБ-406

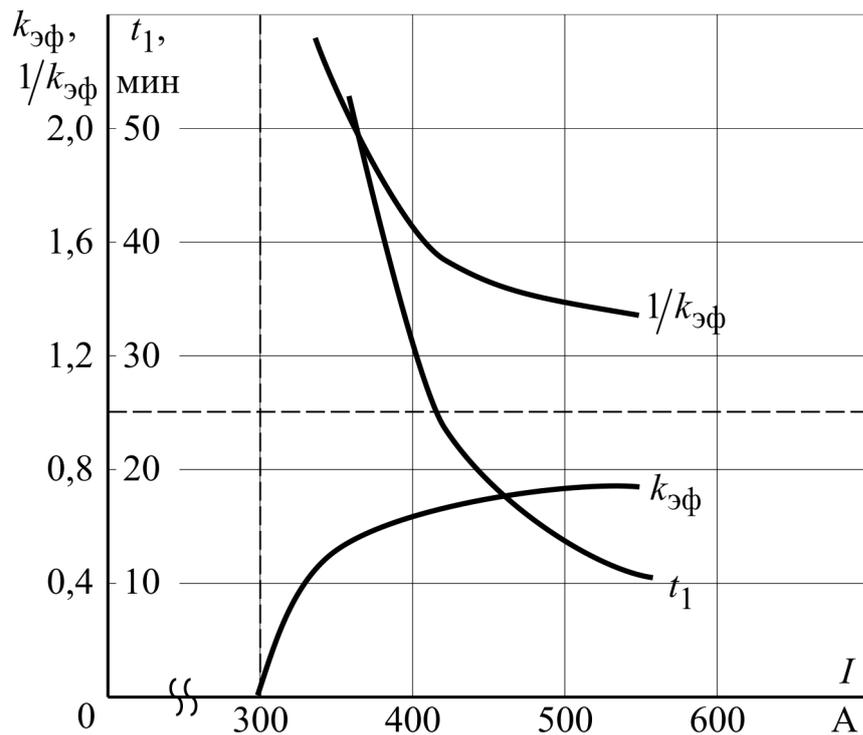


Рисунок 5.9 – Зависимости $\eta_{\text{э}}$ и $\eta_{\text{м}}$ для тягового двигателя ДТ-9Н

Степень снижения расхода электроэнергии на проведение испытаний на нагрев с повышенным током нагрузки может быть определена в виде отношения коэффициентов энергетической эффективности в сравниваемых режимах.

Из данных табл. 5.2 и графиков на рис. 5.8 видно, что при испытаниях на нагревание тягового двигателя НБ-406Б магистрального электровоза с силой тока нагрузки, близкой к пусковому значению (485 А), суммарные потери энергии в якоре почти в полтора раза ниже, чем при часовом режиме (380 А). При этом время испытаний на нагрев уменьшается почти в три раза.

Из данных табл. 5.3 и графиков на рис. 5.9 видно, что при испытаниях на нагревание тягового двигателя ДТ-9Н тягового агрегата с силой тока нагрузки, близкой к значению пятнадцатиминутного режима (480 А), суммарные потери энергии в якоре более чем в полтора раза ниже, чем при часовом режиме (335 А). При этом время тепловых испытаний уменьшается в четыре раза.

Необходимо отметить, что суммарные электрические потери энергии в других обмотках испытуемой электромашины при увеличении испытательного значения тока снижаются не в меньшей степени, чем потери в лимитирующей обмотке (обмотке якоря). Данные выводы будут справедливы и для других типов тяговых электродвигателей тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

5.4 Выводы по разделу 5

В результате исследований, проведенных в разделе 5, можно сделать следующие выводы:

- расхождение магнитных характеристик тяговых электромашин, испытываемых на стенде взаимной нагрузки с двумя источниками мощности вызывает перераспределение мощности этих источников и увеличивает расхождение электромагнитных мощностей испытываемых электромашин;
- расхождение магнитных характеристик испытываемых электромашин требует запаса суммарной приведенной мощности двух источников, который определяется максимальным допустимым отклонением частот вращения их якорей в номинальном (часовом) режиме;
- анализ статистических данных результатов приёмо-сдаточных испытаний тяговых электромашин показывает, что на практике существует достаточно высокая вероятность попадания на стенд взаимной нагрузки двух испытываемых электромашин с максимальным расхождением магнитных характеристик, требующим почти двукратного запаса суммарной мощности двух источников.

– энергетическая эффективность испытания на нагрев может быть представлена как комплексный параметр, зависящие как энергетической эффективности системы взаимного нагружения так энергетической эффективности нагревания обмоток испытуемых электромашин;

– энергетическая эффективность системы взаимного нагружения определяется к. п. д. источников и преобразователей мощности, а также энергетическими эффективностями косвенных методов компенсации потерь, которые зависят от доли того или иного вида потерь в общей сумме потерь мощности в испытуемой тяговой электромашине;

– энергетическая эффективность нагревания обмоток испытуемой тяговой электромашин зависит как от тепловых характеристик электромашин, так и от тока нагрузки, с увеличением которого коэффициент энергетической эффективности нагревания повышается, а время проведения испытания уменьшается.

РАЗДЕЛ 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ И РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ПРИЁМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

6.1 Определение характеристик источников и преобразователей мощности систем взаимного нагружения

В системе взаимного нагружения тяговых электромашин, варианты схемного решения которой определены выше, могут использоваться следующие источники и преобразователи мощности [66].

Источники электрической мощности [145-148]:

–источник напряжения;

–источник тока.

Источники механической мощности [149-155]:

–источник механического момента;

–источник угловой скорости.

Преобразователи электрической и механической мощности [135, 136, 145, 156-158]:

–конвертор напряжения (тока);

–конвертор механического момента (угловой скорости).

Возможные варианты технических решений и особенности работы каждого источника и преобразователя мощности рассмотрены в приложении «Д» диссертации. Рациональность того или иного варианта схемы взаимного нагружения будет определяться как особенностями конструктивного исполнения испытательной системы, так и необходимыми значениями типовых номинальных и предельных параметров источников и преобразователей мощности, используемых в ней [159].

6.1.1 Определение параметров источников электрической мощности

Определение напряжения последовательного источника.

Рассмотрим процесс компенсации потерь последовательным источником напряжения в общем виде. Источник напряжения (см. Приложение Д) в системах взаимного нагружения включен последовательно с якорными обмотками испытуемых тяговых электромашин [67]. Следовательно, ток источника напряжения равен току нагрузки при испытаниях. Примем ток источника $I_{\text{н}}$, равным часовому значению тока испытуемых электромашин

Напряжение на выходе источника будет определяться из баланса мощностей в виде

$$, \quad (6.1)$$

где – суммарные потери мощности, которые компенсируются данным источником напряжения.

Формула (6.1) при условии может быть преобразована к виду

$$,$$

где – суммарные потери, приведенные к часовой мощности; – номинальное напряжение, при котором проводится испытание электромашин.

Приведенные потери мощности

$$.$$

При компенсации источником только электрических потерь

$$,$$

где – приведенные суммарные электрические потери.

При компенсации источником всех потерь в испытательном стенде

$$,$$

где – приведенные суммарные потери холостого хода.

Приведенные суммарные электрические потери и потери холостого хода соответственно:

$$;$$

$$,$$

где и – суммарные электрические потери и потери холостого хода соответственно.

Приведенные суммарные потери в двух испытуемых электромашинах в часовом режиме могут быть представлены в виде

где η – к. п. д. тяговой электромашины в часовом режиме.

Тогда напряжение на выходе источника в случае компенсации всех потерь в стенде

$$(6.2)$$

Строго говоря, в общем случае напряжение источника

где $U_{\text{дв}}$ и $U_{\text{ген}}$ – к. п. д. двигателя и генератора соответственно;

$U_{\text{дв}}$ и $U_{\text{ген}}$ – напряжения на двигателе и генераторе соответственно.

Учитывая тот факт, что режимы работы двигателя и генератора при испытаниях отличаются незначительно, в практических расчётах можно пользоваться упрощенной формулой (6.2).

Определение силы тока параллельного источника. Рассмотрим процесс компенсации потерь мощности параллельным источником (источником тока) в общем виде.

Источник тока (см. Приложение Д) в системах взаимного нагружения включен параллельно обмоткам испытуемого двигателя. Следовательно, напряжение на выходе источника равно испытательному напряжению на тяговом двигателе. Примем напряжение на выходе источника $U_{\text{ист}}$, равным номинальному значению.

Необходимый ток параллельного источника будет определяться из баланса мощностей в виде

$$(6.3)$$

Формула (6.3) при условии $U_{\text{ист}} = U_{\text{ном}}$ может быть преобразована к виду

При компенсации источником только потерь холостого хода

При компенсации параллельным источником всех потерь в испытательном стенде

;

6.1.2 Определение параметров источников механической мощности

Определение механического момента источника момента. Рассмотрим процесс компенсации потерь мощности источником механического момента в общем виде. Дополнительный двигатель в качестве такого источника (см. Приложение Д) соединяется с валами испытуемых электромашин. Следовательно, угловая скорость источника равна угловым скоростям валов испытуемых электромашин. Примем угловую скорость источника, равной часовому значению испытуемых электромашин.

Момент на валу источника будет определяться в виде

$$M = \frac{P_{\Sigma}}{\omega} \quad (6.4)$$

где P_{Σ} – суммарные потери мощности, которые компенсируются источником момента.

Формула (6.4) при условии $\omega = \omega_{\text{н}}$ может быть преобразована к виду

,

где P_{Σ} – суммарные потери, приведенные к часовой мощности ;

$M_{\text{н}}$ – момент на валу испытуемых электромашин в часовом режиме.

Приведенные суммарные потери мощности

При компенсации источником момента только потерь холостого хода

,

где – приведенные суммарные потери холостого хода.

При компенсации источником всех потерь в системе взаимного нагружения тяговых электромашин

,

где – приведенные суммарные электрические потери.

С учетом того, что

,

получим , (6.5)

где – к. п. д. тяговой электромашин в часовом режиме.

Если режимы нагружения двигателя и генератора различны, то более точное выражение для будем иметь в виде

,

где и – к. п. д. двигателя и генератора соответственно;

и – моменты на валах двигателя и генератора соответственно.

Необходимо заметить, что даже в условиях различной нагруженности испытуемых тяговых электромашин упрощенная формула (6.5) будет давать достаточно точные значения механического момента .

Определение добавки угловой скорости источника скорости.

Рассмотрим процесс компенсации потерь мощности источником угловой скорости в общем виде. Источник скорости (см. Приложение Д) включен в системе взаимного нагружения непосредственно в механическую цепь, соединяющую валы испытуемых электромашин. Следовательно, момент на валах источника равен моментам на валах двигателя и генератора. Примем момент на валах источника скорости , равным часовому значению.

.

Необходимая угловая скорость источника будет определяться из баланса мощностей в виде

$$(6.6)$$

При условии эта формула может быть преобразована к виду

где – угловая скорость испытываемых электромашин в часовом режиме.
При компенсации данным источником только электрических потерь

При компенсации источником всех потерь в испытательном стенде

;

6.1.3 Определение параметров преобразователей напряжения и механического момента

Преобразователь напряжения в зависимости от варианта схемы взаимного нагружения может быть понижающим или повышающим [67]. Рациональность использования преобразователя напряжения определяется его к. п. д. и себестоимостью. Последняя во многом зависит от класса и среднего тока электронного ключа, используемого в преобразователе [145].

Для понижающего конвертора напряжения (см. Приложение Д) максимальное среднее значение тока электронного ключа может быть определено по формуле

где – максимальный ток нагрузки испытываемого двигателя;

– коэффициент заполнения импульсов регулятора, равный необходимому коэффициенту передачи напряжения.

Максимальное напряжение электронного ключа

где U_{max} – максимальное испытательное напряжение на генераторе.
 Максимальная мощность конвертора напряжения

Отметим, что понижающий конвертор напряжения должен быть рассчитан на максимальную мощность электрической машины при испытаниях.

Для повышающего конвертора напряжения (см. Приложение Д) максимальное среднее значение тока электронного ключа может быть определено по формуле

или

где I_{max} и $I_{\text{дв}}$ – максимальные токи нагрузки испытуемых генератора и двигателя соответственно.

Максимальное напряжение электронного ключа

где $U_{\text{дв}}$ – максимальное испытательное напряжение на двигателе.

Электронный ключ повышающего конвертора напряжения должен быть рассчитан на существенно меньшее значение максимального среднего тока, чем понижающего конвертора и себестоимость системы взаимного нагружения с повышающим конвертором будет значительно ниже.

Преобразователь механического момента (угловой скорости) может быть выполнен в виде механической, гидравлической, пневматической или электрической передачи [136, 160-170].

Механическая передача любого из видов (см. Приложение Д) должна быть рассчитана на испытательные значения угловой скорости и момента на валу тяговой электромашин. Расчетное значение мощности передачи

где P_{max} – максимальная мощность на валу электромашин при испытании.
 Расчетное значение крутящего момента механической передачи

где M_{max} – максимальное значение крутящего момента тяговой электромашин при испытании.

Величины M_{max} и T_{max} определяют тип, массогабаритные показатели и стоимость механической передачи.

Электромашин G2 и M2 электропередачи (см. Приложение Д) должны быть рассчитаны на полную мощность испытываемых электромашин.

Суммарная расчётная мощность электромашин электропередачи

6.1.4 Определение параметров регулятора тока возбуждения

Анализ возможных технических решений регулятора возбуждения одной из испытываемых тяговых электромашин (см. Приложение Д) показывает, что наиболее рациональным методом регулирования поля является импульсное регулирование путём шунтирования обмотки возбуждения с помощью электронного ключа. Основным преимуществом данного метода отпитки обмотки возбуждения является отсутствие дополнительного источника электрической мощности. Регулятор ослабления поля (рис. Д.22 приложений) не является источником мощности.

Максимальное среднее значение тока электронного ключа регулятора ослабления поля

;

где I_{max} – максимальный ток регулятора ослабления поля.

Максимальное напряжение на электронном ключе

;

где I_{max} – максимальный ток якоря;

R_{exc} – максимальное сопротивление обмотки возбуждения (в нагретом состоянии).

Регулирование коэффициента заполнения импульсов электронного ключа может быть как широтно-импульсным, так и частотно-импульсным. Наиболее рациональным будет использование широтно-импульсного регулирования при постоянной рациональной частоте импульсов. Частота импульсов должна выбираться из условия минимума дополнительных магнитных потерь в магнитной системе испытываемой тяговой электромашин [190, 207].

Выводы. На основании результатов анализа возможных технических решений и параметров источников и преобразователей мощности (см. Приложение Д), проведенного с целью определения рациональности использования данных устройств в системах взаимного нагружения тяговых электрических машин, можно сделать следующие выводы:

- наиболее рациональным вариантом источника напряжения в системе взаимного нагружения является трёхфазный управляемый выпрямитель;
- наиболее рациональным вариантом источника момента в системе взаимного нагружения является трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым или фазным ротором, соединённый с испытуемыми тяговыми электромашинами с помощью механической коробки передач;
- в качестве преобразователя момента в системах взаимного нагружения тяговых электродвигателей целесообразно использовать механический редуктор, а для испытания вспомогательных электромашин в системе взаимного нагружения может быть использован механический вариатор;
- использование повышающего конвертора напряжения требует использования полупроводниковых ключей со значительно меньшим значением среднего тока в сравнении с использованием понижающего конвертора;
- разницу магнитных потоков испытуемых электромашин в системах взаимного нагружения наиболее рационально обеспечивать путем шунтирования обмотки возбуждения одной из электромашин полупроводниковым ключом с импульсным регулированием;

6.2 Выбор рациональных схем взаимного нагружения электрических машин тягового подвижного состава

Полный ряд альтернатив схемных решений системы взаимного нагружения тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока последовательного возбуждения включает 20 вариантов [69, 159]. Обозначим его:

$$Y \in \{AF, AG, AH-a, AH-б, AI, AJ, BF, BG, BH-a, BH-б, BI, BJ, CF-a, CF-б, CG-a, CG-б, DF, DG, EF, EG\}.$$

Задача выбора рациональных вариантов схемы взаимного нагружения тяговых электродвигателей и вспомогательных электромашин тягового подвижного состава может быть разбито на следующие независимые подзадачи:

- определение рационального количества источников мощности;
- выбор рационального типа источника мощности;
- выбор рационального типа преобразователя мощности;
- выбор рационального способа регулирования возбуждения испытуемых электромашин.

Рассмотрим каждую из поставленных подзадач отдельно. В качестве критериев выбора рационального варианта в каждой из подзадач будем рассматривать:

- минимум приведенной суммарной мощности источников и преобразователей системы взаимного нагружения;
- максимум энергетической эффективности процесса испытания;
- минимум расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей и обмоток возбуждения испытываемых тяговых электромашин;
- возможность выполнения всех пунктов программы приёмосдаточных испытаний, предусмотренных ГОСТ 2582-81 [1].

Суммарная мощность источников питания системы взаимного нагружения определяет себестоимость всего стенда для проведения приёмосдаточных испытаний тяговых электромашин, капитальные затраты на создание новых и модернизацию существующих испытательных станций, а следовательно, и сроки окупаемости такой модернизации. Кроме того, большой запас мощности источников испытательной системы обуславливает длительную работу преобразователей (статических или электромашинных) в режимах, существенно отличных от номинальных. Эти режимы характеризуются заниженной мощностью и, соответственно, более низкими к. п. д. преобразователей. Таким образом, снижение запаса мощности источников питания системы взаимного нагружения тяговых электрических машин обеспечивает снижение себестоимости испытательных станций и срока окупаемости их модернизации, а также способствует повышению энергетической эффективности приёмосдаточных испытаний.

Энергетическая эффективность процесса приёмосдаточных испытаний тяговых электромашин определяет общий расход электроэнергии и текущие расходы на проведение испытаний, общие материальные затраты на ремонт тяговых электромашин и срок окупаемости модернизации существующих испытательных станций с низкой энергетической эффективностью. Повышение энергетической эффективности приёмосдаточных испытаний снижает общие расходы электроэнергии на испытания, материальные затраты на ремонт тяговых электромашин и срок окупаемости модернизации существующих испытательных станций.

Расхождение тепловых нагрузок обмоток тяговых электрических машин, испытываемых на нагрев на стенде взаимной нагрузки, определяет качество проведения приёмосдаточных испытаний [97]. Существенная доля отказов тяговых электрических машин подвижного состава магистрального и промышленного транспорта приходится на пробой изоляции, межвитковые замыкания обмоток якорей, компенсационных обмоток, обмоток главных и добавочных полюсов [171-180]. Одним из важных условий обеспечения качества испытаний на нагрев является равенство тепловых нагрузок лимитирующих обмоток пары взаимно нагруженных испытываемых тяговых электромашин [104]. При расхождении тепловых нагрузок обмоток пары испытываемых электромашин становится невозможным опытное определение температуры перегрева обмоток недогруженной тяговой электромашин в

часовом (или другом эквивалентном) режиме. Уменьшение степени расхождения тепловых нагрузок обмоток пары испытуемых тяговых электромашин повышает качество их испытаний на нагрев.

Возможность выполнения всех пунктов программы приёмо-сдаточных испытаний тяговых электромашин на стенде взаимной нагрузки является обязательным, так как диктуется требованиями ГОСТ 2582-81 [1] и правилами ремонта электрических машин тягового подвижного состава [2]. Невыполнение любого пункта программы приёмо-сдаточных испытаний недопустимо, так как снижает качество технического контроля продукции.

В качестве альтернатив при решении задач выбора рациональных схем будем рассматривать все 20 возможных вариантов системы взаимного нагружения, которые были получены выше [197].

Анализ рациональности той или иной альтернативы будем проводить при условии определённости режима нагрузки тяговых электромашин. То есть будем считать заданными значения напряжения на коллекторе, тока нагрузки и коэффициента ослабления возбуждения.

6.2.1 Определение рационального количества источников мощности

В полном ряде альтернатив схемного решения системы взаимного нагружения, состоящем из 20 вариантов (множество Y), имеются схемы или с одним, или с двумя источниками мощности. К вариантам с одним источником мощности относятся: $\{AH, AI, AJ, BH, BI, BJ, CF, CG, DF, DG, EF, EG\}$. К вариантам с двумя источниками мощности относятся: $\{AF, AG, BF$ и $BG\}$.

Проведем сравнение данных подмножеств альтернатив по критерию минимума суммарной приведенной мощности источников питания испытательного стенда.

При использовании одного источника питания максимальная приведенная мощность источника определяется в виде

или

где P_{\max} и $P_{\text{хол}}$ – максимальные приведенные электрические потери и потери холостого хода соответственно;

$P_{\text{к.п.д.}}$ – к. п. д. электрической машины, соответствующий режиму испытания.

Значения P_{\max} , $P_{\text{хол}}$ и $P_{\text{к.п.д.}}$ в данных формулах соответствуют самому нагруженному режиму испытания, при котором суммарные потери мощности максимальны, а к. п. д. – минимален.

При использовании двух источников питания их максимальная суммарная приведенная мощность определяется в виде

или

где δ – максимальное допустимое относительное отклонение частоты вращения якоря.

Рациональность выбора количества источников по критерию минимума приведенной мощности может быть оценена по значению коэффициента запаса мощности $K_{\text{ЗП}}$, представляющему собой отношение максимальной суммарной приведенной мощности к сумме приведенных потерь. Для вариантов с одним источником

Для вариантов с двумя источниками мощности

или

Через к. п. д. тяговой электромашин этот же коэффициент может быть выражен в виде

Зависимость $K_{\text{ЗП}}$ для δ численно приведена в табл. 6.1, а соответствующая ей характеристика графически показана на рис. 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты расчёта зависимости

| | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,9 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,96 |
| | 1,54 | 1,61 | 1,69 | 1,8 | 1,94 | 2,14 | 2,44 |

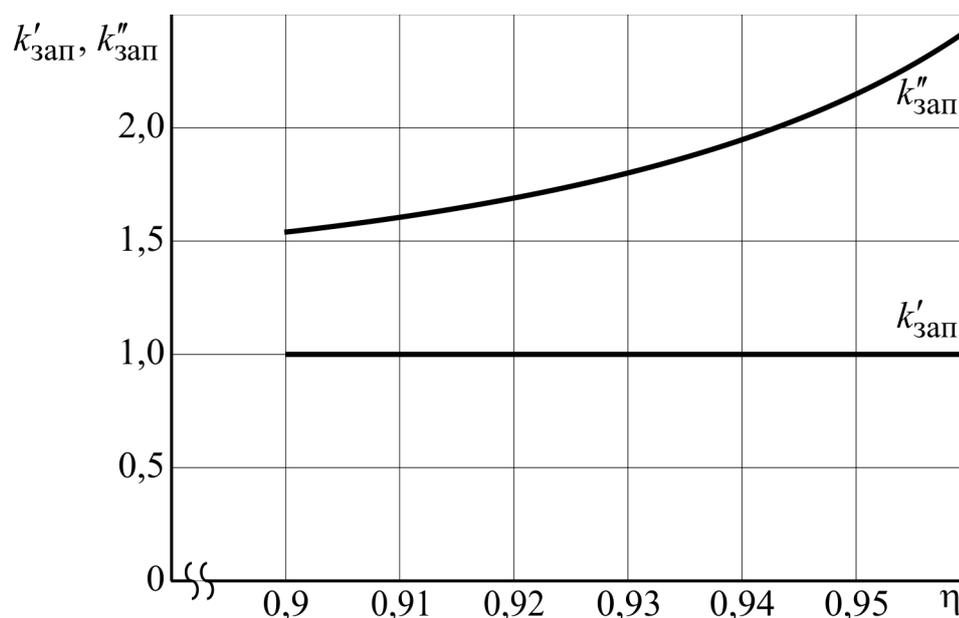


Рисунок 6.1 – Зависимости коэффициентов запаса суммарной мощности источников испытательного стенда от к. п. д. испытуемых электромашин

Из данных табл. 6.1 и кривых на рис. 6.1 видно, что для реального диапазона изменения к. п. д. тяговых электромашин (0,9÷0,95) суммарная мощность двух источников испытательного стенда (система с двумя источниками) превышает необходимую мощность одного источника (для вариантов с одним источником) в 1,5÷2,2 раза. Наибольший коэффициент запаса, равный 2,2, соответствует тяговым электродвигателям большой мощности (до 800 кВт), для которых задача ограничения суммарной мощности источников испытательного стенда стоит наиболее остро.

Результаты проведенного анализа показывают, что с точки зрения минимума суммарной приведенной мощности источников питания системы взаимного нагружения наиболее рациональными являются схемы с использованием одного источника питания.

Рациональные варианты по результату решения данной подзадачи составляют подмножество:

$$X_1 = \{AH, AI, AJ, BH, BI, BJ, CF, CG, DF, DG, EF, EG\}.$$

Данное решение будет справедливо как для тяговых двигателей, так и для вспомогательных электромашин тягового подвижного состава.

6.2.2 Выбор типа источника мощности

Из множества всех альтернатив Y можно выделить системы, в которых используются источники электрической и механической мощности:

- источник напряжения;
- источник тока;
- источник момента;
- источник угловой скорости;

– два разнотипных источника.

Множество альтернатив с источником напряжения: $\{AH, AI, AJ\}$. Множество альтернатив с источником тока: $\{CG, DG, EG\}$. Множество альтернатив с источником момента: $\{CF, DF, EF\}$. Множество альтернатив с источником угловой скорости: $\{BF, BH, BJ\}$. Множество альтернатив с одновременным использованием разнотипных источников: $\{AF, AG, BF, BG\}$.

Проведем сравнение выделенных подмножеств альтернатив с точек зрения максимума энергетической эффективности, минимума расхождения тепловых нагрузок обмоток испытуемых электромашин и простоты технической реализации схемных решений.

Наибольшую сложность технической реализации имеют альтернативы, в схемных решениях которых используется источник угловой скорости. Данный вид источника механической мощности практически не используется в современной промышленности и не производится. В связи с чем варианты BF, BH, BJ и BG могут быть сразу признаны нерациональными и в дальнейшем анализе могут не рассматриваться.

Рассмотрим рациональность оставшихся альтернатив с точки зрения минимума расхождения тепловых нагрузок обмоток испытуемых электромашин и максимума энергетической эффективности испытания.

Использование источника напряжения предполагает прямую компенсацию электрических потерь и равенство тепловых нагрузок обмоток якорей. Напряжение на выходе источника определяется суммарным падением напряжением в основном силовом контуре и потому относительно невысокое. Техническая реализация схемных решений с источником напряжения относительно простая.

Использование параллельного источника тока предполагает косвенную компенсацию потерь, как холостого хода, так и электрических. Поэтому энергетическая эффективность испытаний с источником тока ниже, чем с источником напряжения. Подпитка обмотки якоря испытуемого двигателя источником тока обуславливает расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых тяговых электромашин [97, 123, 124]. Высокое напряжение на выходе параллельного источника обуславливает относительную сложность технической реализации соответствующих схемных решений систем взаимного нагружения.

Наиболее рациональными с точки зрения минимума расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых электромашин и простоты технической реализации являются альтернативы с источниками напряжения.

Применение источника механического момента обеспечивает прямую компенсацию потерь холостого хода при относительной простоте технической реализации схемного решения в случае отсутствия необходимости в широком регулировании частоты вращения испытуемых электромашин. Наибольшая энергетическая эффективность применения механического источника момента при относительной простоте технической реализации схемного решения может быть получена при использовании

нерегулируемого асинхронного привода, подключенного непосредственно к сети.

Окончательным решением подзадачи выбора рационального типа источника мощности будет подмножество вариантов с использованием либо источника напряжения, либо источника механического момента:

$$X_2 = \{AF, AH, AI, AJ, CF, DF, EF\}.$$

6.2.3 Выбор типа преобразователя мощности

Множество Y полного ряда из 20 альтернатив по типу используемого преобразователя мощности можно разбить на подмножества, включающие варианты систем взаимной нагрузки:

- с использованием конвертора напряжения (тока);
- с использованием конвертора механического момента (угловой скорости);
- без использования преобразователей мощности.

Системы с использованием конвертора напряжения представляют подмножество: $\{AJ, BJ, EF, EG\}$. Системы с использованием конвертора механического момента: $\{AI, BI, DF, DG\}$. Системы без использования преобразователей мощности: $\{AF, AG, AH, BF, BG, BH, CF, CG\}$.

Проведем сравнение выделенных подмножеств альтернатив по критерию минимума расхождения тепловых нагрузок обмоток якорей испытуемых тяговых электромашин с учётом простоты их технической реализации.

В системах взаимного нагружения с конверторами напряжения за счёт преобразования потока электрической энергии от испытуемого генератора к испытуемому двигателю создаётся небалансная электромагнитная мощность, используемая для компенсации либо электрических потерь, либо потерь холостого хода [69].

Конверторы с понижением напряжения () обеспечивают создание положительного небалансного электромагнитного момента за счёт положительной разницы токов якорей испытуемого двигателя и генератора (). Отношение токов якорей испытуемых электромашин

Отношение тепловых факторов обмоток якорей [97]

С другой стороны отношение тепловых факторов обмоток испытуемых электромашин при условии совпадения их магнитных

характеристик

где ΣP_0 – суммарные приведенные потери холостого хода.

В случае расхождения магнитных характеристик испытываемых электромашин

где $\Delta f_{\text{доп}}$ – максимально допустимое положительное относительное отклонение частоты вращения от типового значения (0,03).

Суммарные приведенные потери холостого хода ΣP_0 в двух испытываемых электромашинах могут быть определены в упрощённом виде

где P_0 – приведенные потери холостого хода в одной электромашине.

В табл. 6.2 приведены результаты расчёта зависимости

ΣP_0 для реального диапазона изменения Δf и максимального допустимого относительного отклонения частоты вращения $\Delta f_{\text{доп}}$.

Таблица 6.2 – Результаты расчёта зависимости

| | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 |
|--|------|------|------|------|------|
| | 1,23 | 1,29 | 1,35 | 1,42 | 1,49 |

Графически зависимость

приведена на рис. 6.2.

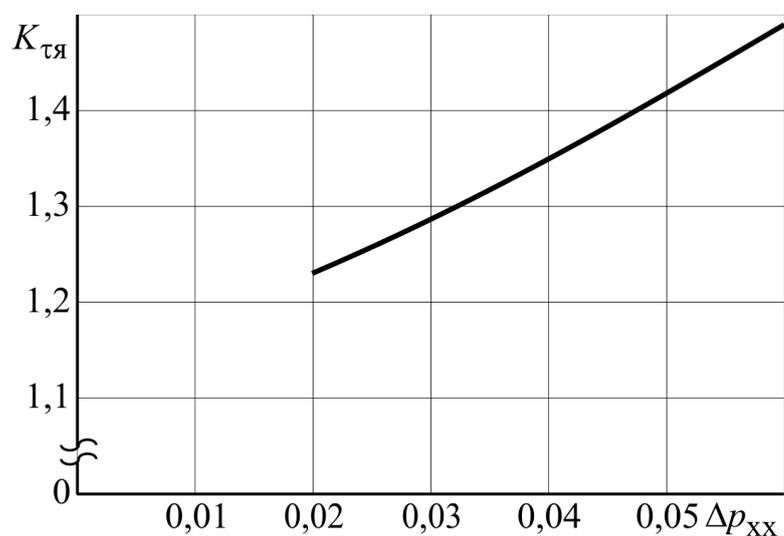


Рисунок 6.2 – Зависимость $K_{тя}$ при Δp_{xx}

Из данных табл. 6.2 и графика на рис. 6.2 видно, что тепловая нагрузка обмотки якоря испытуемого двигателя может быть почти на 50 % выше тепловой нагрузки обмотки якоря испытуемого генератора.

Конверторы с повышением напряжения () обеспечивают создание небалансной э. д. с. [69]. При этом возникает положительная разница токов испытуемого генератора и двигателя ().

Отношение тепловых факторов обмоток испытуемых электромашин при совпадении магнитных характеристик для условия

где $\Sigma P_{\text{прив}}^{\text{э}}$ – суммарные приведенные электрические потери.

В случае расхождения магнитных характеристик испытуемых электромашин

Суммарные приведенные электрические потери в упрощённом виде могут быть представлены как

где $P_{\text{прив}}^{\text{э}}$ – приведенные электрические потери в одной электромашине.

В табл. 6.3 приведены результаты расчёта зависимостей $K_{тя}$ для реального диапазона изменения Δp_{xx} и максимального относительного отклонения частоты вращения $\Delta p_{xx}^{\text{max}}$.

Таблица 6.3 – Результаты расчёта зависимости

| | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|
| | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 |
| | 0,81 | 0,77 | 0,74 | 0,71 | 0,67 |

Графически зависимость приведена на рис. 6.3. Из данных табл. 6.3 и графика на рис. 6.3 видно, что тепловая нагрузка обмотки якоря испытуемого двигателя при реальных значениях и может быть на 30 % меньше тепловой нагрузки обмотки якоря испытуемого генератора.

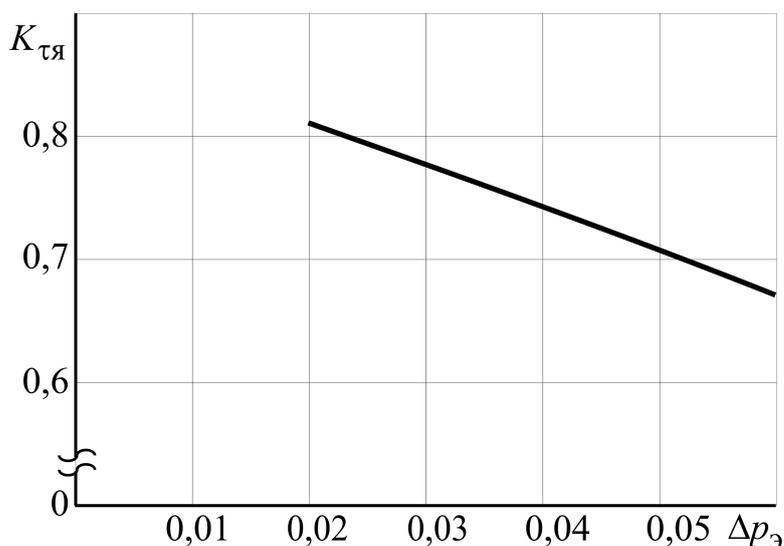


Рисунок 6.3 – Зависимость при

Существенным недостатком применения конвертора напряжения является его высокая приведенная мощность. Конвертор должен быть рассчитан на максимальную мощность одной испытуемой электромашин. Этот вид электрического преобразователя в системе взаимного нагружения имеет наибольшую мощность.

В системах взаимного нагружения с конвертором механического момента за счет преобразования потока механической энергии от испытуемого двигателя к испытуемому генератору создается небалансная электромагнитная мощность, которая, как и в системах с конвертором напряжения, компенсирует либо электрические потери, либо потери холостого хода.

При использовании конвертора момента (угловой скорости) разность тепловых нагрузок обмоток испытуемых электромашин может быть обусловлена лишь разностью потерь холостого хода за счет расхождения значений угловых скоростей якорей испытуемых электромашин.

Механические потери на тепловую нагрузку обмотки якоря практически не влияют, а коэффициент влияния магнитных потерь для тяговых электромашин не превышает значения 0,25 [80, 122, 207].

Следовательно, можно сделать вывод, что использование конвертора момента (угловой скорости) существенного влияния на расхождение тепловых нагрузок испытуемых электромашин не оказывает.

В вариантах схемных решений системы взаимного нагружения без конверторов (напряжения или момента) расхождение тепловых нагрузок обмоток якорей отсутствует. Исключения составляют варианты с параллельным источником тока, которые были рассмотрены выше.

Если преобразователь момента выполнен нерегулируемым, в виде механического редуктора, то, несмотря на то, что его мощность должна быть рассчитана на максимальную механическую мощность на валу испытуемой тяговой электромашин, конструктивное исполнение такого преобразователя не представляет существенных трудностей, а его себестоимость относительно невысока.

Результатом решения данной подзадачи является подмножество рациональных альтернатив:

$$X_3 = \{AF, AG, AH, BF, BG, BH, CF, CG, AI, BI, DF, DG\}.$$

6.2.4 Выбор способа регулирования возбуждения тяговых электрических машин

По способу регулирования возбуждения испытуемых тяговых электромашин множество Y из 20 альтернатив разбивается на подмножества, включающие в себя варианты систем взаимного нагружения:

- с подпиткой обмотки возбуждения;
- с отпиткой обмотки возбуждения;
- без регулирования возбуждения.

Подмножество альтернатив с подпиткой обмоток возбуждения: $\{AH-б, BH-б, CF-б, CG-б\}$. Подмножество альтернатив с отпиткой обмоток возбуждения: $\{AH-а, BH-а, CF-а, CG-а\}$. Подмножество альтернатив без регулирования возбуждения испытуемых электромашин: $\{AF, AG, AI, AJ, BF, BG, BI, BJ, DF, DG, EF, EG\}$.

Проведем сравнение выделенных подмножеств по критерию минимума расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения испытуемых тяговых электромашин и возможности выполнения всей программы их приемо-сдаточных испытаний.

Предварительно рассмотрим ограничения на возможность использования регулирования возбуждения. ГОСТом 2582-81[1] при выполнении приемо-сдаточных испытаний тяговых электромашин предусмотрена проверка частоты вращения и реверсирования, которая может выполняться только в двигательном режиме и только при номинальном возбуждении тяговой электромашин. Следовательно, варианты схемных решений с использованием регулирования возбуждения испытуемого двигателя являются неприемлемыми по причине невозможности проверки частоты вращения и реверсирования.

Степень расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения пары взаимно нагруженных тяговых электромашин может быть оценена с помощью коэффициента отношения их тепловых нагрузок [97].

Для случая отпитки

где β – коэффициент отношения токов при отпитке.

Для случая подпитки

где β – коэффициент отношения токов при подпитке.

В подразделе 5.6 диссертации проведен подробный анализ влияния способа регулирования возбуждения испытуемых электромашин на расхождение тепловых нагрузок их обмоток возбуждения. Из результатов расчетов, проведенных в 5.6, видно, что подпитка даёт расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения в несколько раз выше, чем отпитка.

Для сильно насыщенных тяговых электромашин [80] при подпитке требуются нереально высокие значения коэффициента отношения токов

, которое даёт расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения более чем в два раза.

Анализ графиков зависимостей β и β , полученных для случая максимального расхождения магнитных характеристик испытуемых электромашин, для трёх значений коэффициента магнитного насыщения, показывает, что использование подпитки обмоток возбуждения испытуемых электромашин нецелесообразно.

Существенным недостатком способа подпитки обмотки возбуждения является необходимость в дополнительном источнике электрической мощности с низкими показателями энергетической эффективности [181, 182]. Таким образом, рациональными будут технические решения только с отпиткой обмоток возбуждения или без регулирования возбуждения.

С учетом ограничения в виде недопустимости регулирования возбуждения испытуемого двигателя получим решение данной подзадачи в виде подмножества рациональных альтернатив:

$$X_4 = \{AF, AG, AH-a, AI, AJ, BF, BG, BH-a, BI, BJ, DF, DG, EF, EG\}.$$

6.2.5 Определение ряда рациональных альтернатив

Множество рациональных альтернатив схемы взаимного нагружения может быть определено из условия обязательного попадания искомой рациональной альтернативы в каждое из рациональных подмножеств X_1, X_2, X_3, X_4 , которые являются решениями четырёх предыдущих подзадач.

Таким образом, искомое множество рациональных альтернатив может быть найдено в виде:

Для удобства поиска данного множества, а также с целью наглядности решение задачи выбора рационального множества приведено в виде табл. 6.4.

Таблица 6.4 – Определение множества рациональных альтернатив

| Обозначение альтернативы | Результаты сравнения подмножеств | | | | Рациональные альтернативы |
|--------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|
| | подзадача 1 | подзадача 2 | подзадача 3 | подзадача 4 | |
| <i>AF</i> | – | + | + | + | |
| <i>AG</i> | – | – | + | + | |
| <i>AH-a</i> | + | + | + | + | <i>AH-a</i> |
| <i>AH-б</i> | + | + | + | – | |
| <i>AI</i> | + | + | + | + | <i>AI</i> |
| <i>AJ</i> | + | + | – | + | |
| <i>BF</i> | – | – | + | + | |
| <i>BG</i> | – | – | + | + | |
| <i>BH-a</i> | + | – | + | + | |

Продолжение таблицы 6.4

| Обозначение альтернативы | Результаты сравнения подмножеств | | | | Рациональные альтернативы |
|--------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|
| | подзадача 1 | подзадача 2 | подзадача 3 | подзадача 4 | |
| <i>BH-б</i> | + | – | + | – | |
| <i>BI</i> | + | – | + | + | |
| <i>BJ</i> | + | – | – | + | |

| | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|-----------|
| <i>CF-a</i> | + | + | + | – | |
| <i>CF-б</i> | + | + | + | – | |
| <i>CG-a</i> | + | – | + | – | |
| <i>CG-б</i> | + | – | + | – | |
| <i>DF</i> | + | + | + | + | <i>DF</i> |
| <i>DG</i> | + | – | + | + | |
| <i>EF</i> | + | + | – | + | |
| <i>EG</i> | + | – | – | + | |

Попадание каждой альтернативы из общего множества Y в рациональное подмножество внутри каждой из подзадач 1 – 4 отмечено в таблице знаком «+». Если альтернатива не попала в рациональное подмножество при сравнении внутри подзадачи, она помечена знаком «–». Рациональными принимаются только те альтернативы, которые попали в каждое рациональное подмножество при сравнении внутри каждой подзадачи.

Окончательным решением является рациональное множество из трёх альтернатив

$$X = \{AH-a, AI, DF\}.$$

6.3 Анализ схемных решений рациональных вариантов

Методика определения рациональных альтернатив, которая использовалась выше, не учитывает особенностей конструкций и типовых параметров тяговых электромашин, которые могут влиять на принципиальную возможность использования того или иного варианта системы взаимного нагружения для проведения испытаний конкретного типа тяговых электромашин.

Проведем анализ каждого из рациональных вариантов на предмет возможности его технической реализации для отдельных кластеров типового ряда тяговых электромашин [197, 201 – 206].

Вариант *AH-a*. Схема данного варианта приведена на рис. 6.4.

Схема включает источник напряжения ИН, испытываемые тяговые электромашинны M и G и регулятор ослабления поля РОП.

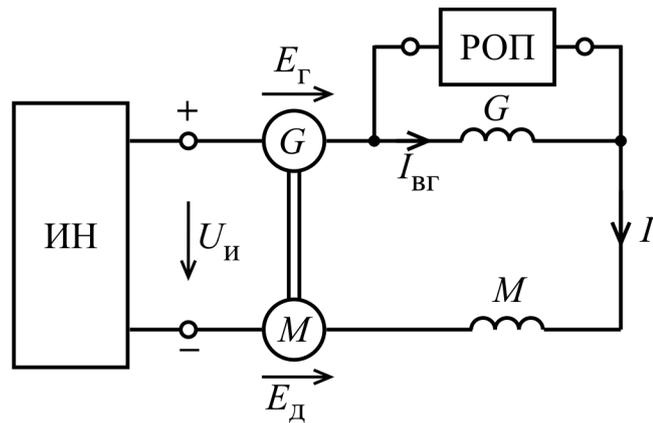


Рисунок 6.4 – Рациональный вариант АН-а

Преимуществами данной схемы являются:

- наличие только одного источника мощности;
- отсутствие источников высокого напряжения;
- одинаковая тепловая нагрузка обмоток якорей.

К недостаткам данной схемы относятся:

- расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения;
- необходимость в системе автоматического регулирования.

Система автоматического управления режимом взаимного нагружения должна быть двухконтурной [65]. Первый контур должен обеспечивать стабилизацию тока нагрузки, а второй контур – стабилизацию частоты вращения. Структурная схема системы автоматического управления [185] представлена на рис. 6.5.

Первый контур автоматического регулирования включает в себя: датчик тока ЗТ, датчик тока ДТ, звено сравнения токов ЗС1, астатический элемент АЭ1, регулятор напряжения РН, обмотки двигателя и генератора ОДГ.

Второй контур автоматического регулирования включает в себя: датчик угловой скорости ЗУС, датчик угловой скорости ДУС, звено сравнения ЗС2, астатический элемент АЭ2, регулятор ослабления поля РОП, обмотку возбуждения генератора ОВГ.

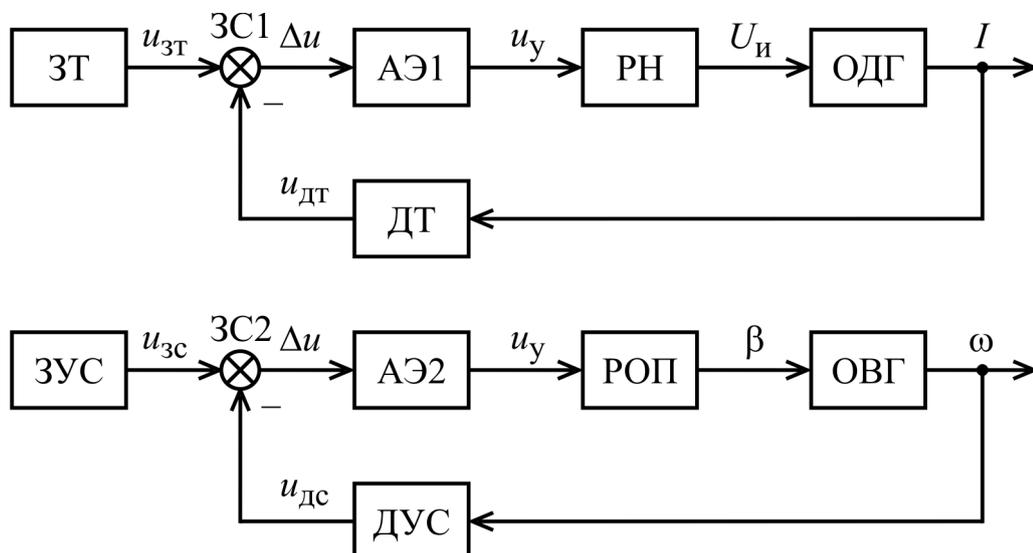


Рисунок 6.5 – Функциональная схема системы автоматического регулирования для варианта АН-а

Данный вариант системы взаимного нагружения (АН-а) является рациональным для всех типов электрических машин тягового подвижного состава, как для тяговых электрических двигателей, так и для вспомогательных электрических машин.

Вариант АІ. Главной особенностью данного варианта является наличие механического конвертора. Регулирование режима взаимного нагружения в данной схеме осуществляется как за счёт изменения напряжения источника, так и передаточного отношения механического конвертора. Для этого последний должен быть выполнен регулируемым, то есть – в виде вариатора. Схема такой системы взаимного нагружения приведена на рис. 6.6.

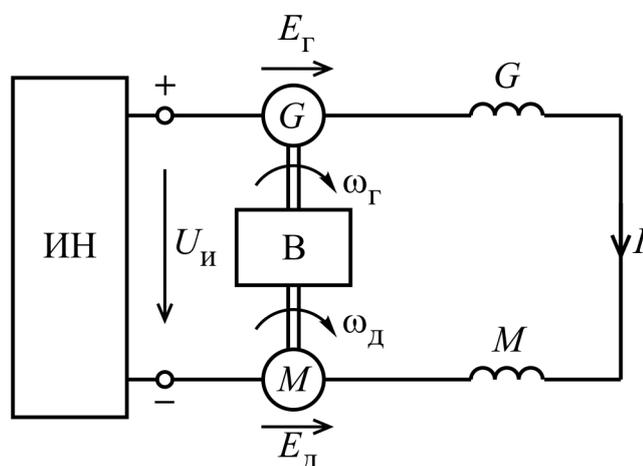


Рисунок 6.6 – Рациональный вариант АІ

Схема включает в себя источник напряжения ИН, испытываемые тяговые электромашин M и G и механический вариатор B .

Преимуществами данной схемы являются:

- наличие только одного источника мощности;
- отсутствие источника высокого напряжения;
- одинаковая тепловая нагруженность обмоток якорей и обмоток возбуждения пары испытываемых тяговых электромашин.

К недостаткам схемы относятся:

- относительная сложность регулирования передаточного отношения вариатора;
- необходимость в системе автоматического управления.

Выполнение вариаторов с большой мощностью, соответствующей реальной мощности тяговых электродвигателей подвижного состава магистрального и промышленного транспорта, весьма затруднительно, в связи с чем, данная схема является рациональной только для вспомогательных электрических машин.

Функциональная схема системы автоматического регулирования для варианта *AI* приведена на рис. 6.7. Первый контур системы аналогичен контуру стабилизации тока по варианту *АН*-а. Второй контур отличается от варианта *АН*-а наличием регулятора передаточного отношения РПО (вместо регулятора ослабления поля РОП), который соединен с валами двигателя и генератора ВДГ.

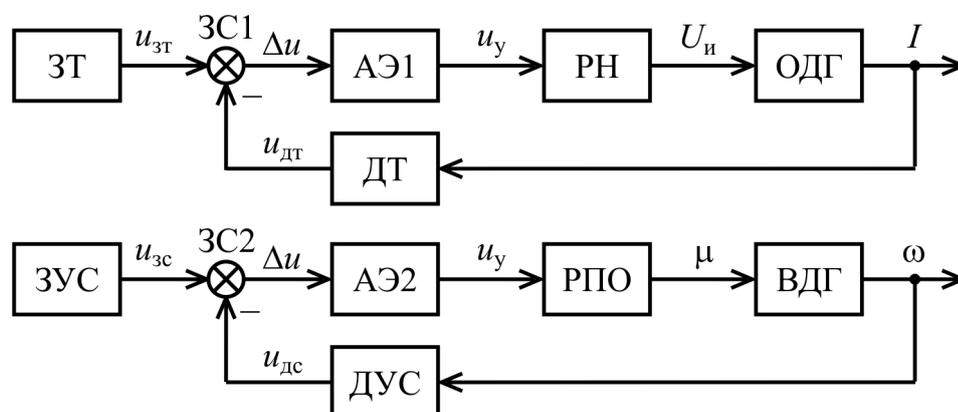


Рисунок 6.7 – Функциональная схема системы автоматического регулирования для варианта *AI*

Вариант *DF*. Главной особенностью данной схемы, как и схемы по варианту *AI*, является наличие преобразователя механического момента, определяющее его основные недостатки, связанные с трудностью применения для тяговых электромашин большой и средней мощности. Решение данной проблемы может быть получено за счет создания гибридной схемы, включающей в себя элементы варианта *АН*-а. Такая схема приведена на рис. 6.8.

Схема включает в себя дополнительный приводной двигатель M_d , испытываемые электромашины M и G , постоянный редуктор P , регулятор поля РОП. В качестве источника момента в данной схеме может быть использован либо частотно-управляемый асинхронный привод, либо нерегулируемый асинхронный привод. В последнем случае для регулирования частоты вращения, которое может быть ступенчатым, необходимо использовать механическую коробку передач.

Данная схема является наиболее рациональной для тяговых электрических двигателей электропоездов и тепловозов.

6.4 Определение рациональных режимов нагружения тяговых электромашин

Режим нагружения тяговых электрических машин при их испытании характеризуется такими параметрами как:

- напряжение на коллекторе;
- ток нагрузки;
- коэффициент ослабления поля;
- расход охлаждающего воздуха.

Рассмотрим каждый из этих параметров с точки зрения возможности их влияния на рациональность режима нагружения тяговых электромашин при их испытаниях на нагрев. Данный вид испытаний является наиболее энергоемкой частью всей программы приемо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока.

В качестве критериев рациональности будем рассматривать:

- минимум суммарной приведенной мощности источников испытательного стенда;
- максимум энергетической эффективности процесса испытания;
- максимум качества испытаний;

Напряжение на коллекторе. По требованиям ГОСТ 2582-81 [1] испытания на нагрев тяговых электродвигателей необходимо проводить при номинальном напряжении. При этом частота вращения испытуемых электромашин определяется током нагрузки и их электромеханическими характеристиками. При отклонении магнитных характеристик испытуемых электромашин от типовых зависимостей их частоты вращения при номинальном напряжении также будут отличаться от типового значения, соответствующего номинальному (часовому) току.

Результаты исследований, проведенных в диссертации, показывают, что изменения испытательного напряжения в узких пределах ($\pm 5\%$) не оказывают заметного влияния на характер протекания тепловых процессов в обмотках испытуемых электромашин [122]. Следовательно, при проведении испытания на нагрев нет необходимости в жесткой стабилизации испытательного напряжения на уровне номинального значения. И более рациональным, с точки зрения управляемости системы взаимного нагружения, будет стабилизация частоты вращения якорей испытуемых электромашин на значении, соответствующем току нагрузки по типовой электромеханической характеристике тяговой электромашин.

Обеспечение величины напряжения на коллекторе, близкого к номинальному значению, при проведении испытания на нагрев является условием качественной проверки потенциальных условий на коллекторе и

устойчивости против дугообразования. Таким образом, испытательное напряжение не может рассматриваться как фактор, варьированием которого можно влиять на показатели рациональности режима испытания. По сути, требования к напряжению на коллекторе испытываемой электромашинны являются ограничением в задаче выбора рационального режима нагружения.

Коэффициент ослабления поля. Как по требованиям ГОСТ 2582-81 [1], так и с точки зрения обеспечения качества испытаний на нагрев коэффициент ослабления поля при проведении данного испытания должен быть равным номинальному значению. При выполнении проверки коммутации коэффициент ослабления поля должен быть принят минимальным, что обусловлено требованиями к данной проверке [1, 2]. Требование к значению коэффициента ослабления поля, как и требования к испытательному напряжению, является ограничением в задаче выбора рационального режима нагружения.

Расход охлаждающего воздуха. Как ГОСТ 2582-81 [1], так и правила ремонта тяговых электромашин [2] допускают при согласовании с заказчиком проведение испытаний на нагрев при расходе охлаждающего воздуха, меньшем номинального, в том числе, и без вентиляции. Эквивалентные значения тока нагрузки испытываемых тяговых электромашин, соответствующие режиму испытания на нагрев без вентиляции, меньше и часового, и длительного токов.

Экономический эффект от внедрения такого метода испытания на нагрев объясняется, как правило, экономией электроэнергии, расходуемой на вентиляцию и отсутствием необходимости наличия вентиляционной системы на испытательной станции [32-38]. Следует отметить, что испытание на нагрев без вентиляции еще и существенно повышает энергетическую эффективность нагревания обмоток электромашин за счёт снижения энергии теплоотдачи [132].

Существенным недостатком испытаний на нагрев без вентиляции является отсутствие проверки эффективности охлаждения частей электромашинны, которая определяется мощностью теплоотдачи [120]. При таком методе испытания малое влияние на характер теплообменных процессов оказывают тепловые сопротивления конвективной и кондуктивной теплоотдачи, а также аэродинамическое сопротивление тяговой электромашинны. Всё это приводит к снижению качества испытаний на нагрев [167].

Ещё одним существенным недостатком испытания на нагрев без вентиляции, снижающим качество испытания, является работа испытываемых электромашин при эквивалентных токах, значительно меньших часового и длительного тока электромашинны [33]. При таких условиях нагружения снижается качество проверки устойчивости против дугообразования в течение испытания на нагрев. Несмотря на то, что целью испытаний на нагрев является определение превышения температуры частей электромашинны, большая

часть случаев браковки электромашины связана как раз с появлением кругового огня во время данного испытания.

Возможным преимуществом проведения испытания на нагрев без вентиляции могла бы быть меньшая приведенная суммарная мощность источников испытательного стенда, но ГОСТом 2582-81 [1] предусмотрена проверка коммутации, которая требует возможности установления значения тока нагрузки нагретых электромашин, равным пусковому току. Следовательно, в диапазоне изменения от нуля до пускового значения величина тока нагрузки, выбираемая для проведения испытания на нагрев, на величину суммарной приведенной мощности источников испытательного стенда не влияет.

Ток нагрузки. По требованиям ГОСТ 2582-81 ток нагрузки электромашин при испытании на нагрев должен быть принят, равным часовому значению. При этом, как уже указывалось выше, и ГОСТ 2582-81 [1] и правила ремонта тяговых электромашин [2] допускают проведение испытания при эквивалентных токах, дающих превышение температур обмоток электромашин, соответствующее длительному режиму.

Одним из критериев выбора рационального режима нагружения является максимум коэффициента энергетической эффективности процесса нагревания обмоток электромашин. Как показали результаты предварительных исследований, величина тока нагрузки существенно влияет на энергетическую эффективность испытания на нагрев и общий расход электроэнергии на испытание [132]. Проведем анализ характера влияния тока нагрузки тяговых электромашин при их испытании на нагрев на энергетическую эффективность процесса нагревания [132, 133].

$$, \quad (6.7)$$

где – эквивалентная постоянная времени нагревания;

– превышение температуры обмотки в конце испытания;

– установившееся превышение температуры;

– время испытания на нагрев;

– температурный коэффициент сопротивления.

Время проведения испытаний на нагрев определяется формулой [132]

$$. \quad (6.8)$$

Значение превышения температуры в соответствии с ГОСТ 2582-81 [1] принимается для каждой части электрической машины (якорь, полюса), равным максимально допустимому значению, соответствующему классу нагревостойкости используемой изоляции обмоток. Для большинства типов тяговых электромашин лимитирующей по нагреву является обмотка якоря [104], поэтому в дальнейшем будем рассматривать превышение температуры именно этой обмотки. При этом необходимо отметить, что выбор рационального тока нагрузки для тяговых электромашин с другими лимитирующими обмотками будет аналогичным по принципу.

Таким образом, в формуле (6.7) параметрами, определяющими критерий энергетической эффективности, являются τ_{∞} и I_{∞} . Как уже отмечалось выше, эквивалентная постоянная времени для тяговых двигателей может приниматься постоянной и независимой от тока нагрузки [104]. А установившееся превышение температуры является функцией тока нагрузки, которую можно считать известной для каждого типа тяговой электромашин [104].

Характер такой зависимости приведен на рис. 6.10. Как отмечалось выше, зависимость с допустимой степенью упрощения можно считать параболической.

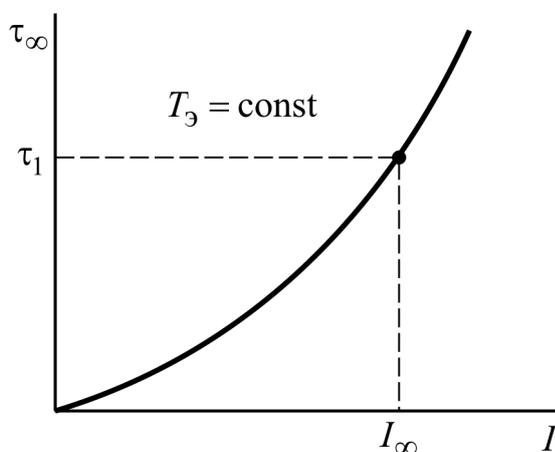


Рисунок 6.10 – Характер зависимости

Из анализа формул (6.7) и (6.8) можно сделать вывод, что при токе нагрузки I_{∞} , для которого $\tau_{\infty} \rightarrow \infty$, время испытания стремится к бесконечности, а коэффициент энергетической эффективности равен нулю.

Условие $\tau_{\infty} \rightarrow \infty$ соответствует токам нагрузки

где I_{∞} – длительный ток тягового электродвигателя (рис. 6.10). Тогда будет иметь место выражение

$$k_{\text{эфн}} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (6.10)$$

При росте тока нагрузки I и соответствующем росте превышения ΔI время t_1 уменьшается, а коэффициент $k_{\text{эфн}}$ увеличивается.

При стремлении значений I и ΔI к бесконечности время испытания t_1 стремится к нулю, а коэффициент энергетической эффективности $k_{\text{эфн}}$ – к единице. Прямая линия $k_{\text{эфн}} = 1$ является асимптотой для характеристики $k_{\text{эфн}}$.

Характеры зависимостей $k_{\text{эфн}}$ и t_1 графически представлены на рис. 6.11.

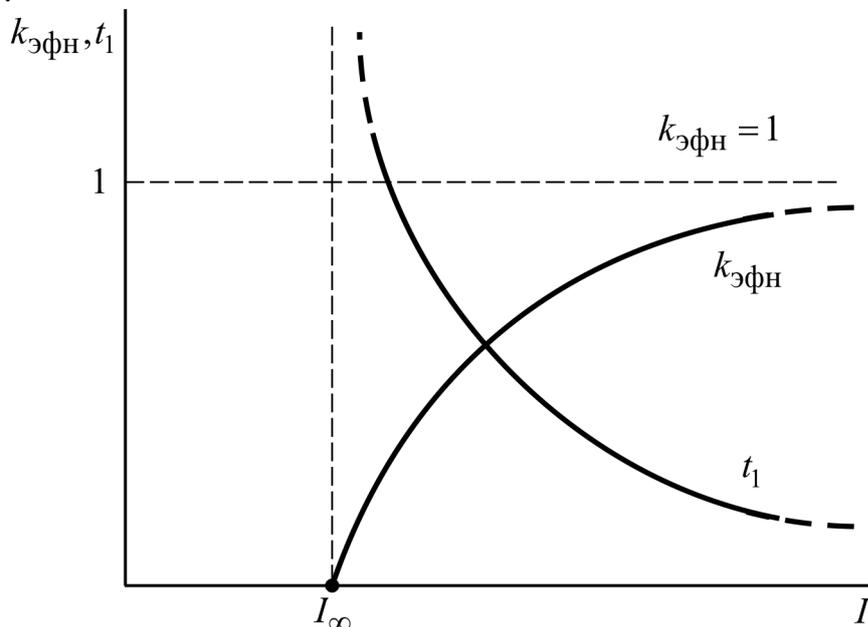


Рисунок 6.11 – Характеры зависимостей $k_{\text{эфн}}$ и t_1

Другим критерием выбора рационального режима нагружения является минимум максимальной приведенной мощности источника испытательного стенда. Этот же критерий был использован при выборе рациональных схем нагружения испытываемых тяговых электромашин.

Так как при выборе рациональных схем нагружения тяговых электромашин было принято решение о целесообразности использования только одного источника мощности, в дальнейшем анализе режима нагружения будем считать, что расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин на величину максимальной приведенной мощности источника не влияет. Тогда максимальная приведенная мощность источника испытательного стенда

$$(6.9)$$

где η – к. п. д. испытуемых тяговых электромашин.

К. п. д. испытуемых электромашин является функцией тока нагрузки и максимален для большинства тяговых электромашин в точке, соответствующей длительному режиму [80]. Качественно характеристика

приведена на рис. 6.12. На этом же рисунке качественно показан характер зависимости $\sum \bar{p}_{и}$, который соответствует выражению (6.9).

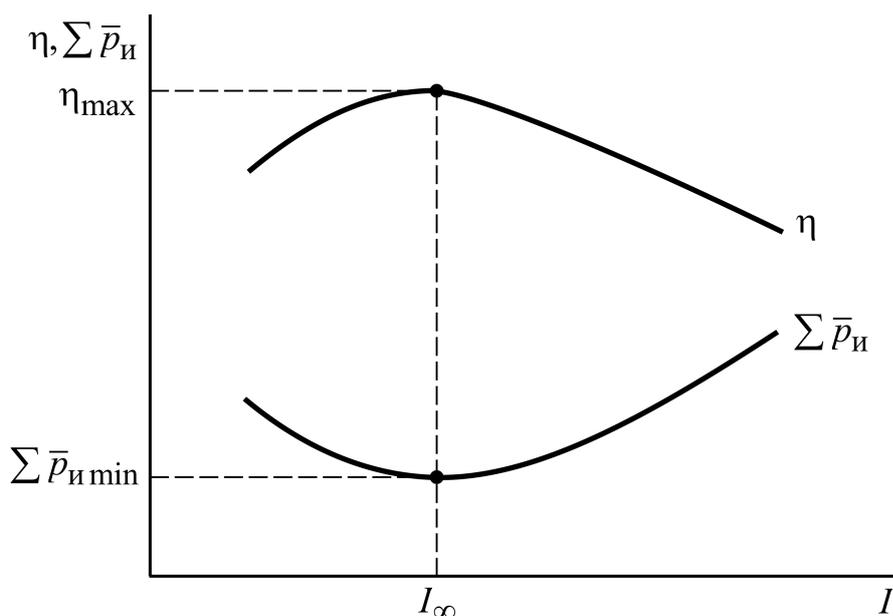


Рисунок 6.12 – Характеры зависимостей η и $\sum \bar{p}_{и}$

Из рис. 6.12 видно, что зависимость η на интервале изменения тока I монотонно возрастающая. То есть, увеличение тока нагрузки при испытании ведёт к возрастанию η .

На рис. 6.13 на одной координатной плоскости качественно показаны зависимости двух показателей рациональности режима испытания η и $\sum \bar{p}_{и}$ от тока нагрузки I . Из графиков (рис. 6.13) видно, что в диапазоне изменения тока нагрузки I улучшение одного из показателей

приводит к ухудшению другого. Уменьшение приведенной мощности источника приводит к уменьшению энергетической эффективности и наоборот.

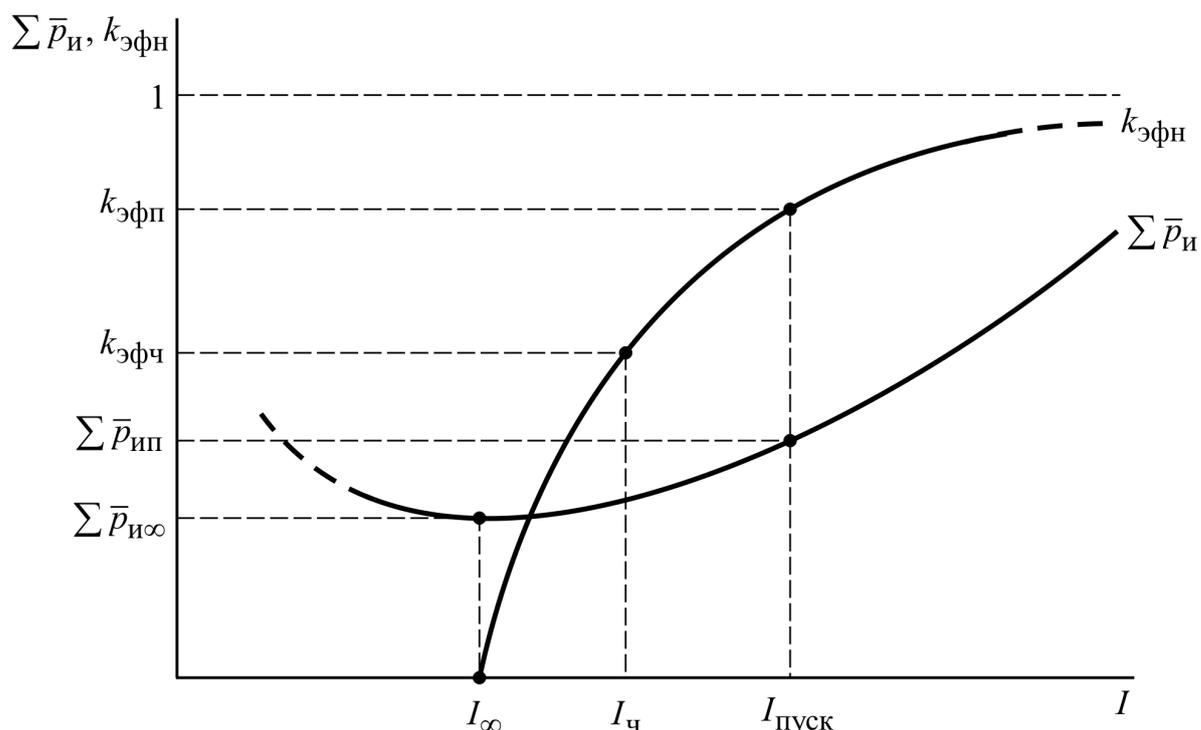


Рисунок 6.13 – Определение рационального тока нагрузки

Минимально допустимым значением приведенной мощности

источника питания системы взаимного нагружения является I_∞ . Это обусловлено необходимостью проверки коммутации при пусковом токе. Таким образом, диапазон изменения тока I , в котором следует искать рациональное его значение, может быть представлен в виде

Анализ зависимостей $\Sigma \bar{P}_И$ и $k_{эфн}$, полученных для реальных типов тяговых электродвигателей [132], показывает, что увеличение тока нагрузки от часового до пускового значения приводит к повышению $\Sigma \bar{P}_И$ приблизительно в 1,5 раза, при этом величина $k_{эфн}$ увеличивается на 20-30 % (при использовании одного источника). Время проведения испытания на нагрев при пусковом токе нагрузки уменьшается почти в три раза в сравнении с часовым режимом.

Дальнейшее повышение тока нагрузки, например, до $I_{пуск}$, приводит к незначительному росту $\Sigma \bar{P}_И$ и сильному увеличению $k_{эфн}$. С данной точки зрения наиболее рациональным будет значение тока нагрузки при испытании

на нагрев, равное пусковому току

Особенностью тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока электроподвижного состава промышленного транспорта (тяговых агрегатов) является наличие пятнадцатиминутного режима нагрузки. Ток пятнадцатиминутного режима для данных тяговых двигателей является типовым параметром. Отношение пятнадцатиминутного тока к часовому для тяговых двигателей тяговых агрегатов по величине, близкое к отношению пускового и часового токов электроподвижного состава магистрального транспорта.

При испытании на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава промышленного транспорта (тяговых агрегатов) наиболее рациональным с точки зрения максимума энергетической эффективности испытаний при минимуме суммарной приведенной мощности источников испытательного стенда может быть принят ток нагрузки, соответствующий пятнадцатиминутному режиму,

Проведение испытаний на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта при токах нагрузки, соответствующих пусковому и пятнадцатиминутному режимам соответственно, позволит снизить расходы электроэнергии на приёмо-сдаточные испытания на 20 – 30% и сократить длительность испытаний в три – четыре раза при минимуме приведенной мощности источников питания системы взаимного нагружения.

Возможность снижения расхода электроэнергии на проведение испытаний на нагрев тяговых электрических двигателей за счёт увеличения тока нагрузки подтверждена экспериментально. При проведении испытаний на нагрев тяговых двигателей РТ-51Д с пусковым током нагрузки получено снижение расхода электроэнергии на 36% в сравнении с часовым режимом нагружения (см. Приложение Е). При этом время проведения испытания было сокращено почти в четыре раза. Такое существенное снижение расхода электроэнергии на проведении испытаний на нагрев при пусковом токе нагрузки объясняется относительно большим значением отношения токов пускового и часового режимов () тягового двигателя РТ-51Д.

Метод определения суммарной полезной энергии источников питания системы взаимного нагружения, затрачиваемой на проведение приёмо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин [208], приведен в приложении «Ж» диссертации. Данный метод может быть использован при нормировании расхода электроэнергии на испытания электрических машин тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта

различных типов.

Годовой экономический эффект от практического использования предложенных в диссертационной работе рекомендаций, обусловленный снижением расхода электроэнергии на проведение приёмо-сдаточных испытаний тяговых электромашин, рассчитанный для парка магистральных электровозов Украины, составил 163 тыс. грн. (см. Приложение 3). Из них 144 тыс. грн. приходится на экономию электроэнергии на испытания тяговых электродвигателей постоянного и пульсирующего тока и 19 тыс. грн. – на испытания вспомогательных электрических машин постоянного тока.

6.5 Выводы по разделу 6

По результатам исследований, проведенных в разделе 6, можно сделать следующие выводы:

- с точки зрения минимума приведенной суммарной мощности источников, максимума энергетической эффективности, минимума расхода тепловых нагрузок обмоток якорей и обмоток возбуждения, а также с точки зрения возможности выполнения всей программы приёмо-сдаточных испытаний тяговых электромашин наиболее рациональными являются варианты системы взаимного нагружения *АН*-а, *АІ* и *DF*;

- для испытания всех типов тяговых электродвигателей и вспомогательных электромашин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта наиболее рациональным является вариант схемы взаимного нагружения – *АН*-а с последовательным источником напряжения и регулятором ослабления поля испытываемого генератора;

- для испытания вспомогательных электрических машин постоянного тока рациональным, кроме варианта *АН*-а, также может быть признан вариант схемы взаимного нагружения – *АІ* с последовательным источником напряжения и механическим вариатором, включенным между валами испытываемых электромашин;

- для испытаний тяговых электродвигателей электропоездов и тепловозов рациональным, кроме варианта *АН*-а, также может быть признан вариант схемы взаимного нагружения – *DF* с дополнительным приводным двигателем и механическим редуктором, в котором для обеспечения возможности широкого регулирования режима взаимного нагружения дополнительно используется регулятор ослабления поля испытываемого генератора;

- наиболее рациональным током нагрузки при испытании на нагрев тяговых электрических двигателей электроподвижного состава магистрального транспорта является пусковой ток;

- наиболее рациональным током нагрузки при испытании на нагрев тяговых электрических двигателей электроподвижного состава промышленного транспорта является ток пятнадцатиминутного режима;

- использование при испытании на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта соответственно часового тока и тока пятнадцатиминутного режима позволяет снизить расходы электроэнергии на испытания на 20 – 30% (в сравнении с часовым режимом) и уменьшить время испытаний на нагрев в три – четыре раза;

- результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность существенного повышения энергетической эффективности испытания на нагрев тяговых двигателей путём увеличения тока нагрузки до значения, соответствующего пусковому (или пятнадцатиминутному) режиму.

ВЫВОДЫ

В диссертации, которая является завершённой научной работой, в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получили развитие научные основы совершенствования энергоэффективных методов испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока. Полученные результаты в совокупности являются решением важной научно-технической проблемы выбора рациональных схем и режимов приёмо-сдаточных испытаний электрических машин тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта.

Основные результаты и выводы диссертационной работы следующие.

1. Схемы и режимы взаимного нагружения тяговых электрических машин, используемые в настоящее время при их приёмо-сдаточных испытаниях, являются нерациональными. Существующие станции для испытания тяговых электрических машин, состояние которых не соответствует современным требованиям организации технического контроля, нуждаются в модернизации, которая должна быть направлена на снижение суммарной мощности источников испытательной системы, повышение энергетической эффективности и качества испытаний.
2. Формализация энергетических принципов взаимного нагружения, предложенная в диссертации, позволяет рассматривать компенсацию отдельных видов потерь в системе взаимного нагружения косвенными методами как процесс обеспечения небалансной электромагнитной мощности испытуемых электромашин. Управление системами взаимного нагружения с косвенными способами компенсации потерь сводится к регулированию небалансной электромагнитной мощности испытуемых электромашин.
3. Формализация электромеханических принципов взаимного нагружения, предложенная в диссертации, позволяет рассматривать функционирование любой системы взаимного нагружения как результат обеспечения двух независимых условий: условия протекания тока якорей и условия вращения валов испытуемых электромашин. Первое условие требует компенсации падений напряжения в электрической части, а второе – компенсации моментов сопротивления в механической части системы.
4. На основе разработанных и научно обоснованных в диссертации принципов синтеза систем взаимного нагружения установлен и систематизирован полный ряд из шестнадцати основных и четырёх дополнительных вариантов электромеханической схемы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока последовательного возбуждения.
5. Проведенный в диссертации анализ показал, что суммарная мощность источников питания системы взаимного нагружения, характеризующая её себестоимость, определяется количеством этих источников, суммарными потерями мощности в испытуемых

электромашинах и допустимым расхождением их магнитных характеристик. Возможное расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин требует существенного запаса установленной мощности в системах с двумя источниками, которой не требуется в системах с одним источником.

6. Благодаря введению и формализации понятия небалансной электромагнитной мощности испытуемых тяговых электромашин в диссертации сформулированы и обоснованы общие принципы управления режимами взаимного нагружения, с помощью которых разработаны функциональные схемы систем автоматического управления для всего ряда вариантов схемы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока.

7. Анализ энергообменных и тепловых процессов, проведенный в диссертации, показал, что общая энергетическая эффективность процесса испытания тяговых электромашин на нагрев может быть представлена в виде произведения коэффициента энергетической эффективности системы взаимного нагружения и коэффициента энергетической эффективности процесса нагревания обмоток тяговых электромашин.

8. Использование критериев и метода выбора рациональных схем взаимного нагружения, разработанных в диссертации, позволило установить наиболее рациональные варианты систем взаимного нагружения для тяговых электродвигателей и вспомогательных электрических машин постоянного и пульсирующего тока тягового подвижного состава магистрального и промышленного железнодорожного транспорта.

9. Анализ выражения для определения коэффициента энергетической эффективности нагревания обмоток тяговых электромашин, полученного в диссертации, показывает, что наиболее рациональными для испытания на нагрев тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта являются часовой ток и ток пятнадцатиминутного режима соответственно. Использование данных токов нагрузки позволяет снизить расходы электроэнергии на испытания на 20 – 30% (в сравнении с часовым режимом) без снижения качества испытаний, а также уменьшает время испытаний на нагрев в три – четыре раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машины электрические вращающиеся тяговые: ГОСТ 2582-81. – [Действующий от 2003-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50 с. – (Государственный стандарт СССР).
2. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ -0204. – К.: Видавничий дім «САМ», 2012. – 286 с.
3. Нюрнберг Г. В. Испытание электрических машин / Г. В. Нюрнберг. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 336 с.
4. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
5. Астахов Н. В. Испытание электрических машин / Н. В. Астахов и др. – М.: Высш. школа, 1984. – 269 с.
6. Башта Я. Испытания электрических машин / Я. Башта и др. – Прага.: Изд. SNTL, 1960-1964. Т. 5.
7. Петров Г. Н. Электрические машины / Г. Н. Петров. – М.: Энергия, 1963. Ч. 1. – 239 с.
8. Петров Г. Н. Электрические машины / Г. Н. Петров. – М.: Энергия, 1968. Ч. 2. – 413 с.
9. Костенко М. М. Электрические машины / М. М. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1972. Ч. 1. – 544 с.
10. Костенко М. М. Электрические машины / М. М. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1973. Ч. 2. – 648 с.
11. Пиотровский Л. М. Испытания электрических машин / Л. М. Пиотровский. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 186 с.
12. Адкинс С. В. Общая теория электрических машин: пер. с англ. / С. В. Адкинс. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 272 с.
13. Котеленец Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
14. Коварский Е. М. Испытание электрических машин / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 317 с.
15. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин. / О. Д. Гольдберг – М.: Высш. шк., 2000. – 255 с.
16. Гуревич З.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин. / З. И. Гуревич. – Л.: Энергия, 1977. - С. 294.
17. Каминский М. Л. Проверка и испытание электрических машин / М. Л. Каминский. – М.: Энергия, 1977. – 102 с.
18. Белоусова Н. В. Опыт применения тестового диагностирования обмоток электрических машин / Н. В. Белоусова, В. П. Калягин, А. В. Мозгалеvский. – Л.: ЛДНТП, 1989. – 21 с.
19. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины: учебн. пособие для вузов / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
20. Исаев И. П. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов / И. П. Исаев, А. П. Матвеевичев, Л. Г. Козлов. – М.: Транспорт, 1984.

21. Сінчук О.М. До проблеми побудови комплексної, безперервної системи діагностики тягових електричних машин рухомого складу / О. М. Сінчук, Д. Л. Сушко // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту ім. В. Даля – Луганськ : СУДУ, 2003. – Вип. 9(67). – С. 25-28.
22. Сінчук О. М. До питання тактики створення системи технічного діагностування тягових електричних двигунів електрорухомого складу / О. М. Сінчук, Д. Л. Сушко // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту ім. В. Даля – Луганськ : СУДУ, 2004. – Вип. 8(78), Ч. 1. – С. 242-245.
23. Сінчук О. М. Тактика підходу до створення комплексної системи діагностування тягових електродвигунів електрорухомого складу / О. М. Сінчук, Д. Л. Сушко // Залізн. трансп. України. – 2005. – Спец. вип. 3/1. – С. 99-102.
24. Сінчук О. М. Побудова математичної теплової моделі тягового електричного двигуна постійного струму / О. М. Сінчук, Д. Л. Сушко // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту ім. В. Даля – Луганськ : СУДУ, 2005. – Вип. 8(90), Ч. 2. – С. 50-54.
25. Синчук О. Н. Методика и алгоритм диагностирования технического состояния тяговых электродвигателей постоянного тока ЭПС / О. М. Сінчук, Д. Л. Сушко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – Х.: НТУ «ХПІ», 2005 – № 45. – С. 432-436.
26. Сінчук О.М. Визначення номінального струму тягових електродвигунів постійного струму в післяремонтних експлуатаційних режимах / О. М. Сінчук, Д. Л. Сушко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2005. – № 4. – С. 81-83.
27. Артеменко А. Н. Экспериментальные исследования и определение параметров электропривода постоянного тока / А. Н. Артеменко, Д. Л. Сушко // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 2/2005 (31). – С. 33-36.
28. Сушко Д. Л. Удосконалення післяремонтних випробувань тягових двигунів рухомого складу: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук.: 05.22.07 / Сушко Дмитрій Леонидович. – Х., 2005. – 185 с.
29. Артеменко В. В. Планування випробувань тягових електричних двигунів тепловозів з урахуванням ефективного ризику / В. В. Артеменко // Зб. наук. праць. – УкрДАЗТ. – 2005. – Вип. 68. – С.119-126.
30. Артеменко В. В. Вдосконалення ефективності контролю при ремонті тягових електричних машин в умовах депо: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.22.07 / В. В. Артеменко. – Х., 2006.
31. Бабанин А. Б. Совершенствование технологии испытаний тяговых электрических машин / А. Б. Бабанин, В. В. Артеменко // Коммунальное хозяйство городов. – Х.: Техника, 2004. – № 55. – С.171-177.
32. Лоза П. О. Покращення енергетичних властивостей стенда для випробувань колекторних тягових двигунів локомотивів / П. О. Лоза // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – С. 69-71.

33. Лоза П. О. Визначення еквівалентного струму навантаження при випробовуванні тягових електродвигунів на нагрівання без вентиляції / П. О. Лоза, Л. В. Дубинець, Д. В. Устименко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – С. 26-30.
34. Лоза П. О. Определение эквивалентного тока часового режима при приемо-сдаточных испытаниях вспомогательных тяговых электрических машин / П. О. Лоза // Гірнич електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2008. – Вип. 81. – С. 165-170.
35. Лоза П. О. Энергобережения при випробування тягових електричних машин / П. О. Лоза // Тези 2-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація залізничного транспорту». – Д., 2008. – С. 14-15.
36. Лоза П. О. Удосконалення стенду для випробувань тягових двигунів локомотивів / П. О. Лоза // Тези 68-ої міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Д., 2008. – С. 43.
37. Лоза П. О. Покращення методів випробувань тягових двигунів та допоміжних машин електровозів постійного струму: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / П. О. Лоза. – Д., 2010 р. – 22 с.
38. Лоза П. О. Покращення енергетичних та інших показників приймально-здавальних випробувань тягових двигунів електровозів / П. О. Лоза // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 27 – С. 81-83.
39. Пат. 33065 Україна МПК: H02K51/00. Випробувальний стенд електричних машин / Чілікін Г. М., заявник і патентовласник: Дн. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2012 06491; заявл. 04.02.08; опубл. 10.06.08, Бюл. № 11.
40. Черный А. П. Теория и практика мониторинга параметров электрических двигателей электромеханических систем: дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: 05.09.03 / А. П. Черный. – Д., 2004.
41. Осяев А.Т. Повышение эффективности эксплуатации магистральных электровозов методами управления их техническим состоянием: дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук / А.Т. Осяев. – М., 2002. – 371 с.
42. Диагностика и испытания локомотивов / под ред. Ю. Н. Виноградова. – М.: Транспорт, 1983. – 112 с.
43. Осяев А. Т. Средства и методы диагностики электрооборудования электровозов постоянного тока в эксплуатации: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук / А. Т. Осяев. – М.: МИИТ, 1985. – 22 с.
44. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения электрических двигателей при их испытаниях (теория, исследование и разработка): дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук / Д. И. Родькин. – Кривой Рог, 1994. – 511 с.

45. Родькин Д. И., Системы динамического нагружения и диагностики электрических двигателей при послеремонтных испытаниях / Д. И. Родькин. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
46. Родькин Д. И. Новые системы нагружения электродвигателей при испытаниях / Д. И. Родькин, Г. И. Кочкин // Электротехника. – 1991. – № 11. – С. 14-17.
47. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения как класс энергосберегающего оборудования для испытания электрических машин / Д. И. Родькин // Тезисы Всесоюзн. науч.-техн. конф. «Научные основы создания энергосберегающей техники и технологии». – М.: МЭИ. – С. 214-216.
48. Родькин Д. И. Энергообменные процессы в системах динамического нагружения машин постоянного тока // Тезисы Всесоюзн. научн.-техн. конф. – Д.: Промінь, 1990. – С. 301-302.
49. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения двигателей последовательного возбуждения / Д. И. Родькин, Д. В. Дубсон. – Деп. в УКРНИИНТИ, 1992. – 21 с.
50. Фаннан А. Принципы создания универсальных нагрузочных устройств для послеремонтных предприятия / А. Фаннан, Д. И. Родькин, Т. В. Величко. – Деп. в ГНТБ Украины, № 1813-УК95.
51. Фаннан А. Универсальные нагрузочные системы для испытания электрических машин / А. Фаннан, Д. И. Родькин, Т. В. Величко. – Деп. в ГНТБ Украины, № 2045-УК95.
52. Фаннан А. Нагрузочные устройства для испытания машин постоянного и переменного тока / А. Фаннан, Д. И. Родькин, Т. В. Величко. – Тезисы 12 Всеросс. конф. по электроприводу. – СПб., 1995.
53. Емельянов Р. Г. Моделирование элементов систем нагружения электрических машин / Р. Г. Емельянов, Д. И. Родькин, Т. В. Величко, А. Фаннан. – Деп. в ГНТБ Украины, № УК95.
54. Автоматизированная испытательная система (теория, комплексное проектирование электрических машин) / А. Г. Брук А. Г. и др. // Труды ВНИИЭМ. – 1987. – 84 с.
55. А. с. СССР, G01 R 31/34. Нагрузочное устройство для испытаний электрических генераторов / Н. Н. Иванов, Р. А. Земляк, В. Н. Сапрыкин. – № 13477112.
56. А. с. СССР, G01R 31/34, Способ испытания двух электрических машин постоянного тока / Кривицкий и др. – № 1049840; 1983, Бюл. № 39.
57. А. с. СССР, G01 R 31/34. Устройство для испытания двух электрических машин постоянного тока / Писарик Л. С. и др. – № 1117544 1984, Бюл. № 37.
58. А. с. СССР, G01 R 31/34. Устройство для испытания двигателей постоянного тока / Р. П. Мартикайтен, Ю. М. Слепцов. – № 924637; 1982, Бюл. № 16.
59. А. с. СССР, G01 R 31/34. Способ нагружения двигателей постоянного тока и устройство для его осуществления / Родькин Д. И. и др. –

- № 1563410.
60. А. с. СССР, G01 R 31/34. Устройство для динамического нагружения двигателей постоянного тока / Родькин Д. И. и др. – № 1633986.
 61. А. с. СССР, G01 R 31/34. Устройство для нагружения электродвигателя постоянного тока / Родькин Д. И. и др. – № 1610582.
 62. А. с. СССР, G01 R 31/34. Устройство для нагружения двигателей постоянного тока / Д. И. Родькин. – № 1676350.
 63. А. с. СССР, G01R 31/34. Устройство для нагружения двигателей постоянного тока / Родькин Д. И. и др. – № 1485829.
 64. Безрученко В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Д.: Вид-во Дн. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
 65. Афанасов А. М. Принципы автоматического управления системами взаимного нагружения тяговых электрических машин / А. М. Афанасов // Зб. наук. пр. ДонІЗТ. – 2012. – Вип. 29. – С. 205-211.
 66. Афанасов А. М. Энергетические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – С. 34-38.
 67. Афанасов А. М. Электромеханические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – С. 42-46.
 68. Афанасов А. М. Регулирование магнитных потоков тяговых электрических машин при их взаимном нагружении / А. М. Афанасов // Зб. наук. пр. Держ. економіко-технологічного ун-ту транспорту. Сер. Транспортні системи і технології. – К.: ДЕТУТ, 2011. – Вип. 19. – С. 5-14.
 69. Афанасов А. М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока / А. М. Афанасов // Гірничі електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С. 183-189.
 70. Афанасов А. М. Проблемы и перспективы модернизации станций для испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Тези 69-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Д., 2009. – С.127.
 71. Афанасов А. М. Пути снижения энергозатрат на испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Тези 3-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту "Транселектро-2009"». – Місхор, 2009. – С. 6-7.
 72. Афанасов А. М. Выбор рациональных схем испытания тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація

- транспорту "Транселектро-2010"». – Д., 2010. – С. 7-8.
73. Дунаевский С. Я. Моделирование элементов электромеханических систем / С. Я. Дунаевский, О. А. Крылов, Л. В. Мазия. – М.: Энергия, 1968. – 288 с.
 74. Егоров В. Н. Динамика систем электропривода / В. Н. Егоров, В. М. Шестаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 213 с.
 75. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.
 76. Пиотровский Л. М. Электрические машины / Л. М. Пиотровский. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1949. – 528 с.
 77. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / под ред . В. И. Бочарова. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
 78. Винокуров В. А. Электрические машины железнодорожного транспорта / В. А. Винокуров, Д. А. Попов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.
 79. Ламмеранер Й. Вихревые токи / Й Ламмеранер, М. Штафль. – М. – Л.: Энергия, 1967. – 208 с.
 80. Проектирование тяговых электрических машин / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
 81. Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 535 с.
 82. Скобелев В. Е. Двигатели пульсирующего тока / В. Е. Скобелев. – Л.: Энергия, 1968. – 231 с.
 83. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи / А. Е. Алексеев. – Л.: Энергия, 1977. – 444 с.
 84. Афанасов А. М. Синтез систем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіки і технології». – К., 2011. – С. 6.
 85. Афанасов А. М. Теоретический анализ энергетических процессов при взаимной нагрузке тяговых электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – С. 258-262.
 86. Коган И. Ш. О возможном принципе систематизации физических величин / И. Ш. Коган // Законодательная и прикладная метрология. – 1998. – № 5. – С. 30-43.
 87. Коган И. Ш. Систематизация и классификация определений и дополнений к понятию «энергия» / И. Ш. Коган // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2009. – № 2-3. – С. 56-63.
 88. Савельев И. В. Курс общей физики [в 5 книгах] / И. В. Савельев. – М.: АСТ: Астрель, 2005.
 89. Эткин В. А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии) / В. А. Эткин. – СПб.: Наука, 2008. – 409 с.

90. Яворский Б. М. Справочник по физике: 3-е изд. / Б. М. Яворский, Б. М. Детлаф. – М.: Наука. Физматгиз, 1990. – 624 с.
91. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: в 3 ч. / Г. И. Атабеков, А. Б. Тимофеев, С. С. Хухриков. – М.-Л.: Госэнергоиздат. – Ч. 2: Нелинейные цепи. – 1962. – 128 с.
92. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
93. Яблонский А. А. Курс теоретической механики: 16-е изд. / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – М.: КноРус, 2011. – 608 с.
94. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учебник для вузов. 18-е изд. / С. М. Тарг. – М.: Высш. шк., 2010. – 416 с.
95. Данилевич Я. Б. Добавочные потери в электрических машинах / Я. Б. Данилевич, Э. Г. Камарский. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1971. – 368 с.
96. Афанасов А. М. Повышение информативности результатов тепловых испытаний тяговых электромашин методом взаимной нагрузки / А. М. Афанасов // Тези Міжнародної науково-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті». – Д., 2011. – С. 37.
97. Афанасов А. М. Расхождение тепловых факторов обмоток якорей тяговых электрических машин при испытании на нагрев методом взаимной нагрузки / А. М. Афанасов // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 16-19.
98. Атабеков Г. И. Основы теории цепей / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1969. – 412 с.
99. Афанасов А. М. Регулирование небалансной электромагнитной мощности в системах взаимного нагружения тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2011. – Вип. 87. – С. 84-87.
100. Афанасов А. М. Компенсация электрических потерь при взаимной нагрузке тяговых электромашин по схеме Гопкинсона / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 28. – С. 34-37.
101. Афанасов А. М. Условия компенсации механических и магнитных потерь мощности при взаимной нагрузке тяговых электрических машин по схеме Потье / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – С. 59-62.
102. Находкин М. Д. Универсальная магнитная характеристика тяговых электродвигателей постоянного тока / М. Д. Находкин, В. С. Хвостов // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 1. – С. 44-48.
103. Архангельский Б. И. Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин / Б. И. Архангельский // Электричество. – 1958. – № 1. – С. 14-18.
104. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

105. Режимы работы магистральных электровозов / [О. А. Некрасов, А.Л. Лисицин, Л. А. Мугинштейн, В. И. Рахманинов и др.]; под ред. О. А. Некрасова. – М.: Транспорт, 1983. – 231 с.
106. Афанасов А. М. Моделирование магнитных характеристик тяговых электродвигателей постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Залізн. трансп. України. – 2012. – № 6. – С. 29-31.
107. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / под ред. А. И. Тищенко. – М.: Транспорт, 1976. Т. 1. – 432 с.
108. Штонер Р. Многокритериальная задача оптимизации. Теория, вычисления и приложения / Р. Штонер. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
109. Афанасов А. М. Выбор рациональных схем и режимов нагружения тяговых электрических машин при приемо-сдаточных испытаниях / А. М. Афанасов // Локомотив-информ. – 2012. – № 10. – С. 12-14.
110. Юревич Е. И. Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. – М., 1975. – 412 с.
111. Теория автоматического управления / [Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.]; под ред. А. А. Воротнова. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.
112. Ротанов Н. А. Проектирование систем управления электроподвижным составом / Н. А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
113. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин / Г. Готтер. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.
114. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
115. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
116. Кузьмич В. Д. Математическое моделирование температурного поля обмоток тягового электродвигателя тепловоза / В. Д. Кузьмич, Е. Ю. Логинова // Вестник ВНИИЖТ, 1999. – № 2. – С. 39-43.
117. Попов А. А. Результаты экспериментального и расчетного определения температур обмоток тягового электродвигателя электровоза / А. А. Попов, Е. Ю. Логинова // Вестник ВНИИЖТ, 1999. – № 6. – С. 34-38.
118. Космодамианский А. С. Измерение и регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов: монография / А. С. Космодамианский. – РГОТУПС, 2002. – 285 с.
119. Космодамианский А. С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов: автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук. М., 2002. – 52 с.
120. Филиппов И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с.
121. Рапопорт О. П. Нужна система мониторинга теплового состояния тяговых двигателей / О. П. Рапопорт, Д. Н. Хомченко // Локомотив. –

2009. – № 5.
122. Афанасов А. М. Качественный анализ электрических и магнитных потерь в якорях тяговых электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – № 36. – С. 13-18.
 123. Афанасов А. М. К вопросу о выборе мощности источников питания стенда взаимной нагрузки тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 27. – С. 3-9.
 124. Афанасов, А. М. Моделирование электромеханических процессов в стенде взаимной нагрузки тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Наук.-техн. збір. «Гірнична електромеханіка та автоматика». – 2010. – Вип. 84. – С. 210-217.
 125. Нафиков Г. М. Аппроксимация кривой намагничивания тяговых двигателей / Г. М. Нафиков // Сб. науч. трудов УЭМИИТ. В кн.: Вопросы электрической тяги. Свердловск. 1965. – Вып. 11. – С. 44-49.
 126. Афанасов А. М. Выбор типовых параметров источников мощности системы взаимного нагружения тяговых электромашин с механическим способом компенсации потерь холостого хода / А. М. Афанасов // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 3. – С. 26-28.
 127. Афанасов А. М. Взаимное нагружение тяговых электромашин с расходящимися магнитными характеристиками / А. М. Афанасов // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту ім. В. Даля – Луганськ : СУДУ, 2012. – Вип. 5(176). Ч.1. – С. 202-206.
 128. Афанасов А. М. Энергетические показатели электрического способа компенсации магнитных и механических потерь в тяговых электродвигателях при их взаимной нагрузке / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – С. 65-68.
 129. Афанасов А. М. Энергетические показатели механического способа компенсации электрических потерь в тяговых электродвигателях при их взаимной нагрузке / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 35. – С. 69-73.
 130. Астахов Ю. Н. Накопители энергии в электрических системах / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, А. Г. Тер-Газарян. – М.: Высш. шк., 1989. – 158 с.
 131. Овчаренко А. С. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий / А. С. Овчаренко, Д. И. Розинский. – К.: Техніка, 1989. – 287 с.
 132. Афанасов А. М. Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электромашин при приемо-сдаточных испытаниях / А. М. Афанасов // Восточно-европейский журн. передовых технологий. – 2012. – № 5/8(59). – С. 6-9.

133. Афанасов А. М. Энергетическая эффективность нагревания обмоток тяговых электрических машин при приемо-сдаточных испытаниях / А. М. Афанасов // Матеріали 6-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту "Транселектро-2012"». – Місхор, 2012. – С . 52-53.
134. Тихменев Б. Н. Электроподвижной состав с полупроводниковыми преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Голованов, В. Д. Радченко, З . М. Рубчинский. – М.: Транспорт, 1967. – 307с.
135. Уайт Д. Электромеханические преобразователи энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1973. – 528 с.
136. Копылов И. П. Электромеханические преобразователи энергии / И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1973. – 392 с.
137. Горбачев Г. Н. Промышленная электроника / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
138. Гузенков П. Г. Детали машин: учеб. для вузов / П. Г. Гузенков. – М: Высш. шк., 1986. – 359 с.
139. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока / Э. М. Аптер и др. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.
140. Афанасов А. М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 77-80.
141. Щербаков В. Г. Создание нового электроподвижного состава для магистральных железных дорог МПС / В. Г. Щербаков, Л. Н. Сорин // Сб. науч. тр. «Электровозостроение». – Новочеркасск. – 1998. – Т. 40. – С. 10-16.
142. Электропоезда постоянного тока / под ред. П. В. Цукало. – М.: Транспорт, 1979. – 415 с.
143. Колпахчян Г. И. Электроприводы перспективного электроподвижного состава / Г. И. Колпахчян, В. И. Захаров // Сборник научных трудов «Электровозостроение». Новочеркасск. – 2003. – Т. 45. – С. 82-93.
144. Справочник по математике / под ред. Г. Гроше. – М.: Наука; Лейпциг: Тойбнер, 1981. – 718 с.
145. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
146. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – М.: Высш. шк., 1982. – 496 с.
147. Каган В. Г. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения / В. Г. Каган, Г. В. Лебедев, Л. И. Малишин. – М.: Энергия, 1971. – 96 с.
148. Голубеев М. И. Тиристорные электроприводы / М. И. Голубеев. – К.: Выща шк., 1976. – 102 с.
149. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока / П. Сен. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 230 с.

150. Автоматизированный электропривод / под ред. И. Ф. Ильинского. – М.: Энергоиздат, 1990. – 544 с.
151. Кравчик А. Э. Выбор и применение асинхронных двигателей / А. Э. Кравчик, Э. К. Стрельбицкий, М. М. Шлаф. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 95 с.
152. Ильинский Н. Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом / Н. Ф. Ильинский. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 142 с.
153. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
154. Шенфельд Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шенфельд, Э. Хабигер. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 451 с.
155. Мейстель А. М. Электропривод и автоматизация промышленных установок / А. М. Мейстель, К. И. Наумычева. – М.: ВИНТИ. – 1974. – Т. 4. – 205 с.
156. Гейлер Л. Б. Основы электропривода / Л. Б. Гейлер. – Минск: Вышэйшая шк., 1972. – 608 с.
157. Кочубиевский И. Д. Системы нагружения для исследования и испытания машин и механизмов / И. Д. Кочубиевский. – М.: Машиностроение, 1985. – 220 с.
158. Замкнутые системы преобразования электрической энергии / под ред. В. Я. Жуйкова. – К.: Техника; Братислава: Альфа. 1989. – 320 с.
159. Розробка пропозицій щодо зниження витрат електроенергії на випробування електричних машин тягового рухомого складу: отчет о НИР (заключит.) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Інв. № 0711U004914. – № ДР 0109U002982. – Д., 2010. – 195 с.
160. Никитин Б. И. Энергосберегающие устройства для испытаний механических передач / Б. И. Никитин, А. Г. Иванов, В. И. Новиков // Тезисы Всесоюзн. научн.-техн. конф. «Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах энергоснабжения промышленности и транспорта». – Д., 1990. – С. 352-353.
161. Гулиа Н. В. Детали машин / Н. В. Гулиа, В. Г. Клоков, С. А. Юрков. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – С. 416.
162. Гузенков П. Г. Детали машин: учеб. для вузов [4-е испр.] / П. Г. Гузенков. – М.: Высш. шк., 1986. – С. 359.
163. Матасов Е. Б. Механические бесступенчатые передачи нефрикционного типа. – Машиностроение, 1977. – С. 143.
164. Пылаев Б. В. Основы динамики высокомоментных вариаторов. – № 7. – Вестник машиностроения, 2004. – С. 16-22.
165. Пылаев Б. В. Высокомоментные вариаторы нефрикционного типа: научное издание / Б. В. Пылаев. – МГАУ им. В. П. Горячкина, 2000. – С. 60.
166. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы: учебн. для студ. машиностроительных высш. учебн. зав. / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1982.

167. Гейер В. Г. Гидравлика и гидропривод: учеб. для студ. высш. учебн. зав. / В. Г. Гейер, В. С. Дулин, А. Н. Заря. – [3-е изд.]. – М.: Недра, 1991.
168. Юфин А. П. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод / А. П. Юфин. – М.: Высш. шк., 1965.
169. Схиртладзе А. Г. Гидравлические и пневматические системы / А. Г. Схиртладзе, В. И. Иванов, В. Н. Кареев. – [2-е изд.]. – М.: ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2003. – 544 с.
170. Поссе А. В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока / А. В. Поссе. – Л.: Энергия, 1973. – 302 с.
171. Волков В. К. Повышение эксплуатационной надежности тяговых двигателей / В. К. Волков, А. Г. Суворов. – М.: Транспорт, 1988. – 128 с.
172. Волков В. К. Контроль качества ремонта тяговых двигателей / В. К. Волков // Жел.-дор. транспорт. – 1990. – № 1. – С.52-54.
173. Меерзон Ю.М. Анализ технического состояния тяговых двигателей / Ю. М. Меерзон // Повышение ресурса тяговых электродвигателей: сборник докладов и сообщений научн.-техн. конф. ВНИИЖТ. — М., 2004. – С. 15-19.
174. Коноваленко Д. В. Надежность электрических машин тягового подвижного состава / Д. В. Коноваленко, В. Н. Иванов, Д. А. Оленцевич, В. В. Сидоров, Е. М. Лыткина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 1. – С. 196-198.
175. Горский А.В. Оптимизация системы ремонта локомотивов / А. В. Горский, А. А. Воробьев. – М.: Транспорт, 1994. – 208 с.
176. Антонов М. В. Эксплуатация и ремонт электрических машин / М. В. Антонов, Н. А. Акимова, Н. Ф. Котеленец. – М.: Высш. шк., 1989. – 189 с.
177. Тартаковский Э. Д. Определение технического состояния локомотивов и диагностической ценности информации по статистическим данным депо: учеб. пособие для студ. специальности 1709 «Локомотивы» и слушателей ФПК / Э. Д. Тартаковский, А. Б. Бабанин, А. С. Крашенинин. – Харьков: ХИИТ. – 1990. – 57 с.
178. Ермолин Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 247 с.
179. Галкин В.Г. Надежность тягового подвижного состава / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
180. Мандыч Н. К. Ремонт электродвигателей / Н. К. Мандыч. – К.: Техника, 1989. – 155 с.
181. Афанасов А. М. Оценка энергетической эффективности послеремонтных испытаний тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Материалы 2-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Ждениево, 2011. – С. 5.
182. Афанасов А. М. Энергетические показатели способов компенсации потерь мощности в тяговых электромашинах при их взаимной нагрузке / А. М. Афанасов // Материалы 4-ї Міжнародної науково-практ.

- конф. «Електрифікація транспорту "Транселектро-2010"». – Д., 2010. – С. 8-9.
183. Тихменев Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
 184. Раков В.А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956-1975 г. г.). – М.: Транспорт, 1999. – 443 с.
 185. Автоматизация электроподвижного состава / [А. Н. Савоськин, Л. А. Баранов, А. В. Плакс и др.]; под ред. А. Н. Савоськина. – М.: Транспорт, 1990. – 311 с.
 186. Правила тяговых расчётов для промышленных электровозов постоянного тока. – М.: Транспорт, 1975. – 107 с.
 187. Электроподвижной состав промышленного транспорта: справочник / [Л. В. Балон, В. А. Браташ, М. Л. Бичуч и др.]; под ред. Л. В. Балона. – М.: Транспорт, 1987. – 296 с.
 188. Ильинский Н. Ф. Энергосбережение в электроприводе / Н. Ф. Ильинский, Ю. В. Рожановский, А. О. Горнов. – М.: Высш. шк., 1989. – 125 с.
 189. Рихтер Р. Расчетные элементы общего назначения. Машины постоянного тока / Р. Рихтер; [пер. с немецкого Ю. С. Чечета]. – Л.: Главная редакция энергетической литературы, 1935. – 595 с.
 190. Жиц М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М. З. Жиц. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.
 191. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
 192. Плакс А. В. Системы управления электрическим подвижным составом: учебн. для студ. вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 360 с.
 193. Техменев Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Техменев, В. А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 312 с.
 194. Лыков А. В. Тепло- и массоперенос / А.В. Лыков, О.Г. Мартыненко, Б. А. Коловандин, В. Е. Аеров. – Минск: Энергия, 1968. – 664 с.
 195. Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарёв, Л.А. Позднякова и др. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
 196. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво: наказ Мінекономіки та Міністерства фінансів України № 218/446 від 26.09.01 . – К., 2001. – 31 с.
 197. Афанасов А. М. Системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока: монография / А. М. Афанасов. – Д.: Изд-во Маковецкый, 2012. – 248 с.
 198. Анхимюк В. Л. Проектирование систем автоматического управления электроприводами / В. Л. Анхимюк, О. П. Ильин. – Минск: Высшая шк., 1971. – 336 с.

199. Башарин А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 380 с.
200. Афанасов А. М. Выбор методов определения механических потерь в тяговых электродвигателях постоянного и пульсирующего тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 32. – С. 151-154.
201. Пат. 50880 Україна МПК(2009) G01M 15/00. Стенд взаємного навантаження тягових електричних двигунів постійного струму / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2009 13721; заявл. 28.12.09; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
202. Пат. 50929 Україна МПК(2009) H02K 51/00. Стенд для випробування електричних машин постійного струму послідовного збудження / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2009 13961; заявл. 30.12.09; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
203. Пат. 51326 Україна МПК(2009) H02K 51/00. Стенд для випробування тягових електричних двигунів постійного струму / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2010 00798; заявл. 27.01.10; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.
204. Пат. 51327 Україна МПК(2009) H02K 51/00. Стенд взаємного навантаження електричних машин постійного струму послідовного збудження / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2010 00804; заявл. 27.01.10; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.
205. Пат. 75689 Україна МПК: H02K51/00. Пристрій для випробування електричних машин постійного струму послідовного збудження / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дн. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2012 06491; заявл. 29.05.12; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23.
206. Пат. 76897 Україна МПК(2013.01) H02K 51/00. Система взаємного навантаження тягових електричних машин постійного струму / Афанасов А. М., заявник і патентовласник: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – u 2012 06484; заявл. 29.05.12; опубл. 25.01.13, Бюл. № 2.
207. Афанасов А. М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах / А. М. Афанасов // Матеріали 5-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту " Транселектро-2011"». – Д., 2011. – С. 3.
208. Афанасов, А. М. Определение расхода электроэнергии на проведение приемо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин / А. М. Афанасов // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 1. – С.10-14.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна

На правах рукописи

Афанасов Андрей Михайлович

УДК 629.423.31-048.24

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

ПРИЛОЖЕНИЯ

05.22.09 – электротранспорт

05.22.12 – промышленный транспорт

Диссертация на соискание научной степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Гетьман Геннадий Кузьмич

Днепропетровск – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|--------------|--|-----|
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | Способы определение механических потерь в тяговых электрических двигателях постоянного и пульсирующего тока..... | 4 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б | Особенности работы систем взаимного нагружения тяговых электрических машин при расхождении их магнитных характеристик..... | 15 |
| Б.1 | Компенсация электрических потерь источником электрической мощности, а потерь холостого хода – источником механической мощности..... | 16 |
| Б.2 | Компенсация электрических потерь и потерь холостого хода двумя отдельными источниками электрической мощности..... | 19 |
| Б.3 | Компенсация электрических потерь и потерь холостого хода двумя отдельными источниками механической мощности..... | 25 |
| Б.4 | Компенсация электрических потерь источником механической мощности, а потерь холостого хода – источником электрической мощности..... | 30 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В | Статистический анализ отклонения магнитных характеристик тяговых электрических двигателей 35 | 35 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г | Моделирование расхождения магнитных характеристик взаимно нагруженных тяговых электромашин..... | 42 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д | Анализ возможных схемных решений источников и преобразователей мощности систем взаимного нагружения тяговых электрических машин..... | 49 |
| Д.1 | Источники электрической мощности..... | 50 |
| Д.2 | Источники механической мощности..... | 57 |
| Д.3 | Конверторы напряжения..... | 63 |
| Д.4 | Преобразователи механического момента (угловой скорости)..... | 68 |
| Д.5 | Регуляторы тока возбуждения..... | 71 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е | Экспериментальные исследования влияния тока нагрузки тяговых электрических машин на расход электроэнергии при испытании на нагрев..... | 77 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж | Определение расхода электроэнергии на проведение приёмо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин..... | 86 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ З | Определение экономии электроэнергии от использования рациональных схем и режимов нагружения тяговых электрических машин при приёмо-сдаточных испытаниях..... | 100 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ И | Акты использования результатов диссертационной работы..... | 106 |

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Способы определения механических потерь в тяговых электрических двигателях постоянного и пульсирующего тока

Механические потери в тяговых электрических машинах обычно определяются в режиме холостого хода при последовательном возбуждении [2]. В принципе эти же потери могут быть определены и при независимом возбуждении тяговых электродвигателей при условии, что их режим работы будет соответствовать минимуму суммы электрических и магнитных потерь. При соблюдении данного условия точность определения механических потерь при независимом возбуждении может быть выше, чем при последовательном.

Значительная жесткость зависимости момента двигателя независимого возбуждения от частоты вращения якоря обеспечивает более простые условия снятия характеристики благодаря малости времени переходных процессов при регулировании напряжения.

Принципиальные электрические схемы, по которым могут быть сняты характеристики механических потерь при работе двигателей с последовательным и независимым возбуждением, приведены на рис. А.1 и А.2 соответственно.

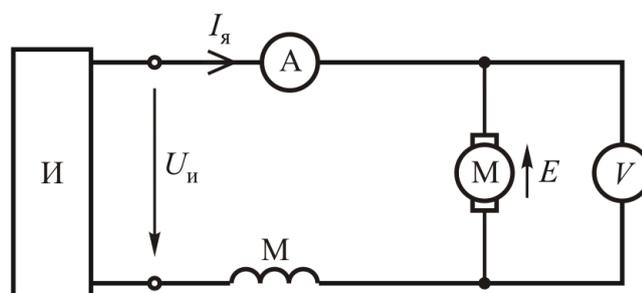


Рисунок А.1 – Электрическая схема для определения механических потерь при последовательном возбуждении электромашин

При последовательном возбуждении используется один источник электрической мощности «И» с напряжением , к которому подключаются последовательно соединенные обмотки якоря и возбуждения.

При независимом возбуждении обмотка якоря электродвигателя подключена к источнику электрической мощности «И1» с напряжением , а обмотка возбуждения питается током от другого источника электрической мощности «И2».

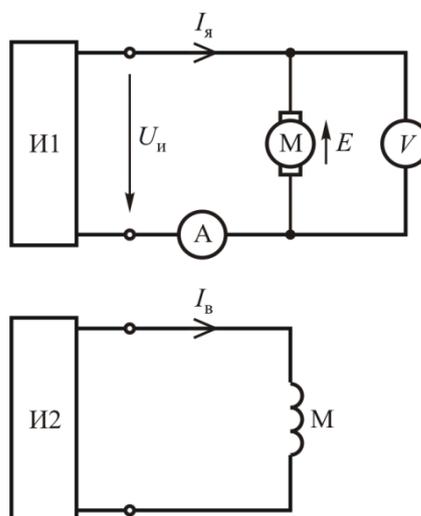


Рисунок А.2 – Электрическая схема для определения механических потерь при независимом возбуждении электромашин

В обоих случаях электродвигатель работает в режиме холостого хода, при котором вся потребляемая из сети мощность компенсируется суммарными потерями в нём. В дальнейшем будем рассматривать только электрические, магнитные и механические потери мощности в испытуемом электродвигателе. Пренебрежение добавочными потерями в данном анализе может быть оправдано их малостью в рассматриваемом режиме холостого хода [5].

С помощью вольтметра «V» и амперметра «A» определяются напряжение и ток якоря испытуемого электродвигателя.

Значение механических потерь в двигателе для любой из схем испытания рассчитывается как мощность , потребляемая его якорем при установившемся режиме холостого хода.

$$P_{\text{мех}} = U_{\text{и}} I_{\text{я}} - P_{\text{эл}}, \quad (\text{A.1})$$

где $U_{\text{и}}$ – напряжение на зажимах якоря;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря.

Баланс мощностей для якоря при постоянной частоте его вращения имеет вид

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{эм}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{ж}}, \quad (\text{A.2})$$

где $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность;

$P_{\text{ж}}$ – электрические потери в якоре.

Электромагнитная мощность будет определяться в виде

$$P_{\text{эм}} = U_{\text{и}} I_{\text{я}} - P_{\text{ж}}, \quad (\text{A.3})$$

где $I_{\text{я}}$ – э. д. с. якоря.

Электрические потери в цепи якоря испытуемого электродвигателя

$$P_{\text{эл}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} \quad (A.4)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря.

При холостом ходе электромагнитная мощность электродвигателя уравнивается магнитными и механическими потерями и соответственно.

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} \quad (A.5)$$

Объединив формулы (A.2) и (A.5), получим баланс мощностей в виде

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} \quad (A.6)$$

Относительно точное определение механических потерь для любой из приведенных схем испытаний по формуле (A.1) возможно при условии, что механические потери намного больше суммы магнитных и электрических потерь.

$$P_{\text{мех}} \gg P_{\text{эл}} \quad (A.7)$$

Только в этом случае можно считать, что механические потери приблизительно равны электрической мощности, потребляемой якорем электродвигателя.

$$P_{\text{мех}} \approx P_{\text{эл}} \quad (A.8)$$

То есть условием возможности использования формулы (A.8) для определения механических потерь с минимальной ошибкой будет минимум суммы остальных потерь в якоре

$$P_{\text{эл}} \ll P_{\text{м}} \quad (A.9)$$

При выполнении условия (A.9) можно считать справедливым выражение равенства потребляемой электромагнитной мощности и мощности механических потерь

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}} \quad (A.10)$$

Определим режим работы электродвигателя, при котором будет выполняться условие (A.9). Будем считать возможным раздельное регулирование напряжения на якоре и тока возбуждения испытуемой электрической машины.

Выразим суммарные потери через э. д. с. и ток якоря. Предварительно представим магнитные потери как пропорциональные квадрату э. д. с.

$$P_{\Sigma} = P_{\text{э.д.с.}} + P_{\text{магн.}} \quad (\text{A.11})$$

где σ – параметр электродвигателя, постоянный при неизменной частоте вращения его якоря [6].

Подставив (A.4) и (A.12) в (A.11), получим

$$P_{\Sigma} = \dots \quad (\text{A.12})$$

Определим, при каком токе I и э. д. с. E будет выполняться условие (A.9). При этом будем учитывать, что в соответствии с (A.3) и (A.10)

$$I = \dots \quad (\text{A.13})$$

Причем, принимая во внимание условие постоянства частоты вращения якоря, будем считать $\omega = \text{const}$.

Проведя анализ функции $P_{\Sigma}(I, E)$ на предмет определения точек экстремума, нетрудно убедиться, что её минимум находится в точке, для которой электрические потери в якоре равны магнитным потерям, то есть

$$P_{\text{эл.}} = P_{\text{магн.}} \quad (\text{A.14})$$

Для этого режима работы электродвигателя будут справедливы выражения для определения оптимальных значений тока якоря $I_{\text{опт}}$ и э. д. с. $E_{\text{опт}}$, обеспечивающих минимум суммы электрических и магнитных потерь:

$$I_{\text{опт}} = \dots; \quad (\text{A.15})$$

$$E_{\text{опт}} = \dots \quad (\text{A.16})$$

Оптимальное соотношение э. д. с. и тока якоря испытуемого электродвигателя при этом будет выглядеть как

$$E_{\text{опт}} = \dots \quad (\text{A.17})$$

Практическое использование выражений (А.15) - (А.17) весьма затруднительно в связи с невозможностью точной предварительной оценки всех параметров, входящих в эти формулы, в том числе и самих механических потерь, определение которых является целью испытаний. Однако, если предположить известным отношение электрических и магнитных потерь в тяговом электродвигателе для номинального режима

, то можно найти оптимальное соотношение напряжения и тока якоря, обеспечивающее минимальную ошибку в определении механических потерь при любой частоте вращения.

Как правило, отношение электрических и магнитных потерь для любого испытуемого тягового электродвигателя может быть достаточно точно оценено еще до проведения испытаний даже по приблизительным значениям его типовых параметров.

Электрические и магнитные потери в номинальном режиме соответственно:

$$; \quad (A.18)$$

$$. \quad (A.19)$$

Отношение потерь в номинальном режиме

$$. \quad (A.20)$$

Учитывая, что оптимальное отношение э. д. с. и тока якоря электродвигателя определяется выражением (А.17), путем исключения отношения , получим

$$. \quad (A.21)$$

При выполнении условия (А.9) э. д. с. якоря можно считать приблизительно равной напряжению на нем. Тогда выражение (А.21) можно записать в более удобном для практического использования виде

$$. \quad (A.22)$$

Обеспечение оптимального соотношения напряжения и тока якоря при определении механических потерь электродвигателя достаточно легко достижимо в случае использования независимого возбуждения и, как

правило, невыполнимо при последовательном возбуждении. Тем не менее, при проведении квалификационных испытаний для определения этого вида потерь используют последовательное возбуждение испытуемого электродвигателя.

Использование последовательного возбуждения при определении механических потерь автоматически обеспечивает относительно равномерное распределение электрических и магнитных потерь за счет одновременного снижения магнитного потока при уменьшении тока. Отношение этого вида потерь при последовательном возбуждении для каждого типа электродвигателя будет определяться видом его кривой намагничивания.

На рис. А.3. кривая намагничивания электродвигателя схематично приведена в виде зависимости его э. д. с. от силы тока при условии постоянства частоты вращения якоря. Для простоты анализа будем считать частоту вращения якоря, равной номинальному значению, при котором току соответствует э. д. с. .

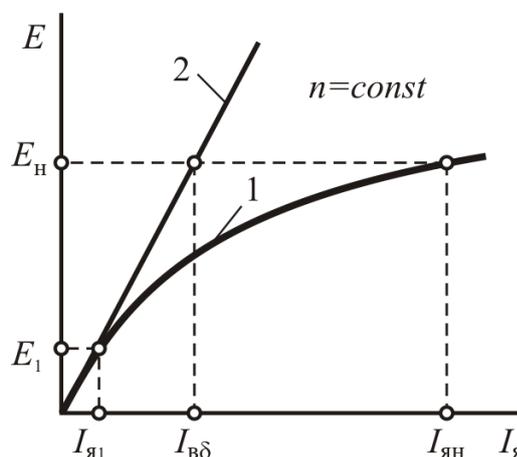


Рисунок А.3 – Кривая намагничивания электродвигателя

Кривая 1 на рис. А.3 представляет собою зависимость э.д.с. от тока якоря, а прямая 2 является касательной к кривой 1 в точке, соответствующей началу координат э. д. с. и тока.

Как и при анализе схемы с независимым возбуждением будем считать известным отношение электрических и магнитных потерь в номинальном режиме .

В режиме холостого хода, при котором измеряются механические потери, ток и э. д. с. якоря уменьшаются до значений и соответственно . При этом точка, соответствующая холостому ходу, оказывается на линейной части характеристики 1, для которой отношение отличается от значения , и может быть определено из выражения для коэффициента магнитного насыщения электромашины

$$, \quad (A.23)$$

где $I_{\text{взб}}$ – ток возбуждения и он же якоря, который создаёт магнитодвижущую силу, компенсирующую падение напряжения в воздушном зазоре магнитной цепи электродвигателя.

Из рис. А.3 видно, что $I_{\text{взб}} = I_{\text{як}}$. Тогда с учетом выражения (A.23) получим равенство

$$. \quad (A.24)$$

При последовательном возбуждении в режиме холостого хода при любом значении механических потерь $P_{\text{мех}}$ отношение $\frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}}$ будет определяться именно выражением (A.24).

Заменяя в (A.24) э. д. с. на напряжения, что допустимо, учитывая условие (A.9), которое автоматически частично выполняется и для последовательного возбуждения, получим новое выражение

$$. \quad (A.25)$$

Ошибка в определении механических потерь на холостом ходу при последовательном возбуждении будет определяться степенью отклонения отношения $\frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}}$ от оптимального значения $\frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}}$. Минимальная ошибка будет соответствовать условию равенства этих отношений.

$$. \quad (A.26)$$

С учетом выражений (A.25) и (A.26) это же условие может быть записано в виде оптимального соотношения электрических и магнитных потерь мощности в тяговом электродвигателе при номинальном режиме.

$$. \quad (A.27)$$

В случае, когда электрические потери при холостом ходе больше магнитных потерь, справедливо неравенство

(A.28)

Когда же магнитные потери при холостом ходе выше электрических потерь, имеет место другое неравенство

(A.29)

И в случае (A.28), и в случае (A.29) ошибка в определении механических потерь больше, чем при условии (A.27). При этом необходимо отметить, что рассчитанные по показаниям приборов (амперметра и вольтметра) механические потери всегда больше реального их значения на сумму электрических и магнитных потерь в испытуемом электродвигателе.

В современных мощных тяговых электродвигателях постоянного и пульсирующего тока, как правило, при длительном и часовом режиме выполняется условие (A.29). Но отклонение от условия (A.27) при этом незначительно. Для двигателей малой мощности с самовентиляцией и большой долей механических потерь отклонение от условия (A.27) при испытании с последовательным возбуждением может быть существенным.

Уменьшение ошибки в определении механических потерь в электродвигателях с большим коэффициентом магнитного насыщения и высокой долей магнитных потерь при номинальном режиме может быть достигнуто путём шунтирования обмотки возбуждения.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Особенности работы систем взаимного нагружения тяговых электрических машин при расхождении их магнитных характеристик

Главной особенностью режима взаимного нагружения однотипных электромашин с расходящимися магнитными характеристиками [10] является наличие дополнительной небалансной электромагнитной мощности электромашин. Наличие такой составляющей небалансной электромагнитной мощности в системах взаимного нагружения с двумя источниками мощности приводит к перераспределению энергетических потоков между ними [48]. Такое перераспределение энергетических потоков требует дополнительного запаса мощности источников [12].

Существует четыре принципиально отличных варианта системы взаимного нагружения с двумя источниками мощности [13]:

- компенсация электрических потерь источником электрической мощности, а потерь холостого хода – источником механической мощности;
- компенсация электрических потерь и потерь холостого хода двумя отдельными источниками электрической мощности;
- компенсация электрических потерь и потерь холостого хода двумя отдельными источниками механической мощности;
- компенсация электрических потерь источником механической мощности, а потерь холостого хода – источником электрической мощности.

Б.1 Компенсация электрических потерь источником электрической мощности, а потерь холостого хода – источником механической мощности

Рассмотрим характер распределения мощности между источниками стэнда взаимной нагрузки с механическим способом компенсации потерь холостого хода внешним источником момента и электрическим способом компенсации электрических потерь источником напряжения. Схема такого стэнда приведена на рис. Б.1.

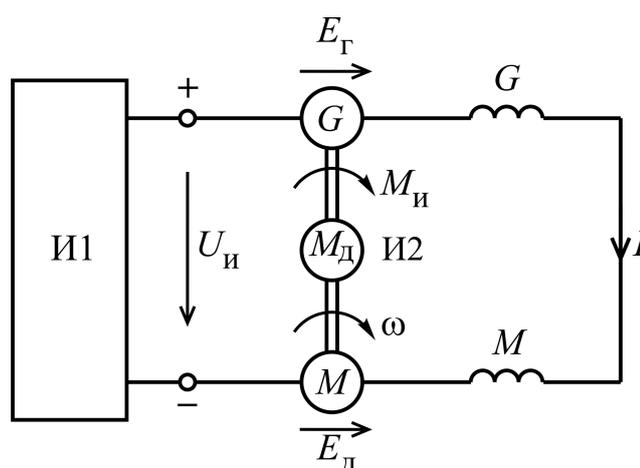


Рисунок Б.1 – Схема взаимной нагрузки с механическим способом компенсации потерь холостого хода

В статическом режиме взаимное нагружение для данной схемы описывается системой уравнений баланса напряжений и моментов:

(Б.1)

где U_1 – напряжение на выходе источника И1;
 M_1, M_2 – электродвижущие силы вращения испытуемых двигателя и генератора соответственно;
 ΔU – суммарное падение напряжений в электрической цепи;
 M_3 – момент дополнительного источника И2;
 M_{d1}, M_{d2} – электромагнитные моменты испытуемых двигателя и генератора соответственно;
 M_{d0} – суммарный момент сопротивления вращению, обусловленный потерями холостого хода в испытуемых электромашинах.
 Суммарное падение напряжений в электрической цепи данной схемы

где I_0 – ток нагрузки испытуемых электромашин;

R_{Σ} – суммарное активное сопротивление электрической цепи.

Способы компенсации потерь мощности в данном варианте схемы взаимного нагружения – прямые. В случае полного совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин их электромагнитные мощности равны между собой. Потребные полезные мощности P_{d1} и P_{d2} источников И1 и И2 соответственно для данного условия:

$$P_{d1} = M_1 \omega_1; \quad (Б.2)$$

$$P_{d2} = M_2 \omega_2; \quad (Б.3)$$

где P_{d0} – суммарные потери холостого хода и электрические потери соответственно.

В случае расхождения магнитных характеристик испытуемых электромашин [42, 49] выражения для определения потребных мощностей источников И1 и И2 будут иметь вид, отличный от (Б.2) и (Б.3). Найдем данные выражения, умножив обе части первого и второго уравнений системы (Б.1) на ω_1 и ω_2 соответственно.

(Б.4)

Учитывая, что $P_{\text{нб}}$, а $P_{\text{д}}$, после преобразований уравнений системы (Б.4) получим:

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д}} + P_{\text{нб}}; \quad (Б.5)$$

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д}} + P_{\text{нб}}; \quad (Б.6)$$

где $P_{\text{нб}}$ – небалансная электромагнитная мощность испытуемых электромашин, обусловленная расхождением их магнитных характеристик.

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д}} + P_{\text{нб}}; \quad (Б.7)$$

где $P_{\text{д}}$, $P_{\text{г}}$ – электромагнитные мощности двигателя и генератора соответственно.

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д}} + P_{\text{нб}}; \quad (Б.8)$$

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д}} + P_{\text{нб}}. \quad (Б.9)$$

Тогда выражение для $P_{\text{д}}$ принимает вид

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д}} + P_{\text{нб}}; \quad (Б.10)$$

где $P_{\text{нб}}$ – небалансная э. д. с. испытуемых электромашин.

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д}} + P_{\text{нб}}. \quad (Б.11)$$

Сложив выражения (Б.5) и (Б.6), получим уравнения баланса мощностей в виде

$$P_{\text{д}} = P_{\text{д}} + P_{\text{нб}}. \quad (Б.12)$$

Б.2 Компенсация электрических потерь и потерь холостого хода двумя отдельными источниками электрической мощности

Рассмотрим характер распределения мощностей между источниками стенда взаимной нагрузки с электрическим способом компенсации и потерь

холостого, и электрических потерь. Схема такого стенда приведена на рис. Б.2.

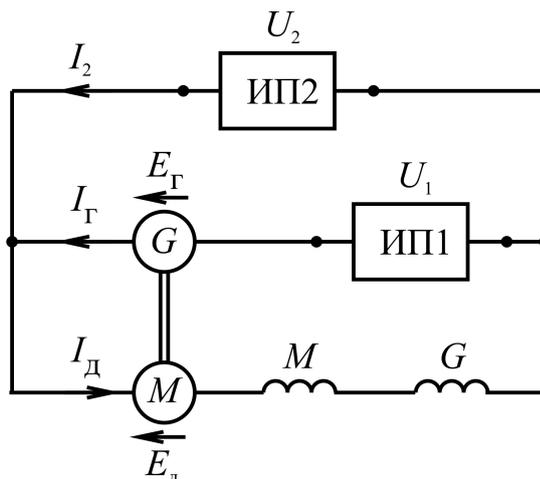


Рисунок Б.2 - Схема взаимного нагружения с компенсацией потерь холостого хода и электрических потерь двумя отдельными источниками электрической мощности

Установившийся режим работы схемы может быть описан системой уравнений:

где U_1 , U_2 – напряжения на выходах источников питания ИП1 и ИП2 соответственно;

E_G , E_d – электродвижущие силы испытуемых двигателя и генератора соответственно;

I_G , I_d – токи испытуемых двигателя и генератора соответственно;

I_2 – ток источника питания ИП2;

M , G – электромагнитные моменты двигателя и генератора соответственно;

ΣM – суммарный момент сопротивления вращению, обусловленный потерями холостого хода в испытуемых электромашинах;

, – электрические сопротивления ветвей испытуемых генератора и двигателя соответственно.

Электродвижущие силы испытуемых электромашин:

$$; \quad (Б.17)$$

$$, \quad (Б.18)$$

где – конструктивная постоянная одноступенчатых испытуемых электромашин;

, – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно;
– угловая скорость роторов электромашин.

Электрические сопротивления ветвей генератора и двигателя:

$$; \quad (Б.19)$$

$$, \quad (Б.20)$$

где , – сопротивления якорных цепей двигателя и генератора соответственно;

, – сопротивления обмоток возбуждения двигателя и генератора соответственно.

Электромагнитные моменты испытуемых электромашин:

$$; \quad (Б.21)$$

$$. \quad (Б.22)$$

Выражения (Б.13)-(Б.15) являются уравнениями электрического баланса схемы, а выражение (Б.16) – уравнением механического равновесия системы. Механические и магнитные потери в стенде взаимной нагрузки компенсируются за счет разницы электромагнитных мощностей испытуемого двигателя и генератора [9].

Для установившегося режима условие такой компенсации будет описываться уравнением

$$, \quad (Б.23)$$

где – суммарные механические и магнитные потери мощностей в испытуемых электромашинах;

, – электромагнитные мощности двигателя и генератора соответственно.

$$; \quad (Б.24)$$

$$\dots \quad (Б.25)$$

Определим потребные полезные мощности и источников ИП1 и ИП2 соответственно для установившегося режима работы стенда взаимной нагрузки.

$$\dots; \quad (Б.26)$$

$$\dots \quad (Б.27)$$

Мощность источника ИП1 может быть определена из уравнения (Б.13). Умножив обе части уравнения на \dots , после преобразования получим выражение для мощности этого источника по формуле (Б.26) в виде

$$\dots, \quad (Б.28)$$

где \dots – разность электродвижущих сил двигателя и генератора

Введем дополнительное обозначение

$$\dots \quad (Б.29)$$

Тогда формула (Б.28) может быть представлена в упрощенном виде

$$\dots \quad (Б.30)$$

Заметим, что \dots – это электрические потери в стенде, вызванные протеканием тока источника ИП1.

Мощность источника ИП2 получим по формуле (Б.27) с учётом (Б.14) в виде

$$\dots \quad (Б.31)$$

Или с учетом уравнения (Б.15) как

$$\dots \quad (Б.32)$$

Найдем выражение для определения тока \dots . Подставив (Б.24) и (Б.25) в (Б.23), получим уравнение

$$\dots \quad (Б.33)$$

С учетом уравнения (Б.15) после преобразований получим это же выражение в виде

$$\dots \quad (Б.34)$$

Из уравнения (Б.34) найдем выражение для силы тока источника ИП2

$$\dots \quad (Б.35)$$

Мощность источника ИП2 получим по уравнениям (Б.14), (Б.27) и (Б.35) в виде

$$\dots, \quad (Б.36)$$

где \dots – падение напряжения в ветви двигателя, отнесенное к его электродвижущей силе.

Введем дополнительные обозначения:

$$\dots; \quad (Б.37)$$

$$\dots \quad (Б.38)$$

Тогда формулу (Б.36) можно записать в виде

$$\dots \quad (Б.39)$$

Заметим, что \dots – это та часть мощности источника ИП2, которая расходуется на покрытие потерь холостого хода в стенде \dots , а \dots – это та часть мощности источника ИП2, которая идёт на покрытие электрических потерь \dots , вызванных протеканием тока \dots .

$$\dots \quad (Б.40)$$

Для установившегося режима

$$\dots \quad (Б.41)$$

С учетом (Б.41) выражение (Б.36) получим в более наглядном виде

(Б.42)

Уравнение общего баланса мощностей можно получить, сложив левые и правые части выражений (Б.30) и (Б.42).

После преобразования и с учетом новых обозначений получим

(Б.43)

где $\Sigma P_{\text{эл}}$ – суммарные электрические потери в стенде

(Б.44)

Проанализировав уравнения (Б.30), (Б.42) и (Б.43), можно сделать вывод о том, что произведение $\Sigma P_{\text{эл}}$ представляет собой часть небалансной электромагнитной мощности испытуемых электромашин $\Sigma P_{\text{эл}}$, обусловленную расхождением их магнитных характеристик, и, одновременно, – перераспределенную часть потоков мощностей источников питания ИП1 и ИП2.

Б.3 Компенсация электрических потерь и потерь холостого хода двумя отдельными источниками механической мощности

Рассмотрим работу стенда взаимного нагружения с компенсацией потерь холостого хода и электрических потерь двумя отдельными источниками механической мощности. Схема такого стенда приведена на рис . Б.3.

В статическом режиме взаимное нагружение электромашин для данной схемы описывается системой уравнений баланса напряжений и моментов:

(Б.45)

где ω , ω_0 – э. д. с. вращения испытуемого генератора и двигателя соответственно;

$\Sigma U_{\text{эл}}$ – суммарное падение напряжений в электрической цепи;

M_2 – момент дополнительного источника И2;

M_1 , M_2 – электромагнитные моменты испытуемых двигателя и генератора соответственно;

– суммарный момент сопротивления вращению, обусловленный потерями холостого хода, приведенный к валу испытуемого генератора.

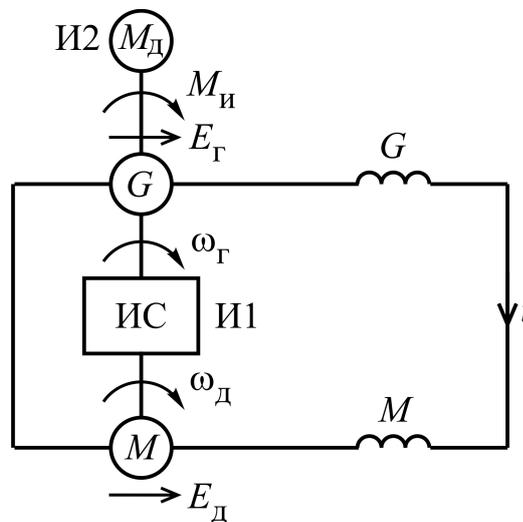


Рисунок Б.3 – Схема взаимного нагружения с компенсацией потерь холостого хода и электрических потерь двумя отдельными источниками механической мощности

Электродвижущие силы вращения испытуемых электромашин [15]:

$$E_{г} = \dots; \quad (Б.46)$$

$$E_{д} = \dots, \quad (Б.47)$$

где \dots – конструктивная постоянная однотипных испытуемых электромашин;
 \dots – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно;
 \dots – угловые скорости вращения якорей двигателя и генератора соответственно.

Для данной системы взаимного нагружения

$$\dots, \quad (Б.48)$$

где \dots – добавка угловой скорости источника скорости И1.

Суммарное падение напряжения в электрической цепи данной схемы

$$\dots, \quad (Б.49)$$

где \dots – ток нагрузки испытуемых электромашин;

\dots – суммарное активное сопротивление электрической цепи.

Электромагнитные моменты испытуемых электромашин

$$; \quad (Б.50)$$

$$. \quad (Б.51)$$

Способ компенсации потерь холостого хода – прямой, а потерь электрических – косвенный. В случае совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин разница электромагнитных мощностей испытуемых электромашин будет обусловлена только разницей угловых скоростей, равной угловой скорости источника .

Потребные полезные мощности и источников И1 и И2 при этом будут

$$; \quad (Б.52)$$

$$, \quad (Б.53)$$

где , – суммарные потери холостого хода и электрические потери соответственно.

Для данной схемы

$$, \quad (Б.54)$$

где , – потери момента при холостом ходе двигателя и генератора соответственно.

Учитывая, что – суммарные потери момента, приведенные к валу испытуемого генератора, суммарные потери мощности при холостом ходе могут быть представлены в виде

$$. \quad (Б.55)$$

Небалансная электромагнитная мощность испытуемых электромашин при совпадении их магнитных характеристик

$$, \quad (Б.56)$$

где – общее значение магнитного потока испытуемых двигателя и генератора.

Для данного случая (совпадения характеристик)

$$. \quad (Б.57)$$

Определим выражения для мощностей источников $P_{\text{дв}}$ и $P_{\text{ген}}$ при условии расхождения магнитных характеристик испытуемых электромашин

$$P_{\text{дв}} = \dots \quad (\text{Б.58})$$

Разницу магнитных потоков двигателя и генератора будем рассматривать в виде

$$\Delta \Phi = \dots \quad (\text{Б.59})$$

Система уравнений (Б.45) для случая расхождения магнитных характеристик будет иметь вид

$$\dots \quad (\text{Б.60})$$

Умножив левую и правую части первого уравнения системы (Б.60) на $\Delta \Phi$ и те же части второго уравнения – на $\Delta \Phi$, получим систему уравнений баланса мощностей в виде:

$$\dots \quad (\text{Б.61})$$

где ΔM – разность электромагнитных моментов испытуемого двигателя и генератора.

$$\dots \quad (\text{Б.62})$$

Нетрудно убедиться, что первое уравнение системы (Б.61) может быть преобразовано к виду

$$\dots \quad (\text{Б.63})$$

Тогда выражения для мощностей источников будут иметь вид:

$$P_{\text{дв}} = \dots; \quad (\text{Б.64})$$

$$P_{\text{ген}} = \dots \quad (\text{Б.65})$$

Небалансная электромагнитная мощность испытуемых электромашин при расхождении их магнитных характеристик имеет две составляющие

(Б.66)

или

(Б.67)

где – часть небалансной электромагнитной мощности, обусловленная разностью угловых скоростей ;

– часть небалансной электромагнитной мощности, обусловленная расхождением магнитных характеристик

(Б.68)

(Б.69)

Тогда выражения для необходимых мощностей источников будут иметь вид

(Б.70)

(Б.71)

Б.4 Компенсация электрических потерь источником механической мощности, а потерь холостого хода – источником электрической мощности

Рассмотрим работу стенда взаимной нагрузки с электрическим способом компенсации потерь холостого хода и механическим способом компенсации электрических потерь. Схема такого стенда приведена на рис. Б.4.

В статическом режиме взаимное нагружение для данной схемы описывается системой уравнений баланса напряжений и моментов:

(Б.72)

где , и – токи двигателя, генератора и источника соответственно; , – электродвижущие силы вращения генератора и двигателя соответственно;

– суммарное падение напряжений в контуре обмоток электромашин;

;

(Б.77)

где R_1 , R_2 – сопротивления якорных цепей двигателя и генератора соответственно;

R_{f1} , R_{f2} – сопротивления обмоток возбуждения двигателя и генератора соответственно.

Электромагнитные моменты испытуемых электромашин

;

(Б.78)

.

(Б.79)

Способ компенсации потерь холостого хода и электрических потерь в данной схеме – косвенные.

При совпадении магнитных характеристик испытуемых электромашин:

;

(Б.80)

,

(Б.81)

где $P_{\text{нб}}$ – небалансная электромагнитная мощность испытуемых электромашин;

$P_{\text{хх}}$ – суммарные потери холостого хода;

$P_{\text{эл}}$ – суммарные электрические потери.

,

(Б.82)

где $P_{\text{эм1}}$, $P_{\text{эм2}}$ – электромагнитные мощности испытуемых двигателя и генератора соответственно.

;

(Б.83)

,

(Б.84)

где $\Delta \Phi$ – расхождение магнитных потоков.

.

(Б.85)

Суммарные потери момента

$$, \quad (B.86)$$

где ΔM_1 и ΔM_2 – потери момента, обусловленные потерями холостого хода в двигателе и генераторе соответственно.

Значения ΔM_1 и ΔM_2 зависят от частот вращения якорей n_1 и n_2 , а также от магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 . Для данного случая обе пары значений данных параметров различаются:

$$\Delta M_1 = \dots; \quad (B.87)$$

$$\Delta M_2 = \dots. \quad (B.88)$$

Умножив обе части выражения (B.83) на ω_1 , после преобразований получим

$$\dots. \quad (B.89)$$

Мощность источника И1 может быть определена по формуле

$$\dots. \quad (B.90)$$

Тогда, с учётом уравнения (B.89), это же выражение можно записать в виде

$$\dots. \quad (B.91)$$

Произведение $\Delta M_1 \omega_1$ представляет собой часть потерь холостого хода, которая обусловлена повышением частоты вращения якоря генератора на величину Δn_1 .

Слагаемое $\Delta M_2 \omega_2$ представляет собой часть небалансной электромагнитной мощности испытуемых двигателя и генератора, обусловленную разницей их магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 .

Умножив обе части выражения (B.84) на ω_2 , после преобразования получим

$$\dots. \quad (B.92)$$

Мощность источника И2 может быть определена по формуле

$$\dots. \quad (B.93)$$

Тогда, с учётом выражения (B.92), это же выражение можно записать в виде

(Б.94)

Произведение $\sum_{k=1}^n \dot{U}_k \dot{I}_k$ представляет собой часть электрических потерь, которая обусловлена протеканием тока \dot{I}_k в ветви цепи.

Слагаемое $\sum_{k=1}^n \dot{U}_k \dot{I}_k$, как и в (Б.91), представляет собой часть небалансной электромагнитной мощности двигателя и генератора, обусловленную разницей их магнитных потоков $\dot{\Phi}_k$.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Статистический анализ отклонения магнитных характеристик тяговых электрических двигателей

Целью данного анализа являлось определение распределения относительных отклонений частот вращения испытуемых тяговых электродвигателей, соответствующих часовому режиму, от частоты вращения, установленной по типовой характеристике.

Отклонения частот вращения при часовом режиме от типовых значений определяются расхождением реальных магнитных характеристик испытуемых тяговых электромашин с типовой магнитной характеристикой в точке, соответствующей часовому току и номинальному напряжению.

В соответствии с ГОСТ 2582-81 [25] при испытании тяговых электромашин определяются отклонения частот от типового значения при вращении в обе стороны, а также разность между указанными частотами вращения.

Относительное отклонение частоты вращения в условном положительном направлении от часового типового значения определяется в виде

$$\delta_{\text{п}} = \frac{f_{\text{п}} - f_{\text{тп}}}{f_{\text{тп}}}, \quad (\text{В.1})$$

где $f_{\text{п}}$ – частота вращения в условном положительном направлении при часовом режиме испытания;

$f_{\text{тп}}$ – часовая типовая частота вращения.

Относительное отклонение частоты вращения в условном отрицательном направлении от часового типового значения определяется в виде

$$\delta_{\text{от}} = \frac{f_{\text{от}} - f_{\text{тп}}}{f_{\text{тп}}}, \quad (\text{В.2})$$

где $f_{\text{от}}$ – частота вращения в условном отрицательном направлении при часовом режиме испытания.

Относительная разность между частотами вращения в обоих направлениях при часовом режиме испытания в соответствии с ГОСТ 2582-81 определяется в виде

$$\delta_{\text{р}} = \frac{f_{\text{п}} - f_{\text{от}}}{f_{\text{тп}}}. \quad (\text{В.3})$$

В качестве исходных данных для проведения статистического анализа использовались результаты приемо-сдаточных послеремонтных испытаний тяговых электродвигателей НБ-406, НБ-412 и ТЛ2К [6].

На рис. В.1 – В.9 приведены гистограммы распределения относительных отклонений δ , $\delta_{\text{ср}}$ и относительной разницы $\delta_{\text{р}}$, рассчитанные по формулам (В.1) – (В.3). Параметр F на гистограммах представляет собой абсолютную частоту попадания рассматриваемых величин в соответствующие интервалы. Сплошными тонкими линиями на гистограммах показано теоретическое нормальное распределение рассматриваемых параметров (абсолютные частоты), полученное по действительным значениям их математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений. В табл. В.1 приведены значения математических ожиданий рассматриваемых относительных отклонений для каждого типа тягового электродвигателя.

Таблица В.1 – Значения математических ожиданий относительных отклонений и разности частот вращений

| Тип ТЭД | Математические ожидания относительных отклонений, % | | |
|---------|---|----------------------|---------------------|
| | δ | $\delta_{\text{ср}}$ | $\delta_{\text{р}}$ |
| НБ-406Б | 1,9 | 2,2 | -0,3 |
| НБ-412К | -0,28 | -0,07 | -0,2 |
| ТЛ-2К1 | 2,30 | 1,97 | 0,33 |

Как видно из табл. В.1 и рис. В1 – В9, при послеремонтных приемосдаточных испытаниях тяговых электродвигателей наблюдается устойчивая тенденция к превышению частоты вращения при часовом режиме в сравнении с типовым значением часовой частоты вращения. Это свидетельствует об увеличении сопротивления магнитной цепи тяговых электродвигателей. Такое отклонение может быть следствием как ухудшения магнитных свойств сталей, используемых в магнитной системе, так и некоторым отклонением геометрических параметров магнитной системы.

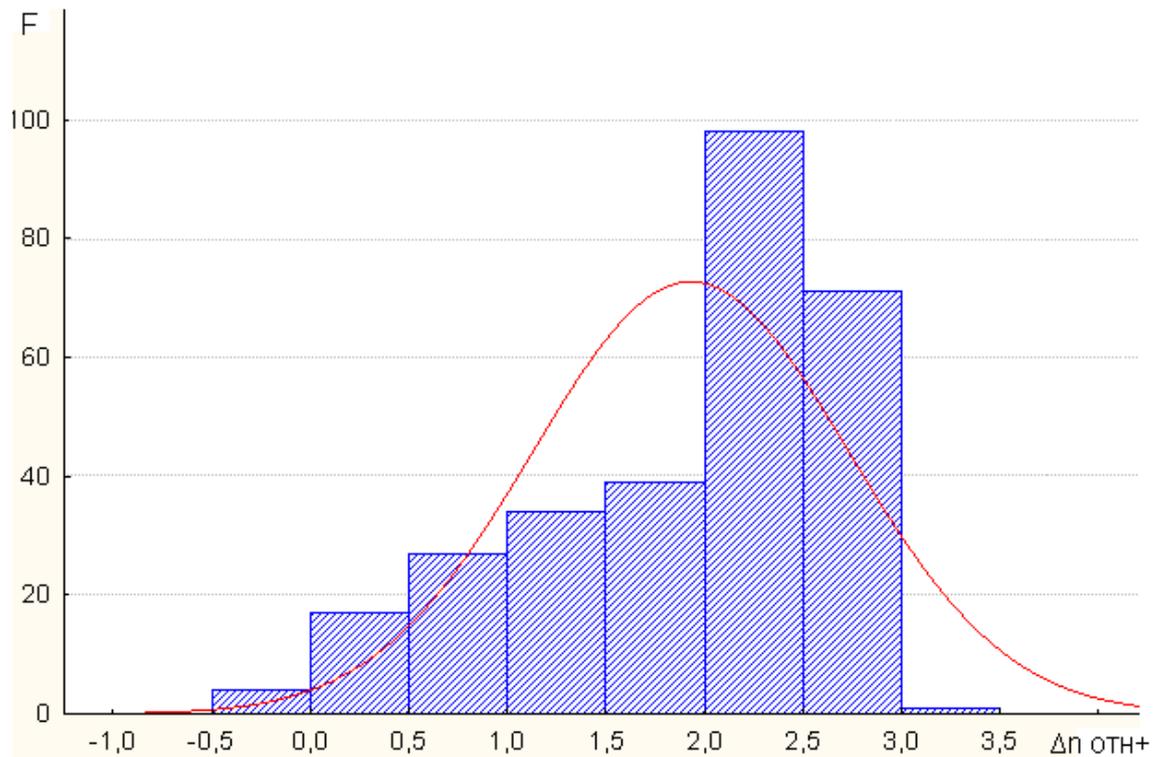


Рисунок В.1 – Распределение относительного отклонения частоты при положительном направлении вращения для ТЭД НБ-406

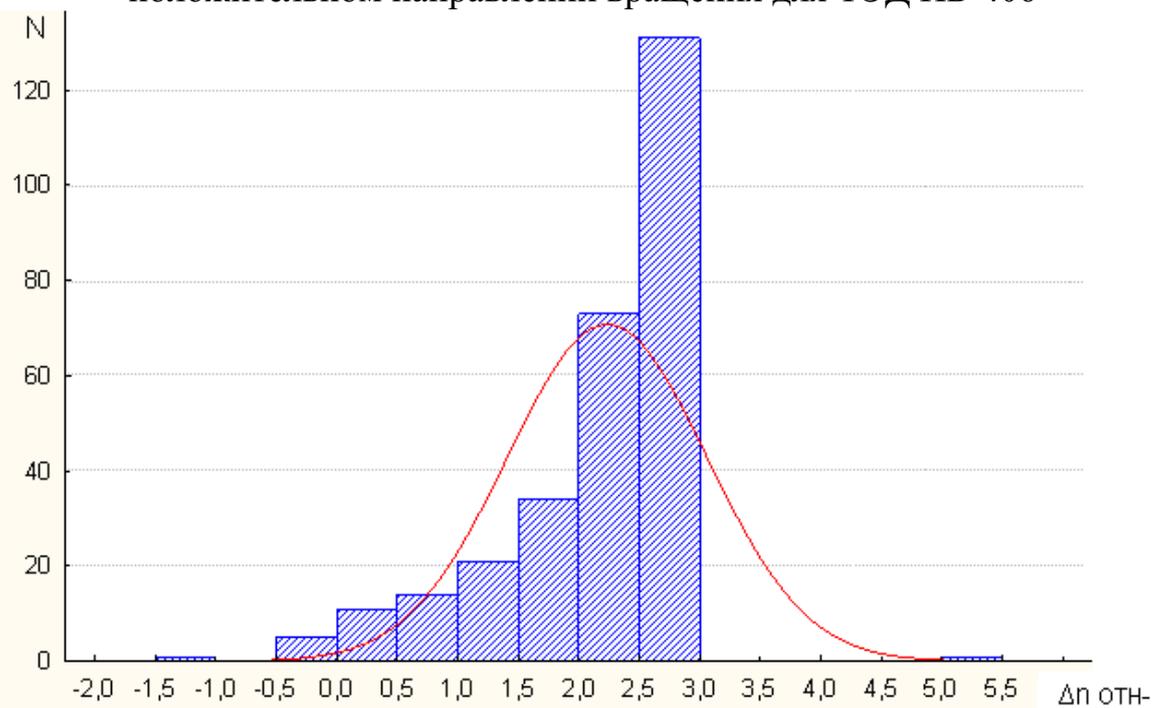


Рисунок В.2 – Распределение относительного отклонения частоты при отрицательном направлении вращения для ТЭД НБ-406

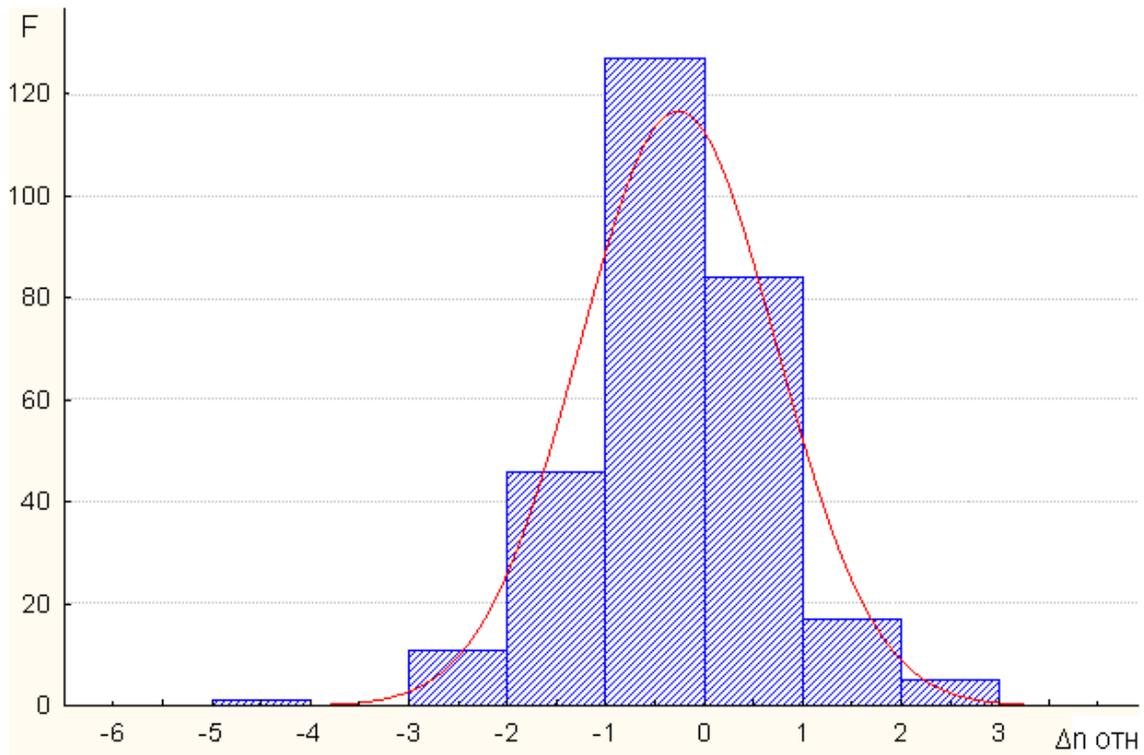


Рисунок В.3 – Распределение относительной разницы частот вращения в двух направлениях для ТЭД НБ-406

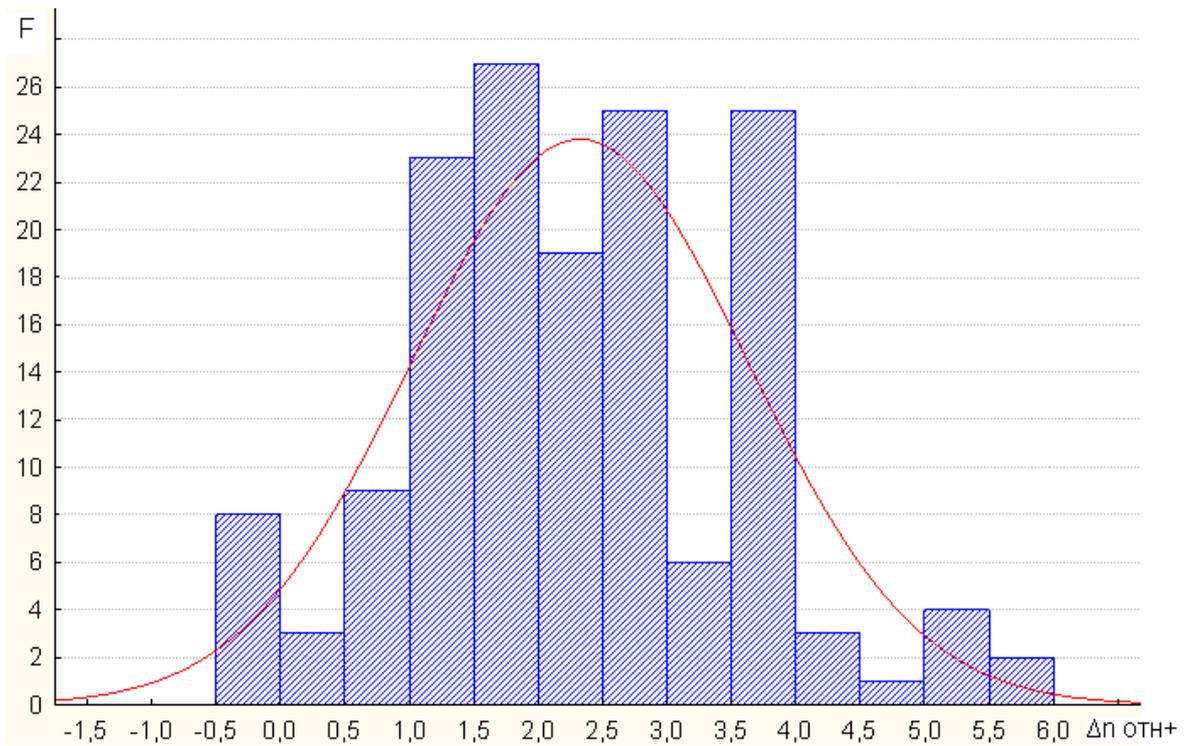


Рисунок В.4 – Распределение относительного отклонения частоты при положительном направлении вращения для ТЭД ТЛ-2К

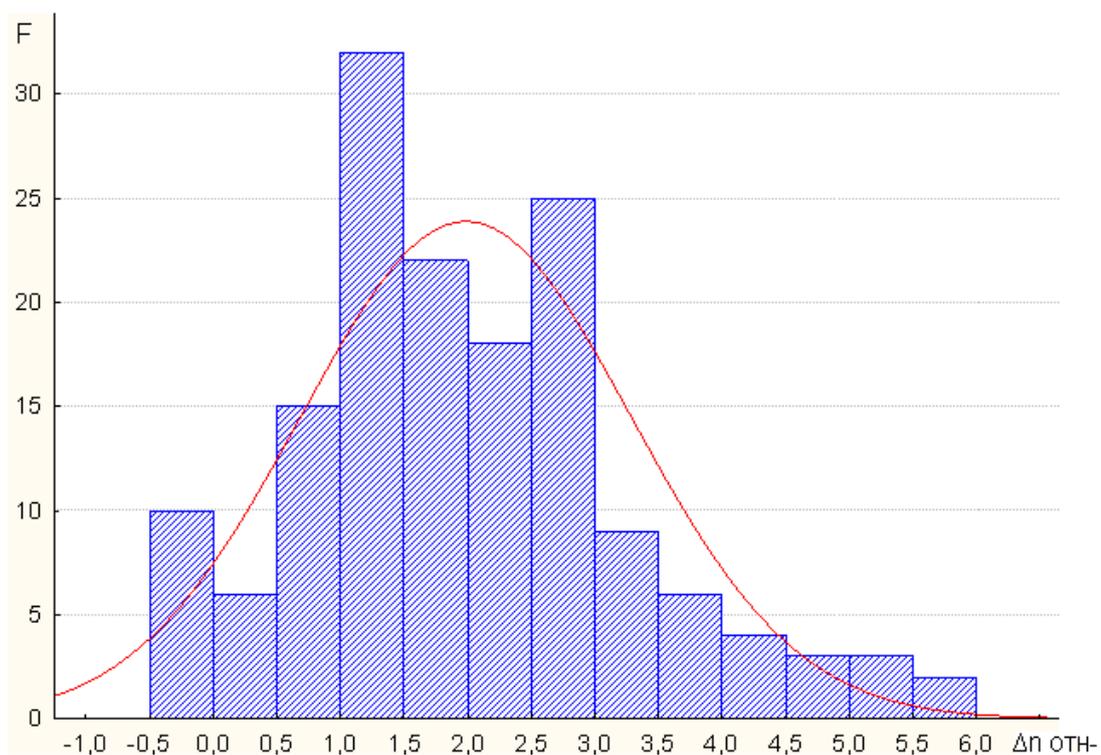


Рисунок В.5 – Распределение относительного отклонения частоты при отрицательном направлении вращения для ТЭД ТЛ-2К

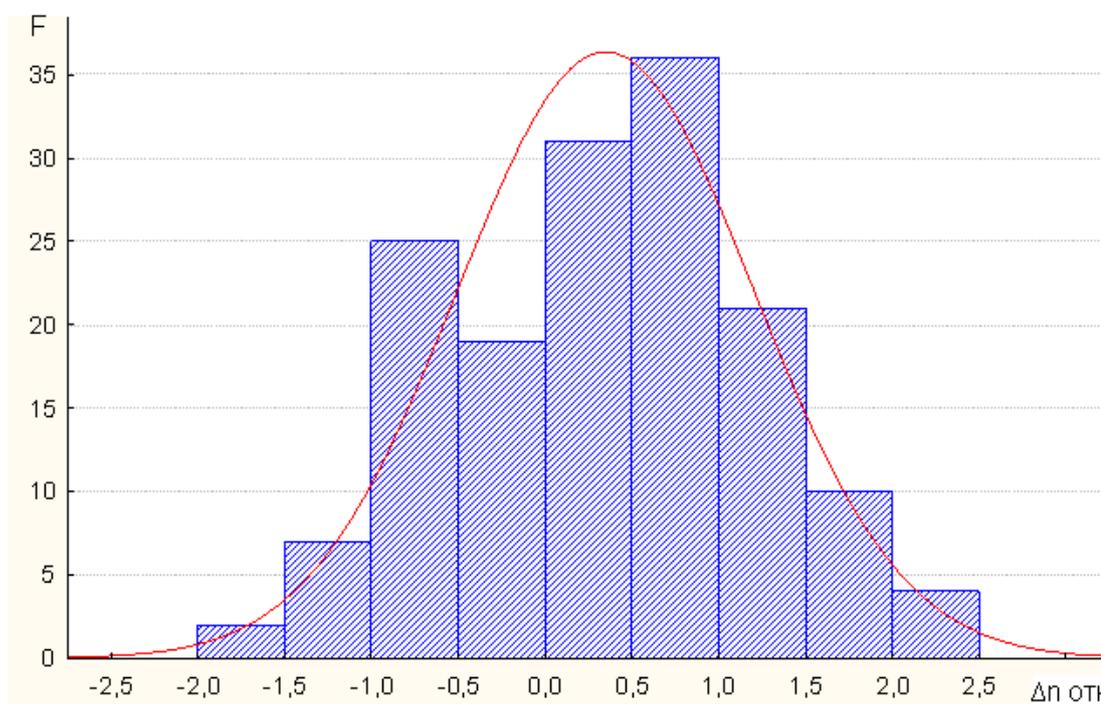


Рисунок В.6 – Распределение относительной разницы частот вращения в двух направлениях для ТЭД ТЛ-2К

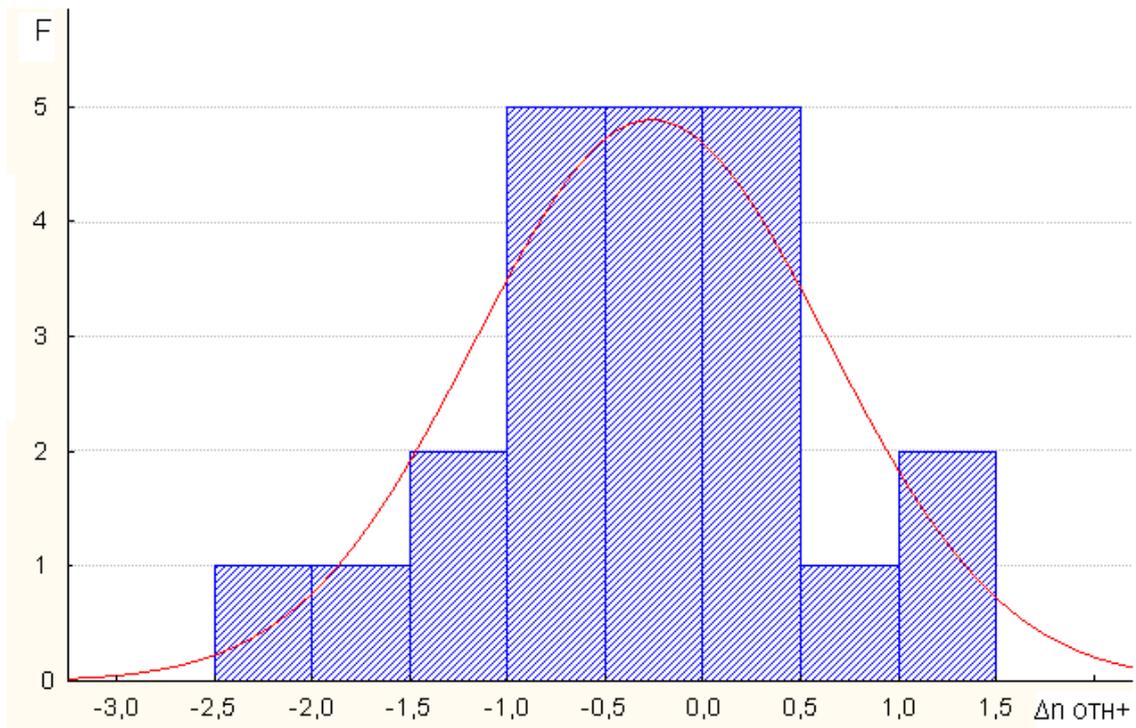


Рисунок В.7 – Распределение относительного отклонения частоты при положительном направлении вращения для ТЭД НБ-412

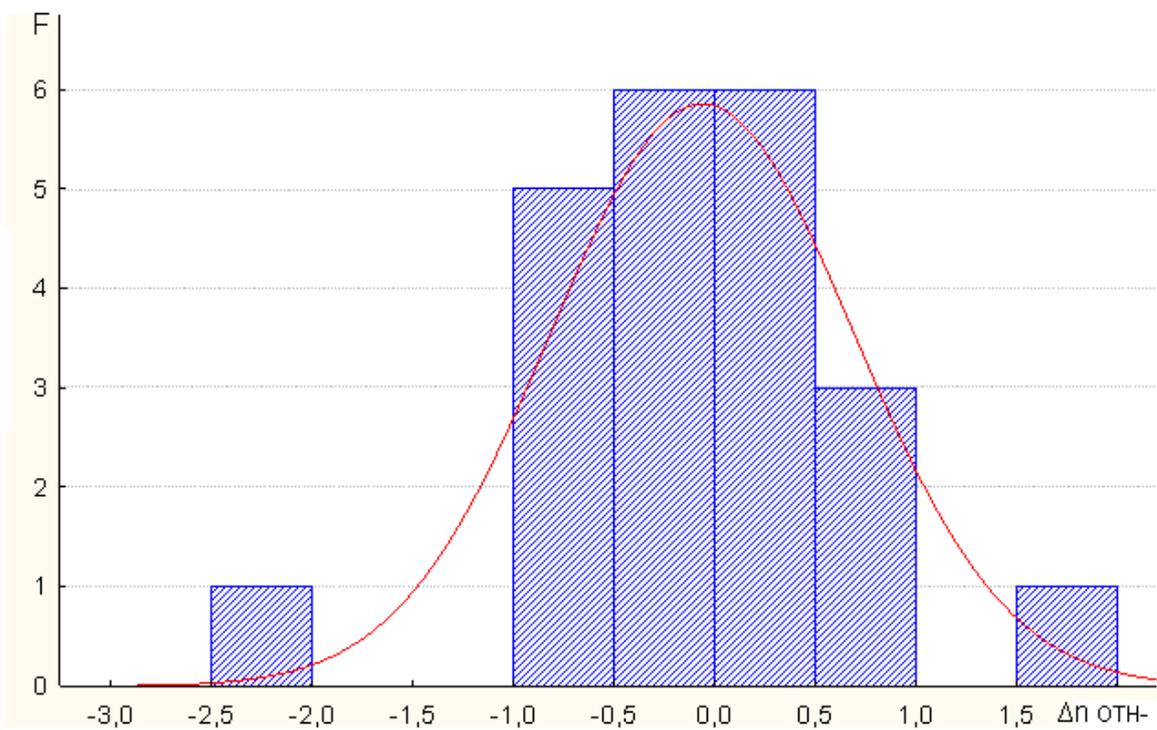


Рисунок В.8 – Распределение относительного отклонения частоты при отрицательном направлении вращения для ТЭД НБ-412

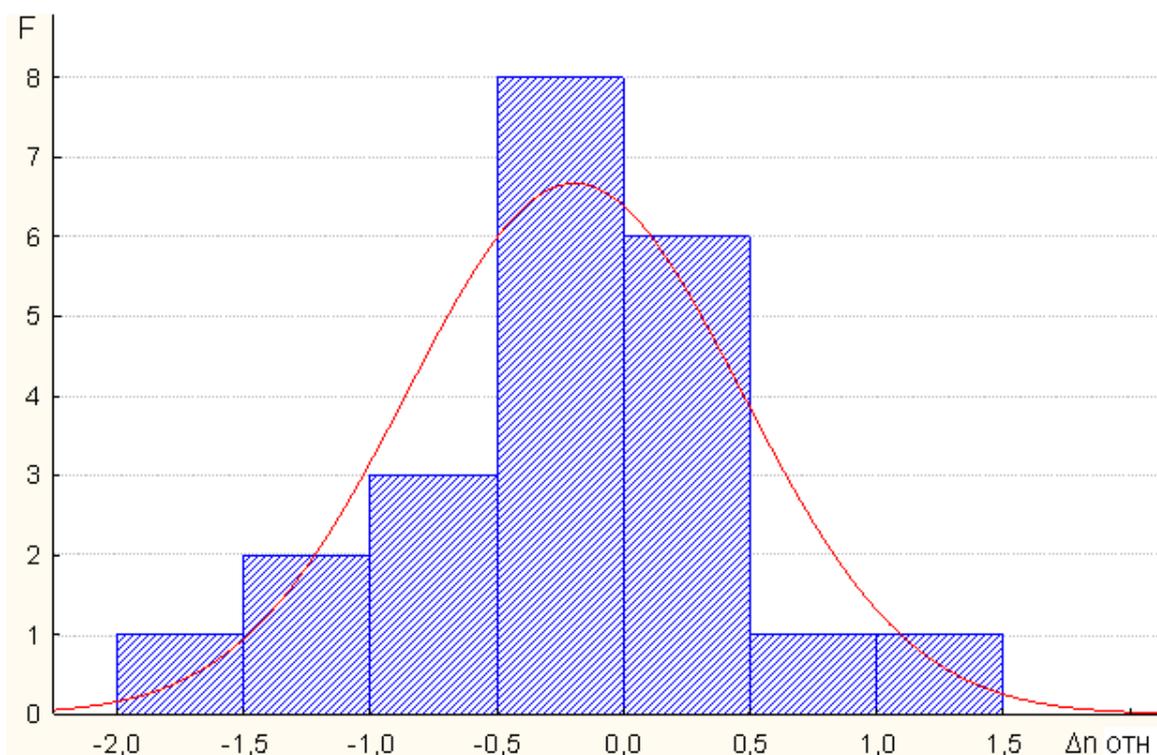


Рисунок В.9 – Распределение относительной разницы частот вращения в двух направлениях для ТЭД НБ-412

Распределения относительной разности частот вращения в двух направлениях имеет вид, очень близкий к нормальному, с математическим ожиданием, практически равным нулю. Это подтверждает естественный характер разброса абсолютной разности этих частот, которая определяется несимметричностью магнитной цепи испытуемых тяговых электродвигателей.

Результаты статистического анализа подтверждают реальную вероятность попадания в пару испытуемых на стенде взаимной нагрузки тяговых электромашин с расхождением магнитных характеристик до 6 % при часовом режиме нагружения.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Моделирование расхождения магнитных характеристик взаимно
нагруженных тяговых электромашин

Целью данного исследования являлось экспериментальное определение влияния степени расхождения магнитных характеристик взаимно нагруженных однопольных тяговых двигателей электроподвижного состава на распределение мощностей источников питания системы взаимного нагружения.

Принципиальная электрическая схема испытательного стенда приведена на рис. Г.1. Схема включает два источника электрической мощности: ВДМ (вольтодобавочная машина) и ЛГ (линейный генератор), испытуемые электромашины M (двигатель) и G (генератор), шунтирующие резисторы R_1, R_2, R_0 , коммутирующие элементы K_1, K_2, K_3, K_4 .

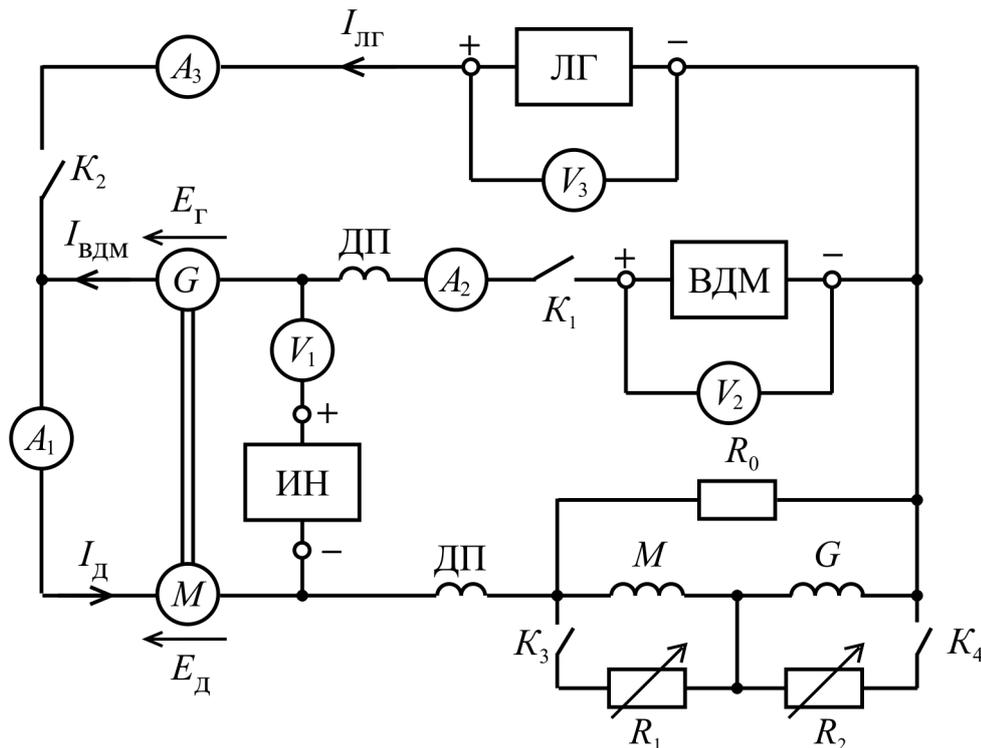


Рисунок Г.1 – Принципиальная схема испытательного стенда

В качестве испытуемых электромашин использованы тяговые двигатели пульсирующего тока РТ-51Д электропоезда ЭР9. Особенностью данных тяговых двигателей является то, что коэффициент ослабления поля в номинальном режиме для них принят $0,5$. И испытание данных тяговых двигателей на стенде взаимной нагрузки проводится с шунтированием их обмоток возбуждения, обеспечивающим именно это значение коэффициента ослабления поля.

Номинальное ослабление поля $0,5$ в схеме обеспечивается шунтирующим резистором R_0 . Регулируемые резисторы R_1 и R_2 предназначены для физического моделирования расхождения магнитных характеристик испытуемых методом взаимного нагружения двигателя M и генератора G путем дополнительной отпитки их обмоток возбуждения шунтированием.

Степень искусственно создаваемого расхождения магнитных характеристик испытуемых тяговых двигателей в данной схеме определяется с помощью вольтметра V и дополнительного источника регулируемого постоянного напряжения ИН.

Моделирование расхождения магнитных характеристик проводилось на стенде с предварительно нагретыми тяговыми двигателями (110°C) при часовом режиме нагрузки:

;

Магнитные характеристики тяговых двигателей РТ-51Д на стенде совпадают практически полностью. Для моделирования варианта расхождения характеристик, соответствующего случаю (), используется резистор (контактор замкнут). При моделировании варианта расхождения характеристик с условием () используется резистор (контактор замкнут).

В начале проведения испытания на стенде с предварительно нагретыми тяговыми двигателями включается контактор и устанавливается часовой ток нагрузки . Контакторы и при этом разомкнуты, якоря электромашин неподвижны. Вольтметр V показывает величину падения напряжения в двух якорных обмотках (M и G), щётках и соединительных проводах.

Включением дополнительного источника малой мощности ИН и регулированием его стабилизированного напряжения достигается такое состояние, при котором напряжение ИН полностью компенсирует падение напряжения в цепи якорей испытуемых электромашин. При этом вольтметр V показывает «ноль».

При включении контактора якоря испытуемых электромашин приходят во вращение. Напряжение на линейном генератора ЛГ устанавливается номинальным . Проверяются показания вольтметра и корректируется напряжение источника ИН.

При включении контактора обмотка возбуждения генератора G оказывается зашунтированной на резистор . Путем изменения сопротивления резистора осуществляется регулирование положительных: разности магнитных потоков и разности э. д. с. испытуемых электромашин .

При включении контактора зашунтированной резистором оказывается обмотка возбуждения двигателя M . Путем изменения сопротивления резистора осуществляется регулирование

отрицательных: разности магнитных потоков и разности э. д. с. испытуемых электромашин .

;

При поддержании тока нагрузки показания вольтметра

Относительное расхождение магнитных характеристик испытуемых тяговых двигателей

Испытания по физическому моделированию расхождения магнитных характеристик проводились в диапазоне изменения относительной разности

Такой диапазон изменения соответствует допустимому отклонению относительной частоты вращения якоря в номинальном режиме $\pm 3\%$ или

Мощности источников питания испытательного стенда (ВДМ и ЛГ) определялись по значениям их выходных напряжений и токов:

;

Данные испытаний и результаты расчёта полезных мощностей источников питания испытательного стенда приведены в табл. Г.1.

Таблица Г.1 – Данные эксперимента и результаты расчёта полезных мощностей источников системы взаимной нагрузки

| , В | | , В | , В | , А | , А | , А | , Вт | , Вт | , Вт |
|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|
| 48 | 0,058 | 825 | 170 | -1 | 216 | 215 | -825 | 36720 | 35895 |
| 35 | 0,042 | 825 | 157 | 2 | 213 | 215 | 1650 | 33441 | 35091 |

| | | | | | | | | | |
|-----|--------|-----|-----|----|-----|-----|-------|-------|-------|
| 12 | 0,015 | 825 | 134 | 8 | 207 | 215 | 6600 | 27738 | 34338 |
| 0 | 0,000 | 825 | 122 | 11 | 204 | 215 | 9075 | 24888 | 33963 |
| -15 | -0,018 | 825 | 107 | 15 | 200 | 215 | 12375 | 21400 | 33775 |
| -33 | -0,040 | 825 | 89 | 20 | 195 | 215 | 16500 | 17355 | 33855 |
| -50 | -0,061 | 825 | 72 | 24 | 191 | 215 | 19800 | 13752 | 33552 |

На рис. Г.2 рассчитанные по данным эксперимента зависимости

, и представлены графически.

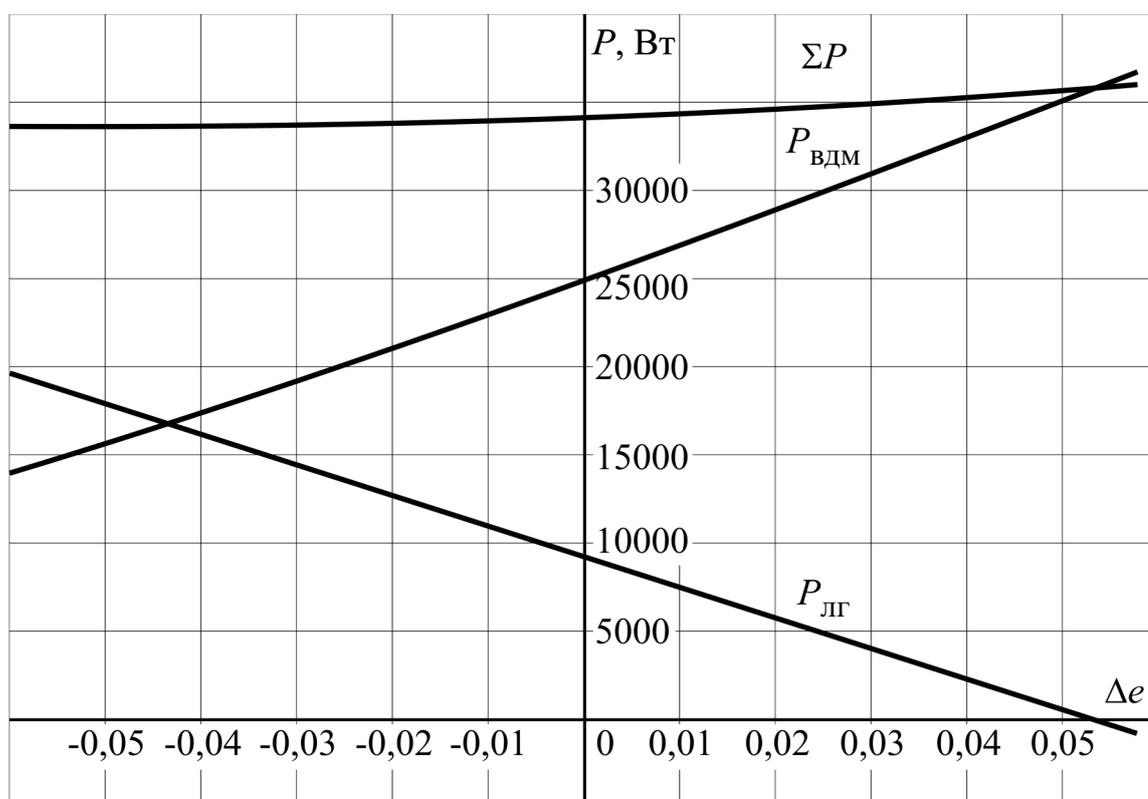


Рисунок Г.2 – Зависимости , и

Из рис. Г.2 видно, что для тяговых двигателей РТ-51Д при проведении испытаний методом взаимного нагружения по схеме с ВДМ и ЛГ при допустимом максимальном расхождении магнитных характеристик пары испытуемых электромашин требуется более чем двукратный запас мощности ЛГ и полуторакратный запас мощности ВДМ. Коэффициент запаса суммарной мощности двух источников стенда взаимной нагрузки (ВДМ и ЛГ) составляет $= 1,7$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Анализ возможных схемных решений источников и преобразователей мощности систем взаимного нагружения тяговых электрических машин

Д.1 Источники электрической мощности

К источникам электрической мощности, которые рассматриваются при синтезе систем взаимного нагружения относятся источники напряжения и источники тока.

Под источниками напряжения подразумевается источник электрической мощности, напряжение на выходе которого стабилизировано или изменяется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от тока).

Под источником тока подразумевается источник электрической мощности, сила тока которого стабилизирована или изменяется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от напряжения).

Схемные решения реальных источников напряжения и тока одинаковы в силовой части и отличаются, как правило, только структурой функциональной схемы системы стабилизации. Обратная связь системы управления источником напряжения выполняется по напряжению, а источника тока – по току. В одном случае используются датчики напряжения, в другом – датчики тока.

Стабилизация силы тока реального источника тока осуществляется системой управления за счёт изменения выходного напряжения. Практически реальный источник тока представляет собой регулятор напряжения, управляемый с помощью обратной связи по величине тока.

Статические источники напряжения

Опыт проектирования силовых преобразователей показывает, что структура статического источника напряжения для систем взаимного нагружения может иметь целый ряд вариантов, рациональность которых будет определяться мощностью источника, уровнем и допустимыми пульсациями напряжения на его выходе.

Наиболее приемлемым для питания систем взаимного нагружения будут варианты источника напряжения, структурные схемы которых представлены на рис. Д.1-Д.5.

Вариант 1 (рис. Д.1) характерен тем, что источник напряжения ИН (объединен пунктиром) включает в себя соединенные последовательно трёхфазный трансформатор Т и управляемый трёхфазный выпрямитель УВ. Вход трансформатора Т является входом источника ИН и соединён с сетью С, а выход выпрямителя УВ является выходом источника ИН, к которому и подключена система взаимного нагружения СВН. Регулирование выходного напряжения осуществляется управляемым выпрямителем УВ.

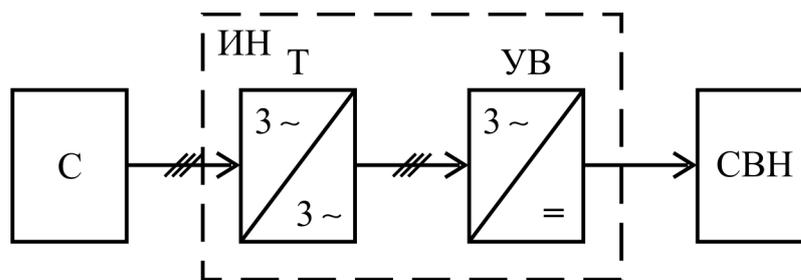


Рисунок Д.1 – Структурная схема источника напряжения с трехфазным трансформатором и управляемым выпрямителем

В варианте 2 (рис. Д.2) в отличие от варианта 1 отсутствует трехфазный трансформатор и управляемый трехфазный выпрямитель УВ подключен к сети С непосредственно.

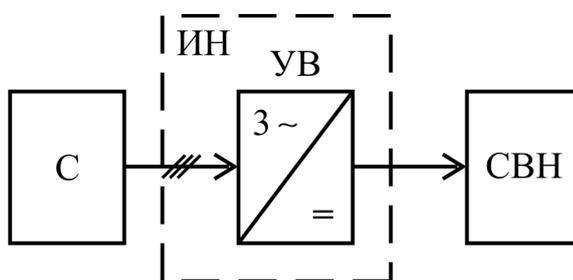


Рисунок Д.2 – Структурная схема источника напряжения с трехфазным управляемым выпрямителем

Вариант 3 (рис. Д.3) представляет собой структуру, содержащую последовательно соединенные трехфазный трансформатор Т, нерегулируемый трёхфазный выпрямитель НВ и импульсный регулятор ИР. Регулирование выходного напряжения в данном варианте схемы осуществляется импульсным регулятором ИР.

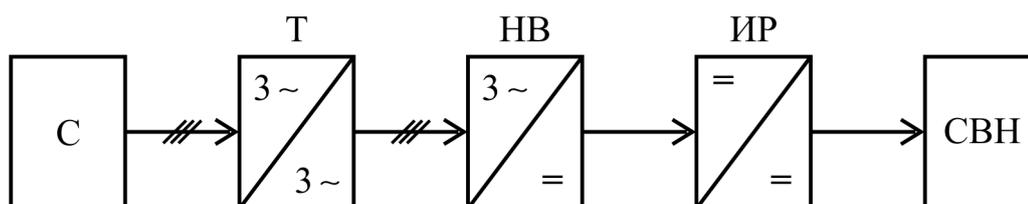


Рисунок Д.3 – Структурная схема источника напряжения с трехфазным трансформатором, выпрямителем и импульсным регулятором

В варианте 4 (рис. Д.4) в отличие от варианта 3 отсутствует трехфазный трансформатор и неуправляемый трехфазный выпрямитель НВ подключен непосредственно к сети С.

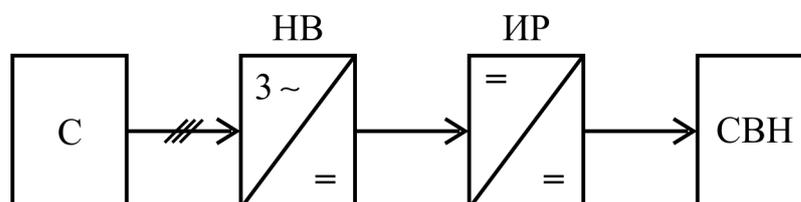


Рисунок Д.4 – Структурная схема источника напряжения с трехфазным выпрямителем и импульсным регулятором

Вариант 5 (рис. Д.5) представляет собой достаточно распространённую в настоящее время структуру, включающую в себя промежуточное звено переменного тока высокой частоты. Схема содержит трёхфазный выпрямитель (управляемый УВ или неуправляемый НВ), высокочастотный инвертор напряжения ИН, высокочастотный трансформатор Т и высокочастотный выпрямитель (неуправляемый НВ или управляемый УВ).

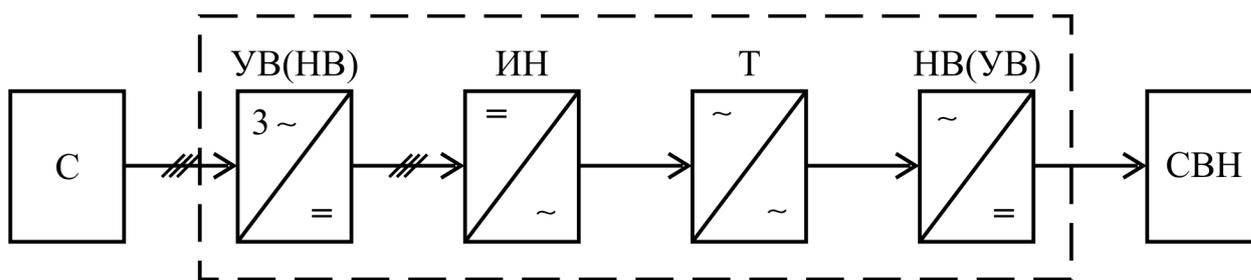


Рисунок Д.5 – Структурная схема источника напряжения с промежуточным звеном переменного тока высокой частоты

Одним из наиболее важных параметров, определяющих и структуру и характеристики статического источника напряжения ИН, является отношение выходного напряжения источника к входному напряжению сети. Величина этого отношения определяет необходимость (или отсутствие таковой) использования трансформатора Т в структуре источника ИН и скважность импульсов импульсного регулятора ИР. Трёхфазный трансформатор является дополнительным преобразователем, наличие которого повышает себестоимость источника и снижает его коэффициент полезного действия.

Скважность импульсов регулятора ИР влияет на степень пульсации тока источника, определяет параметры силового ключа регулятора и его выходного фильтра, которые, в свою очередь, влияют на себестоимость всего источника напряжения ИН.

Электромашинные источники напряжения

Под электромашинными источниками напряжения будем понимать агрегированные приводной двигатель и электрический генератор. В связи с тем, что базовым источником энергии является трёхфазная сеть переменного тока, в качестве приводного двигателя будем рассматривать только асинхронные электромашинные промышленного назначения. Это могут быть асинхронные двигатели, как с короткозамкнутым, так и фазным ротором. В качестве генератора будем рассматривать наиболее подходящие варианты: генератор постоянного напряжения с независимым возбуждением и синхронный трёхфазный генератор с трёхфазным нерегулируемым

выпрямителем. Схема электромашинного преобразователя с генератором постоянного тока приведена на рис Д.6.

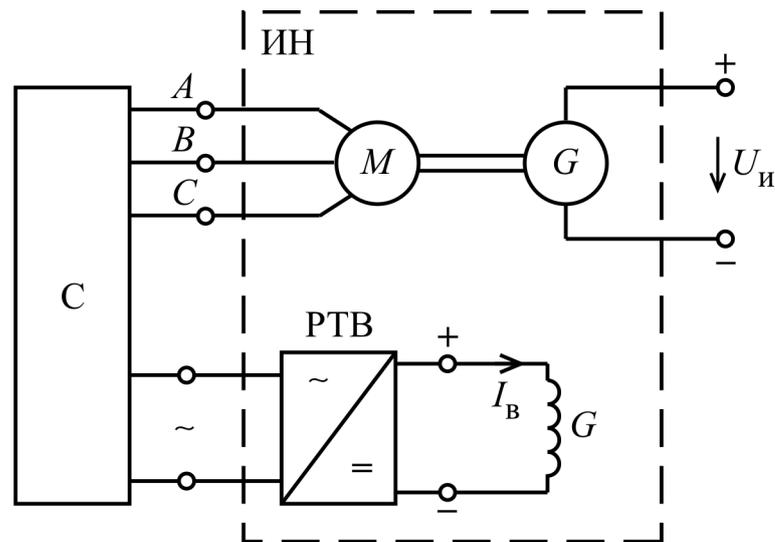


Рисунок Д.6 – Схема электромашинного преобразователя с генератором постоянного тока

Асинхронный двигатель М подключен к сети трёхфазного напряжения. его вал соединен с валом генератора постоянного напряжения G, обмотка возбуждения которого питается от регулятора тока возбуждения РТВ.

Регулятор тока возбуждения РТВ питается от сети трёхфазным либо однофазным переменным напряжением. Данное устройство, как правило, представляет собой трёхфазный либо однофазный управляемый выпрямитель.

Такая схема источника напряжения в настоящее время является наиболее распространенной в системах взаимного нагружения.

К преимуществам данной схемы компоновки источника относятся:

- относительная простота силовой части;
- высокая перегрузочная способность.

Недостатками данного варианта являются:

- повышенная зашумлённость;
- относительная сложность подбора типа генератора с соответствующими номинальными данными.

Опыт использования такой компоновки источников напряжения на испытательных станциях показывает, что последний из недостатков настолько существенный, что является определяющим в сравнении электромашинных преобразователей со статическими. Невозможность подбора генератора с требуемыми номинальными параметрами вынуждает использовать в системах взаимного нагружения в качестве источников питания электромашин, однотипные с испытываемыми. Такая ситуация, в конечном счёте, приводит к многократному завышению суммарной мощности всех вспомогательных электромашин и к существенному

снижению энергетической эффективности испытательного стенда.

Из-за использования в качестве генераторов тяговых электромашин последовательного возбуждения источники питания их обмоток возбуждения выполняются низковольтными и сильноточными и, как правило, также электромашинными.

Схема электромашинного преобразователя с синхронным генератором приведена на рис. Д.7. Асинхронный двигатель M , подключенный к сети C , своим валом соединен с валом синхронного генератора G , к выходу которого подключен трехфазный неуправляемый выпрямитель. Обмотка возбуждения генератора G питается от регулятора тока возбуждения РТВ, который подключен к сети C .

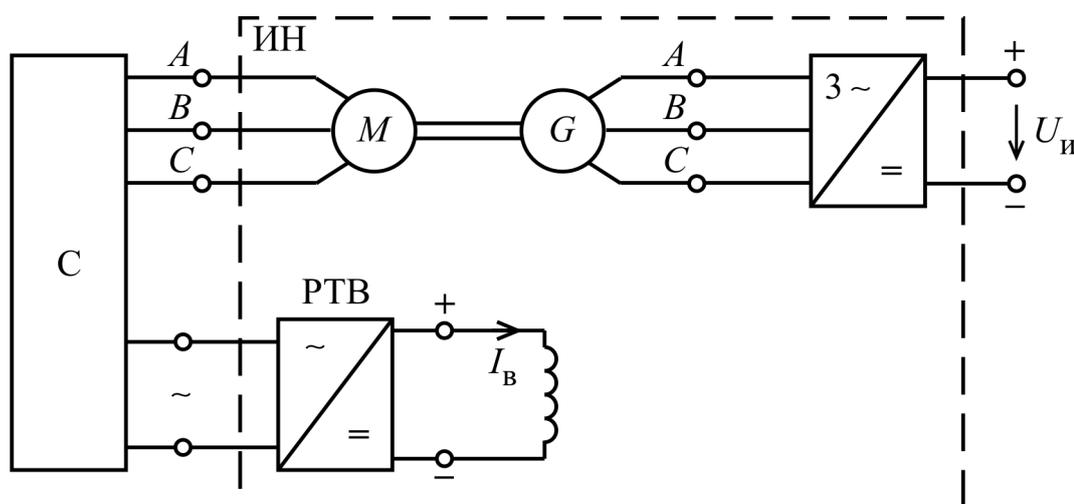


Рисунок Д.7 – Схема электромашинного преобразователя с синхронным генератором

К преимуществам такой схемы компоновки источника напряжения относятся:

- относительная простота силовой части;
- использование бесколлекторных электромашин.

Недостатками данного варианта являются:

- невысокая перегрузочная способность;
- повышенная зашумлённость;
- относительная сложность подбора типа генератора с требуемыми номинальными данными.

Общим недостатком всех вариантов электромашинных преобразователей является существенное снижение их к. п. д. при сильно заниженной нагрузке, что затрудняет унификацию испытательного стенда.

Тем не менее, при точном подборе номинальных параметров генератора электромашинные преобразователи могут быть конкурентоспособными при сравнении со статическими. Их высокая перегрузочная способность и относительная дешевизна является очень существенным преимуществом в сравнении с полупроводниковыми источниками питания.

Проблема, связанная со сложностью подбора типа генератора по номинальным параметрам может быть решена путем организации производства специальных электромашин.

Д.2 Источники механической мощности

К источникам механической мощности, рассматриваемым при синтезе систем взаимного нагружения, относятся источники момента и источники угловой скорости.

Под источником момента подразумевается источник механической мощности, момент на валу которого стабилизирован или меняется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от угловой скорости вала).

Под источником угловой скорости понимается источник механической мощности, угловая скорость вала которого стабилизирована или меняется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от момента на валу).

Практически источником механической мощности являются двигатели. В дальнейшем будем рассматривать только электрические двигатели, как наиболее приемлемые для использования на промышленных предприятиях.

То, в качестве какого источника механической мощности будет работать электрический двигатель, зависит от его механической

характеристики , которая может быть сформулирована системой управления путём соответствующего регулирования входными параметрами.

Для получения источника момента необходимо формирование абсолютно мягкой механической характеристики (), а для получения источника угловой скорости – абсолютно жёсткой ().

Учитывая то, что источник угловой скорости (добавка угловой скорости) в соответствии со схемой компоновки системы взаимного нагружения должен иметь два вала (входной и выходной), конструктивно он будет существенно отличаться от источника момента. Рассмотрим данные источники механической мощности отдельно.

Источники механического момента

Структура источника момента, как и источника напряжения, может иметь целый ряд вариантов компоновки, рациональность которых будет определяться потребной выходной мощностью, угловой скоростью и моментом на валу.

Наиболее приемлемыми для систем взаимного нагружения будут варианты компоновки источника момента, приведенные на рис. Д.8-Д.10. В них используются электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения и асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым либо фазным ротором.

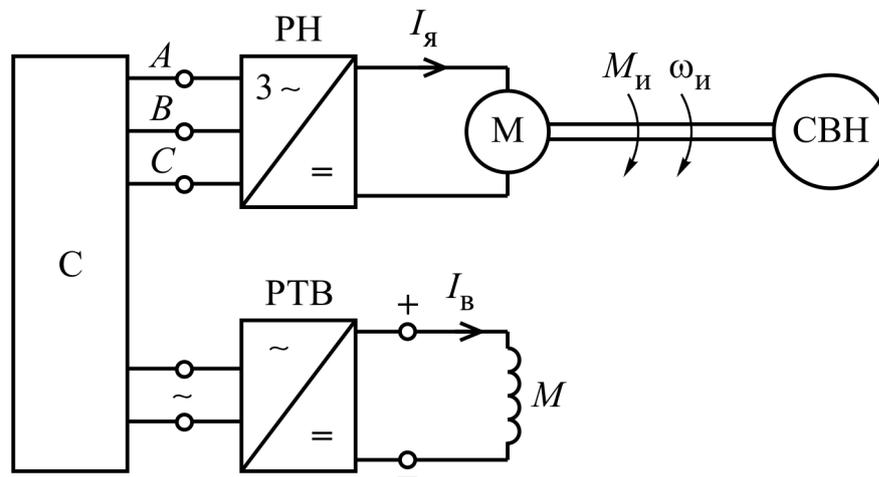


Рисунок Д.8 – Схема источника момента с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

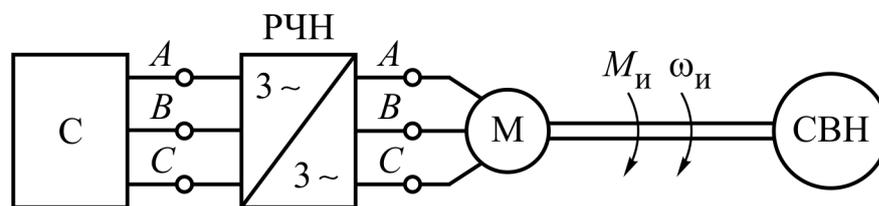


Рисунок Д.9 – Схема источника момента с частотно-управляемым асинхронным приводом

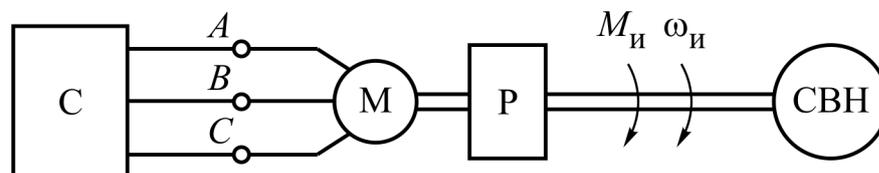


Рисунок Д.10 – Схема источника момента с асинхронным двигателем и редуктором

Вариант 1 (рис. Д.8) характерен тем, что в нём использован электродвигатель независимого возбуждения М, обмотка якоря которого подключена к сети С через регулятор напряжения РН (например, управляемый трёхфазный выпрямитель), а обмотка возбуждения – через регулятор тока возбуждения РТВ. Вал якоря двигателя и есть выходом источника, к которому присоединена система взаимного нагружения СВН. Регулятор напряжения РН в данном варианте может быть заменен на неуправляемый выпрямитель. Регулирование момента при этом может осуществляться регулятором тока возбуждения РТВ.

Вариант 2 (рис. Д.9) отличается тем, что в нём использован трехфазный асинхронный двигатель, который питается от сети трехфазного тока через регулятор частоты и напряжения РЧН. По существу – это частотно-управляемый асинхронный привод с соответствующим алгоритмом регулирования момента и изменением частоты и амплитуды фазного напряжения на выходе регулятора РЧН.

Вариант 3 (рис. Д.10) отличается от варианта 2 отсутствием регулятора частоты и напряжения и наличием редуктора Р, с помощью которого можно регулировать момент на выходе источника. Такое регулирование может быть как ступенчатым, так и главным (при использовании вариатора).

Преимуществом вариантов 1 и 2 является возможность широкого плавного регулирования величины момента. Недостатком данных схем является наличие в источнике двух преобразователей мощности: регулятора напряжения и самого электродвигателя. И регулятор, и двигатель должны быть рассчитаны на полную потребляемую мощность механического источника. Преобразование мощности в источнике – двойное.

Преимуществом варианта 3 является то, что асинхронный двигатель М питается от трехфазной сети непосредственно, без предварительного преобразования электрической мощности. Наличие дополнительного механического преобразователя (редуктора или вариатора) не умаляет данного преимущества, так как он намного дешевле электрического и, кроме того, может быть составляющей частью механического преобразователя момента (частоты) испытываемого двигателя в системах с таким способом создания небалансной электромагнитной мощности.

Недостатком варианта 3 является сложность широкого плавного регулирования выходного момента и, возможно, необходимость в реостатном пуске асинхронного двигателя М. Он для этого должен быть с фазным ротором.

Здесь необходимо отметить, что использование в качестве приводного двигателя асинхронной электромашины с жесткой механической характеристикой обеспечивает приемлемую стабилизацию частоты вращения испытываемых электромашин, а при стабилизации тока нагрузки и величины напряжения на них. При проведении испытаний на нагрев регулирования передаточного отношения редуктора Р не требуется. Проверка же коммутации в соответствии с ГОСТ 2582-81 требует наличия еще двух значений испытательной частоты вращения, а следовательно и передаточного отношения редуктора. Использование ременных вариаторов позволит решить данную проблему при испытании вспомогательных электромашин относительно невысокой мощности.

При испытании тяговых электромашин большой мощности для получения трех фиксированных значений передаточного отношения может быть использована коробка передач.

Источники угловой скорости

Предварительно необходимо отметить, что устройства данного типа в промышленных установках практически не используются. Причиной тому является как сложность технической реализации, так и отсутствие явной потребности в устройстве. Тем не менее, существование источника угловой

скорости теоретически также обосновано, как и существование источника тока. Как было показано выше, угловая скорость является механическим аналогом силы тока.

Кинематическая схема, поясняющая принцип работы источника угловой скорости, приведена на рис. Д.11.

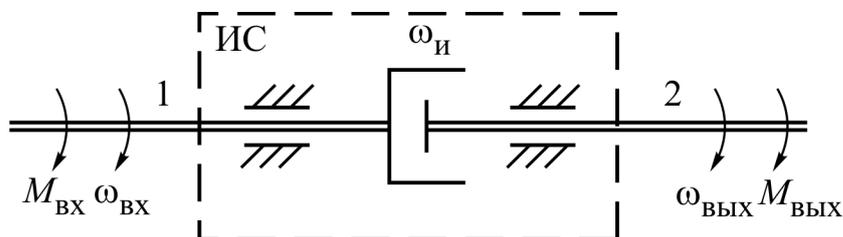


Рисунок Д.11 – Кинематическая схема источника угловой скорости

Устройство имеет два вала, один из которых условно назовём входным (вал 1), а другой – выходным. Отметим, что деление валов на входной и выходной также условно, как и разделение клемм электрического источника на положительную и отрицательную. Момент с входного вала 1 передаётся на выходной вал 2 за счёт внутренних сил взаимодействия двух частей устройства, соединённых с валами 1 и 2. Если данное устройство электромагнитной природы, то это, по существу, могут быть силы взаимодействия вращающегося индуктора с вращающимся якорем. В результате такого взаимодействия возникает разность угловых скоростей вала 1 и вала 2 (добавка скорости).

где ω_1 и ω_2 – угловые скорости валов 1 и 2 соответственно.

Так как силы взаимодействия двух частей источника скорости (индуктора и якоря) являются внутренними реакциями, моменты на валах 1 и 2 равны между собой.

Любой электродвигатель со стабилизированной частотой вращения вала может рассматриваться как частный случай источника угловой скорости, входной вал которого «заземлен». Кинематическая схема для такого частого случая включения источника скорости ИС и её электрический аналог с использованием источника тока ИТ приведены на рис. Д.12 (а и б).

Рисунок Д.12 – Схемы включения источников угловой скорости и тока

Такой частный случай источника скорости (рис. Д.12, а) не может быть использован при передаче механической мощности от двигателя к

генератору в системе взаимного нагружения из-за отсутствия возможности его включения между валами испытуемых электромашин.

Выходная мощность источника угловой скорости может быть представлена в виде

При устройстве представляет собой электромагнитную муфту, которая не является, в отличие от источника скорости, источником мощности ().

Электромагнитная система источника скорости конструктивно может быть выполнена по принципу электромашин постоянного тока, асинхронной или синхронной электромашин.

Д.3 Конверторы напряжения

Конверторы постоянного напряжения, использование которых в системах взаимного нагружения обусловлено необходимостью создания небалансной электромагнитной мощности испытуемых электромашин, могут быть выполнены либо как импульсные преобразователи с промежуточными звеном переменного тока.

Структурная схема первого варианта конвертора напряжения представлена на рис. Д.13.

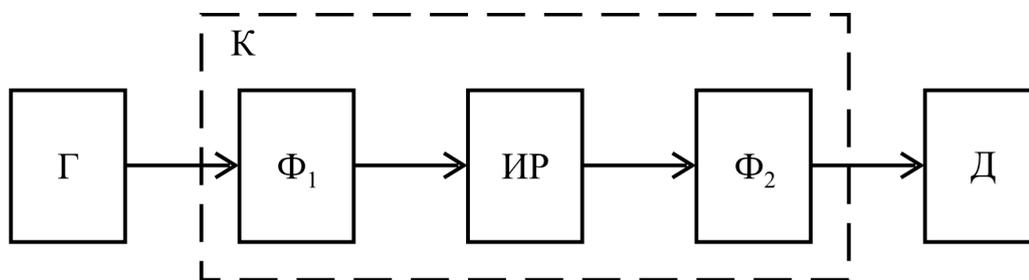


Рисунок Д.13 – Структурная схема конвертора напряжения - импульсного регулятора

В соответствии с рис. Д.13 конвертор К включает в себя входной фильтр Φ_1 , импульсный регулятор ИР и выходной фильтр Φ_2 . Входом конвертор подключен к испытуемому генератору Г, а выходом – к испытуемому двигателю Д.

Импульсный регулятор может работать с повышением и понижением напряжения в зависимости от схемы включения электронного ключа. регулирование может быть широтно-импульсным или частотно-импульсным. Наиболее целесообразным в данной случае будет широтно-импульсное регулирование.

Электронный ключ может быть выполнен на IGBT-транзисторе, двухоперационном GTO-тиристоре или однооперационном тиристоре с искусственной коммутацией.

Структурная схема конвертора напряжения с промежуточным звеном переменного тока представлена на рис. Д.14.

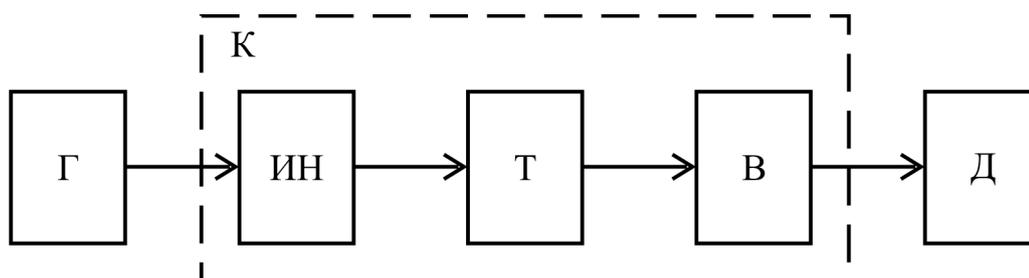


Рисунок Д.14 – Структурная схема конвертора напряжения с промежуточным трансформатором

В соответствии с рис. Д.14 конвертор К включает в себя инвертор напряжения ИН, трансформатор напряжения Т и выпрямитель В. Инвертор, трансформатор и выпрямитель, как правило, выполняются высокочастотными для снижения массо-габаритных показателей конвертора. Трансформатор Т может быть как понижающий, так и повышающий в зависимости от вида конвертора.

Существенным недостатком данной схемы является потребность в трёх преобразователях, рассчитанных на полную мощность испытуемых электромашин.

Понижающий конвертор напряжения

Классический вариант понижающего конвертора постоянного напряжения приведен на рис. Д.15.

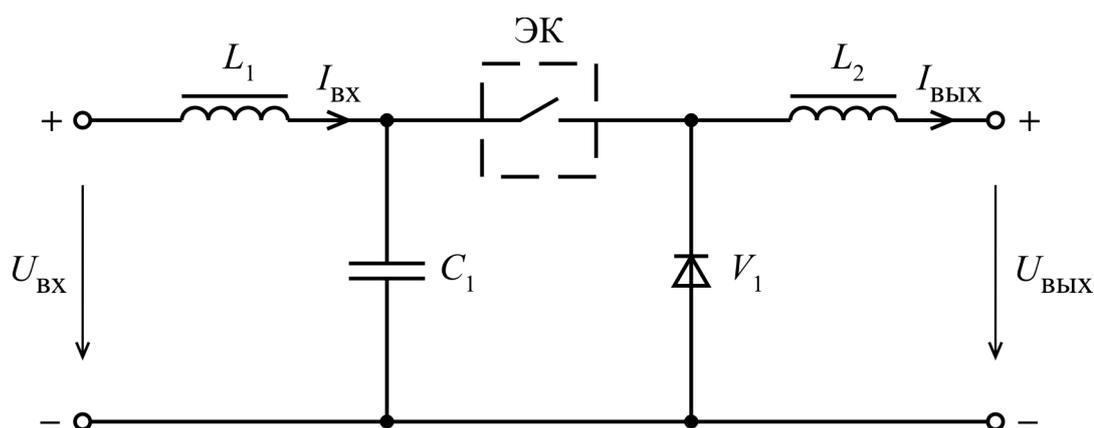


Рисунок Д.15 – Схема понижающего конвертора постоянного напряжения

Катушка индуктивности и конденсатор являются элементами входного фильтра, а катушка – выходного фильтра. Катушки и в реальных схемах могут отсутствовать, если их роль выполняют обмотки испытуемых двигателя и генератора.

Диод является обязательным элементов схемы, обеспечивающим непрерывность протекания тока выходной цепи. Ток выходной цепи протекает через диод в течение выключенного состояния электронного ключа ЭК.

Напряжение на входе и выходе конвертора связаны между собой выражением

$$,$$

где α – коэффициент заполнения импульсов регулятора.

$$,$$

где T – длина импульса;
 T_p – период импульсов;
 f – частота импульсов.

По схеме включения понижающего конвертора напряжения:

$$;$$

$$,$$

где U_g и U_d – напряжение на испытуемых генераторе и двигателе соответственно.

Коэффициент передачи конвертора по напряжению

$$.$$

Коэффициент передачи конвертора по току

$$.$$

По схеме включения понижающего конвертора напряжения:

$$;$$

$$,$$

где I_g и I_d – токи на испытуемых генератора и двигателя соответственно.

Максимальное среднее значение тока электронного ключа может быть определено по формуле

где $I_{\text{ВХ}}$ – максимальный ток нагрузки испытуемого двигателя.
 $U_{\text{ВХ}}$ – Максимальное напряжение электронного ключа

где $U_{\text{Г}}$ – максимальное испытательное напряжение на генераторе.
 $P_{\text{К}}$ – Максимальная мощность конвертора напряжения

Отметим, что конвертор напряжения должен быть рассчитан на максимальную мощность электрической машины при испытаниях.

Повышающий конвертор напряжения

Классический вариант повышающего конвертора постоянного напряжения приведен на рис. Д.16.

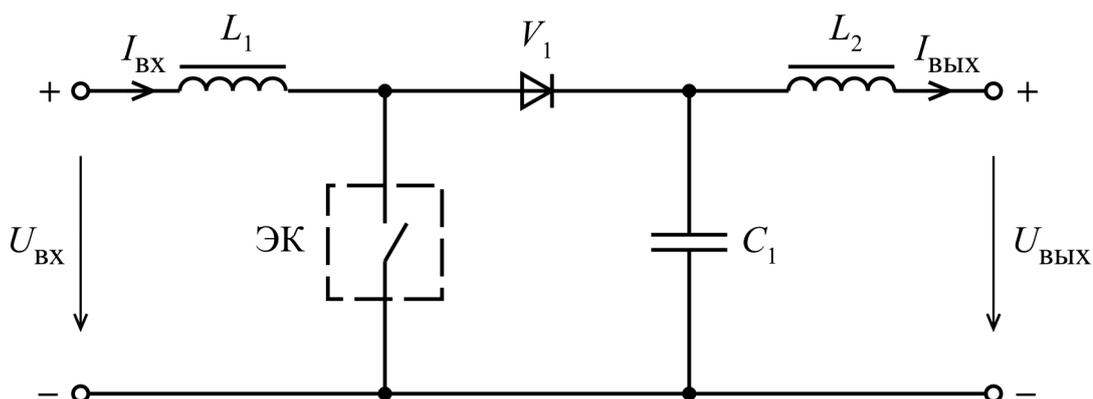


Рисунок Д.16 – Схема повышающего конвертора постоянного напряжения

Катушка индуктивности L_1 является балластным элементов, ограничивающим скорость нарастания входного тока при включении электронного ключа ЭК. Катушка индуктивности L_2 и конденсатор C_1 – элементы выходного фильтра. Диод V_1 препятствует разряду конденсатора через электронный ключ при его включении.

Напряжение на выходе и входе конвертора связаны между собой выражением

По схеме включения повышающего конвертора напряжения:

;

;

;

Коэффициент передачи конвертора по напряжению

Коэффициент передачи конвертора по току

Максимальное среднее значение тока электронного ключа может быть определено по формуле

или

где I_{max} и I_{min} – максимальные токи нагрузки генератора и двигателя соответственно.

Максимальное напряжение электронного ключа

где U_{max} – максимальное испытательное напряжение на двигателе.

Д. 4 Преобразователи механического момента (угловой скорости)

Преобразователи момента, использование которых в системах взаимного нагружения обусловлено необходимостью создания небалансной

электромагнитной мощности испытуемых электромашин, практически представляют собой передачи механической мощности от двигателя к генератору. передача может быть: механической, электрической, пневматической, гидравлической.

Механические передачи

Механическая передача может быть выполнена в виде: зубчатой передачи, ременной или цепной передачи. Кинематическая схема варианта зубчатой передачи (редуктора) приведена на рис. Д.17.

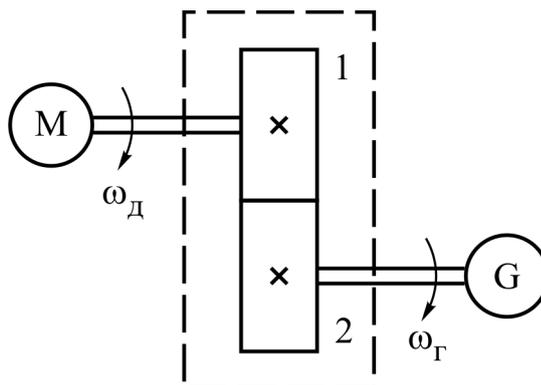


Рисунок Д.17 – Кинематическая схема зубчатой передачи

Коэффициент передачи угловой скорости зубчатого редуктора

,

где d_1 и d_2 – делительные окружности ведущего и ведомого зубчатого колёс 1 и 2 соответственно (рис. Д.17).

Коэффициент передачи крутящего момента редуктора

.

Кинематическая схема ременной (цепной) передачи приведена на рис. Д.18. Коэффициенты передачи угловой скорости и крутящего момента определяются для ременной передачи теми же формулами, что и для зубчатых передач. В качестве параметров d_1 и d_2 при этом рассматриваются диаметры шкивов (звёзд).

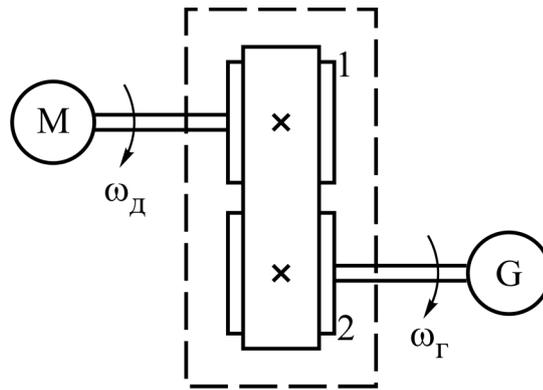


Рисунок Д.18 – Кинематическая схема ременной (цепной) передачи

Коэффициент передачи угловой скорости механической передачи может изменяться ступенчато или плавно. В первом случае устройство представляет собой коробку передач, во втором случае – вариатор. В системах взаимного нагружения требуется плавное регулирование коэффициента передачи угловой скорости для управления небалансной электромагнитной мощностью испытуемых электромашин.

Электрические передачи

Электрическая передача может быть выполнена с использованием двух электромашин постоянного тока с независимым возбуждением. Схема такой передачи показана на рис. Д.19.

Двигатель М1 и генератор G1 являются испытуемыми электромашинами. Генератор G2 и двигатель М2 являются составными частями электрической передачи.

Обмотки возбуждения электромашин G2 и M2 подключены к отдельным источникам И1 и И2 соответственно с возможностью регулирования токов возбуждения

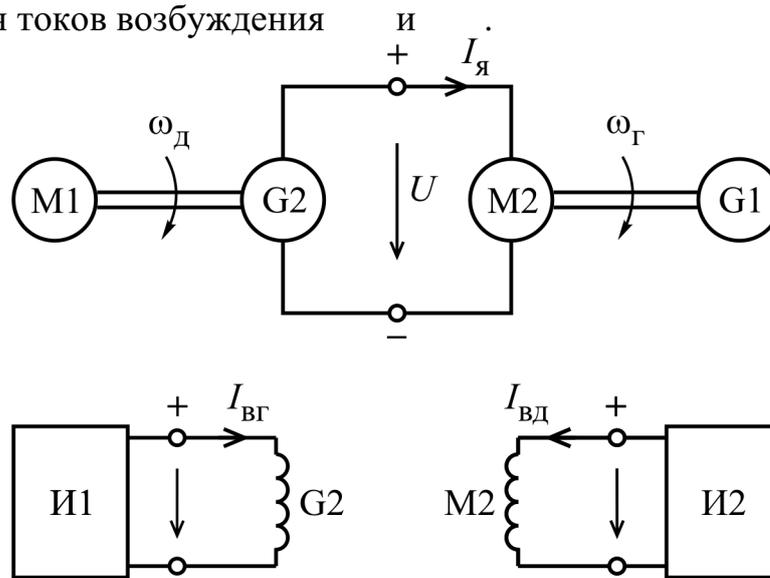


Рисунок Д.19 – Схема электрической передачи

Угловые скорости испытуемых двигателя и генератора связаны между собой выражением

где Φ_g и Φ_d – магнитные потоки генератора и двигателя электрической передачи;

ΣU_p – суммарное падение напряжения в цепи якорей электромашин;

E_g – э. д. с. генератора электропередачи.

Регулирование коэффициента передачи угловой скорости в электропередаче осуществляется путем регулирования токов возбуждения

и $I_{вг}$.

Д.5 Регуляторы тока возбуждения

Регуляторы тока возбуждения испытуемых электромашин необходимы в вариантах систем взаимного возбуждения с принципом управления небалансной электромагнитной мощностью путём регулирования магнитного потока двигателя или генератора.

Принципиально возможны два варианта регулирования тока в обмотке возбуждения, включенной последовательно в цепь якоря испытуемой электромашин: отпитка и подпитка обмотки возбуждения.

Принципиальная схема с подпиткой обмотки возбуждения приведена на рис. Д.20.

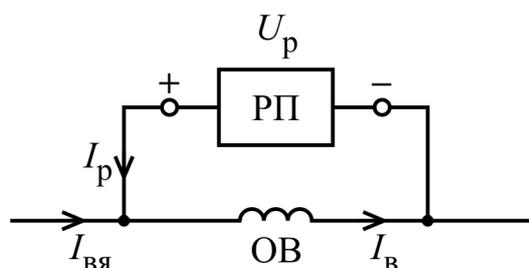


Рисунок Д.20 – Схема подпитки обмотки возбуждения

Параллельно обмотке возбуждения ОВ испытуемой электромашины (двигателя или генератора), включенной в цепь тока якоря $I_{яв}$, подключен регулятор поля РП, представляющий собой источник напряжения. Токи якоря $I_{яв}$, регулятора поля $I_{рп}$ и обмотки возбуждения $I_{ов}$ связаны между собой выражением

При стабилизации тока якоря ток возбуждения может регулироваться путем изменения напряжения на регуляторе РП и соответственно – тока регулятора .

Ток подпитки (регулятора) определяется по формуле

$$I_p = \frac{U_{\text{РП}}}{R_{\text{Д}}}$$

где $U_{\text{РП}}$ – напряжение на выходе регулятора РП;

$R_{\text{Д}}$ – сопротивление обмотки возбуждения.

Регулирование тока осуществляется путем изменения напряжения на выходе регулятора РП.

Максимальное значение напряжения на выходе регулятора поля

$$U_{\text{РП}} = I_{\text{я}} R_{\text{Д}}$$

где $I_{\text{я}}$ – максимальный ток возбуждения;

$R_{\text{Д}}$ – наибольшее сопротивление обмотки возбуждения (в нагретом состоянии).

Регулятор поля РП может быть выполнен как электромашинным, так и статическим с любым известным способом регулирования напряжения на выходе.

Существенным недостатком способа подпитки является необходимость в дополнительном источнике напряжения.

Принципиальная схема отпитки обмотки возбуждения с использованием дополнительного источника приведена на рис. Д.21.

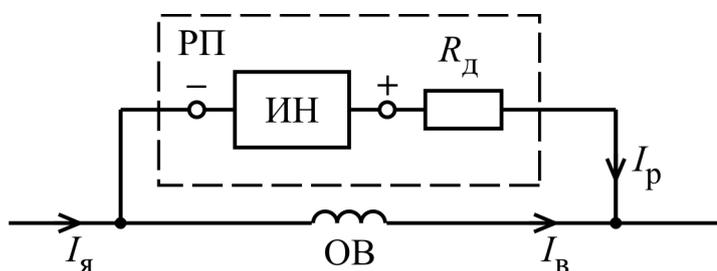


Рисунок Д.21 – Схема отпитки обмотки возбуждения с использованием дополнительного источника

Регулятор поля (РП) в данном случае представляет собой источник регулируемого напряжения ИН и дополнительный резистор $R_{\text{Д}}$ в данной схеме обязательно для регулирования тока отпитки (регулятора) .

Токи якоря $I_{\text{я}}$, возбуждения $I_{\text{в}}$ и регулятора $I_{\text{р}}$ связаны между собой выражением

При стабилизации тока якоря $I_{\text{я}}$ ток возбуждения $I_{\text{в}}$ может регулироваться путем изменения напряжения $U_{\text{ИН}}$ источника ИН и соответственно – тока регулятора $I_{\text{р}}$.

Ток отпитки (регулятора) определяется по формуле

где $U_{\text{ИН}}$ – напряжение источника ИН;

$R_{\text{доп}}$ – сопротивление дополнительного резистора.

Регулирование тока $I_{\text{р}}$ регулятора РП осуществляется изменением напряжения $U_{\text{ИН}}$ источника ИН.

Главным недостатком данного варианта реализации отпитки обмотки возбуждения является та же необходимость в дополнительной источнике напряжения, что и в предыдущей схеме подпитки.

Принципиальная схема отпитки обмотки возбуждения с использованием плавного регулирования сопротивления шунтирующей цепи приведена на рис. Д.22.

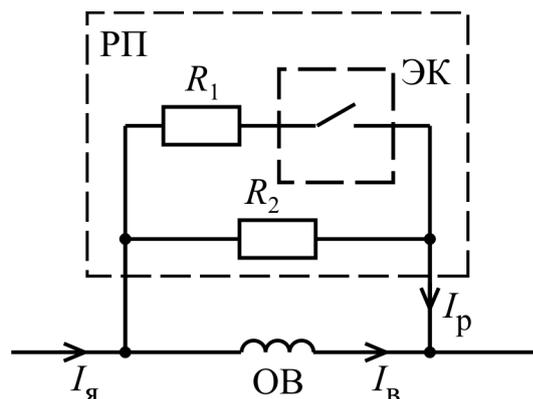


Рисунок Д.22 – Схема отпитки обмотки возбуждения с использованием импульсного регулирования сопротивления шунтирующей цепи

Регулятор поля (РП) в данном варианте представляет собой импульсный регулятор ослабления поля, включающий в себя основной шунтирующий резистор R_1 , электронный ключ ЭК и дополнительный шунтирующий резистор R_2 .

Ток якоря и возбуждения в данной схеме связаны между собой соотношением

$$,$$

где – коэффициент ослабления поля.

Ток отпитки (регулятора) определяется формулой

$$.$$

Коэффициент ослабления поля для схемы на рис. Д.22 определяется в виде

$$,$$

где – эквивалентное сопротивление шунтирующей цепи (регулятора поля), которое определяется в виде

$$,$$

где – коэффициент заполнения импульсов регулятора.

Максимальное и минимальное значение эквивалентного сопротивления шунтирующей цепи соответственно равны:

$$;$$

$$.$$

Основным преимуществом данного метода отпитки обмотки возбуждения является отсутствие дополнительного источника электрической мощности. Регулятор поля (рис. Д.22) не является источником мощности.

Максимальное среднее значение тока электронного ключа (при

$$)$$

$$;$$

где – максимальный ток регулятора поля.

Максимальное напряжение на электронном ключе (при и

$$)$$

;

где $I_{\text{я}}$ – максимальный ток якоря.

Регулирование коэффициента заполнения импульсов может быть как широтно-импульсным, так и частотно-импульсным. Наиболее рациональным будет использование широтно-импульсного регулирования при постоянной рациональной частоте импульсов. Частота импульсов должна выбираться из условия минимума дополнительных магнитных потерь в магнитной системе испытуемой тяговой электромашинны [190].

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Экспериментальные исследования влияния тока нагрузки тяговых электрических машин на расход электроэнергии при испытании на нагрев

Целью данных экспериментальных исследований являлось определение разности суммарных полезных энергий источников системы взаимной нагрузки, затраченных на испытания на нагрев тяговых электродвигателей РТ-51Д при пусковом и часовом токе нагрузки.

Экспериментальные исследования проводились на стенде взаимной нагрузки с использованием вольтодобавочной машины (ВДМ) и линейного генератора (ЛГ). Схема стенда приведена на рис. Е.1.

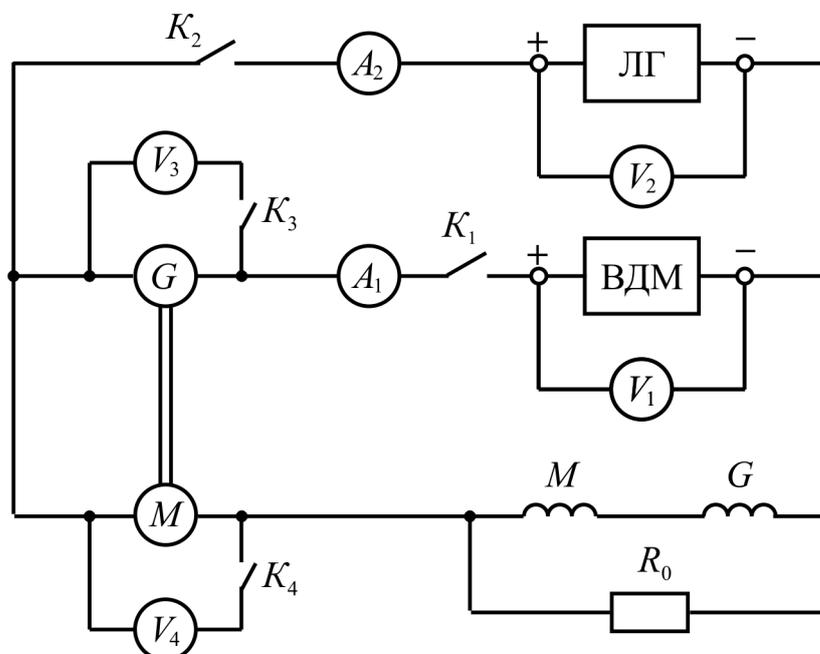


Рисунок Е.1 – Схема испытательного стенда

На первом этапе экспериментального исследования проведено испытание на нагрев тяговых двигателей РТ-51Д при часовом токе нагрузки и номинальном напряжении в течение часа.

Коэффициент ослабления поля при испытании был номинальным.

В конце испытания методом сопротивления определены превышения температуры обмоток якорей обеих тяговых электромашин (генератора G и двигателя M).

На втором этапе экспериментального исследования проведено испытание на нагрев тех же двигателей, с использованием той же схемы, но при пусковом токе нагрузки. Напряжение и коэффициент ослабления поля тяговых двигателей на втором этапе поддерживались номинальными: и соответственно.

Испытания на нагрев при пусковом токе проводились в течение времени достижения суммарного сопротивления цепи испытуемых двигателей того же значения, которое было зафиксировано при испытании в течение часа при часовом токе нагрузки. Суммарное сопротивление данной цепи оценивалось по величине напряжения на

выводах вольтодобавочной машины, которое предварительно фиксировалось в течение испытания на нагрев при часовом токе нагрузки, на первом этапе.

Таким образом, было достигнуто условие равенства конечных превышений температур испытуемых тяговых двигателей для обоих режимов испытания.

Полезные энергии источников испытательного стенда (ВДМ и ЛГ) определялись по значениям их напряжений и токов, которые периодически фиксировались в течение всего времени испытания для обоих режимов нагружения с помощью вольтметров и , а также амперметров и .

Общий расход полезной электроэнергии каждого из источников (ВДМ и ЛГ) за время испытания может быть определен в виде:

;

,

где , – напряжение и сила тока линейного генератора;

, – напряжение и сила тока вольтодобавочной машины;

– время проведения испытания.

Как показывает опыт многочисленных испытаний на нагрев, ток линейного генератора в течение времени испытания практически не меняется . Это обусловлено отсутствием влияния температуры обмоток тяговых электромашин на величину потерь холостого хода, которые и определяют ток линейного генератора.

Необходимо отметить, что при расхождении магнитных характеристик испытуемых электромашин ток линейного генератора может меняться с изменением температуры их обмоток и, соответственно, электрических потерь. В проводимых испытаниях использовались тяговые двигатели с практически совпадающими магнитными характеристиками, поэтому такого явления в эксперименте не наблюдалось.

Суммарная полезная энергия линейного генератора при условии постоянства его тока может быть определена в упрощенном виде как

При условии и ток ВДМ также постоянен.

Тогда выражение для определения $R_{\text{гор}}/R_{\text{хол}}$ может быть представлено в виде

Для поддержания постоянства тока нагрузки тяговых двигателей напряжение ВДМ по мере роста превышения температуры и сопротивления их обмоток повышается. Форма зависимости $R_{\text{гор}}/R_{\text{хол}}$ повторяет форму изменения во времени суммарного сопротивления всех обмоток тяговых двигателей R_{Σ} и имеет такой же экспоненциальный характер.

Фиксация результатов замера токов и напряжений при испытании под током нагрузки $I_{\text{н}} = 100$ проводилась каждые 10 минут, а при испытании током нагрузки $I_{\text{н}} = 10$ – каждые три минуты.

Результаты замеров токов и напряжений источников для режима $I_{\text{н}} = 100$ (первый этап) приведены в таблице Е. 1. Результаты замеров этих же параметров для режима $I_{\text{н}} = 10$ (второй этап) приведены в таблице Е. 2.

Превышения температур обмоток якорей испытуемых тяговых двигателей определялись по формуле [114]

где $R_{\text{гор}}$, $R_{\text{хол}}$ – сопротивления обмотки якоря в горячем и холодном состоянии соответственно;

$T_{\text{хол}}$ – температура обмотки якоря в холодном состоянии;

$T_{\text{окр}}$ – температура окружающего воздуха.

Испытания по двум этапам проводились с промежутком времени, равным двум суткам. Температура обмоток якорей в холодном состоянии была равна температуре окружающего воздуха $T_{\text{окр}}$. Превышение температуры определялось по формуле

Сопротивления обмоток якорей определялось методом амперметра-вольтметра, на стенде, с использованием измерительных щёток. Падения напряжений на якорных обмотках определялись вольтметрами $U_{\text{я}}$ и при

Суммарная полезная энергия двух источников (ВДМ и ЛГ) для часового режима нагрузки

Таблица Е.2 – Данные испытаний и результаты расчёта полезных энергий ВДМ и ЛГ для пускового режима нагрузки

| | | | | | | | |
|----|-----|-------|-----|------|----|-----|-------|
| | | | | | | | |
| 0 | 157 | – | 370 | – | 10 | – | – |
| 3 | 170 | 163,5 | 370 | 3,03 | 10 | 825 | 0,413 |
| 6 | 182 | 176 | 370 | 3,26 | 10 | 825 | 0,413 |
| 9 | 193 | 187,5 | 370 | 3,47 | 10 | 825 | 0,413 |
| 12 | 202 | 197,5 | 370 | 3,65 | 10 | 825 | 0,413 |
| 15 | 212 | 207 | 370 | 3,83 | 10 | 825 | 0,413 |
| 16 | 215 | 213,5 | 370 | 1,32 | 10 | 825 | 0,138 |

Суммарная полезная энергия ВДМ для пускового режима нагрузки

Суммарная полезная энергия ЛГ для пускового режима нагрузки

Суммарная полезная энергия двух источников (ВДМ и ЛГ) для пускового режима нагрузки

Отношение суммарных полезных энергий двух источников (ВДМ и ЛГ) в часовом и пусковом режимах нагрузки

Экономия суммарной полезной энергии двух источников (ВДМ и ЛГ) в пусковом режиме нагрузки в сравнении с часовым режимом

что составляет 36% от суммарной полезной энергии двух источников часового режима.

Особенностью тяговых двигателей с самовентиляцией является относительно высокая доля в суммарных потерях мощности потерь холостого хода, которые с ростом тока нагрузки несколько снижаются из-за падения частоты вращения испытуемых тяговых электромашин. Мощность потерь холостого хода в малой степени влияет на превышение температуры обмотки якоря, но составляют существенную долю в общей мощности потерь в стенде взаимной нагрузки, для компенсации которой требуется мощность из сети. Существенное сокращение времени испытания на нагрев (в три – четыре раза) в той же степени уменьшает общую полезную энергию источников системы взаимного нагружения тяговых электромашин, которая расходуется на компенсацию потерь холостого хода.

Из результатов расчёта по данным экспериментальных исследований видно, что общая полезная энергия линейного генератора, который компенсирует потери холостого хода, при испытании на нагрев с пусковым током нагрузки в четыре раза ниже, чем при испытании в часовом режиме нагружения. Такой характер снижения общей энергии потерь холостого хода при увеличении тока нагрузки будет присущ всем вариантам систем взаимного нагружения, независимо от того, каким способом в них компенсируются потери холостого хода.

Результаты расчёта по данным экспериментальных исследований достаточно хорошо согласуются с результатами теоретических исследований влияния величины тока нагрузки испытуемых тяговых электромашин на энергетическую эффективность испытания на нагрев.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Определение расхода электроэнергии на проведение приёмо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин

Затраты электроэнергии на проведение приемо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин условно можно разделить на две части. Первая включает в себя расходы на выполнение пунктов программы испытаний, не требующих нагрузки электромашин [25]:

- испытание на повышенную частоту вращения;
- испытание электрической прочности изоляции;
- проверка биения коллектора;
- измерение сопротивления изоляции;
- проверка уровня вибрации.

Вторая часть затрат электроэнергии включает в себя расходы на выполнение тех пунктов программы испытаний, которые требуют нагрузки электромашин [25]:

- испытание на нагревание;
- проверка частоты вращения и реверсирования;
- проверка коммутации.

В данной работе рассматриваются вопросы снижения расхода электроэнергии на испытания тяговых электромашин путём оптимизации структуры схемы их взаимного нагружения. Именно поэтому в дальнейшем будем рассматривать только вторую часть затрат электроэнергии, связанную с выполнением пунктов программы, требующих взаимного нагружения испытуемых электромашин.

Суммарные затраты электроэнергии можно определить в виде

$$P_{\Sigma} = P_{\text{нагр}} + P_{\text{чв}} + P_{\text{к}} \quad (\text{Ж.1})$$

где $P_{\text{нагр}}$, $P_{\text{чв}}$, $P_{\text{к}}$ – мощности, потребляемые из сети стендом взаимной нагрузки при испытании на нагрев, проверке частоты вращения и коммутации соответственно;

$t_{\text{нагр}}$, $t_{\text{чв}}$, $t_{\text{к}}$ – длительности выполнения соответствующих пунктов программы.

Мощность, потребляемая из сети при выполнении любого из этих трех пунктов программы испытаний, определяется в виде

$$P_{\text{нагр}} = P_{\text{дв}} + P_{\text{ген}} + P_{\text{пр}} \quad (\text{Ж.2})$$

где $P_{\text{дв}}$ – суммарная мощность потерь в двигателе и генераторе;

$P_{\text{пр}}$ – суммарная мощность потерь в преобразователях (источниках) испытательного стенда.

Суммарная мощность потерь в испытуемых двигателе и генераторе мало зависит от структуры стенда взаимной нагрузки, так как режимы их испытаний строго регламентированы требованиями ГОСТ 2582-81.

(Ж.3)

где $P_{\text{эл}}$, $P_{\text{дв}}$ – электрические потери и часть добавочных потерь, вызванных протеканием токов, двигателя и генератора соответственно;

$P_{\text{хх}}$, $P_{\text{мх}}$ – потери холостого хода и часть добавочных потерь, вызванных вращением, двигателя и генератора соответственно.

Добавочные потери в испытуемых электромашинах разделены и с целью упрощения дальнейшего анализа условно отнесены к двум основным видам потерь (электрическим и холостого хода).

Потери холостого хода складываются из магнитных (потери в стали) и механических потерь.

(Ж.4)

где $P_{\text{м}}$ – магнитные потери;

$P_{\text{мех}}$ – механические потери.

Суммарные потери в преобразователях $P_{\text{пр}}$ являются как раз той частью общих потерь мощности в стенде взаимной нагрузки, которые должны быть минимизированы

(Ж.5)

Такая минимизация потерь $P_{\text{пр}}$ может быть достигнута путем:

- повышения к.п.д. используемых преобразователей мощности;
- снижением количества преобразователей;
- повышения энергетической эффективности процесса компенсации потерь в испытуемых электромашинах.

Определим полезную мощность и энергию источников системы взаимного нагружения, необходимые для проведения испытаний.

Рассмотрим те пункты программы приёмо-сдаточных испытаний, которые требуют нагружения испытуемых электрических машин.

Режим 1. Испытание на нагревание. Испытание на нагревание является самым энергоёмким мероприятием из всего перечня программы приёмо-сдаточных испытаний. Целью данных испытаний является определение превышения температуры перегрева частей тяговой электромашины в часовом режиме работы. В соответствии с ГОСТ 8582-81 электрические машины постоянного и пульсирующего тока испытывают при номинальном напряжении и часовом токе в течение одного часа.

При тепловых испытаниях электрических двигателей номинальное значение напряжения и часовое значение тока устанавливают на испытуемой

электрической машине, работающей на стенде в режиме двигателя.

$$; \quad (\text{Ж.6})$$

$$, \quad (\text{Ж.7})$$

где U , I – напряжение и ток испытуемого двигателя соответственно;
 U_n – номинальное напряжение испытуемых электромашин;
 I_{ch} – часовой ток испытуемых электромашин.

Суммарная полезная мощность источников энергии (электрической или механической) стенда взаимной нагрузки определяется по формуле

$$, \quad (\text{Ж.8})$$

где U , I – напряжение и ток испытуемого генератора соответственно;
 η – к. п. д. испытуемых двигателя и генератора соответственно.
 При упрощенных оценочных расчетах можно использовать формулу

$$, \quad (\text{Ж.9})$$

где n – к. п. д. однотипных испытуемых электромашин.

Мощность P изменяется в течение времени испытаний в связи с повышением сопротивления обмоток электромашин при нагревании, соответствующим увеличением электрических потерь и снижением к. п. д.

Максимальное значение суммарной полезной мощности источников испытательного стенда в конце тепловых испытаний в упрощённом виде будет определяться как

$$, \quad (\text{Ж.10})$$

где P_{ch} – часовое значение мощности к. п. д.

В соответствии с ГОСТ 183-74 для электрических машин постоянного тока мощностью свыше 50 кВт допускается отклонение к. п. д., соответствующее превышению общих потерь на 10 %, что соответствует

уменьшению к. п. д. на величину $\Delta \eta$. Тогда минимально допустимое возможное значение к. п. д. тяговой электромашин будет определяться как

$$. \quad (\text{Ж.11})$$

При этом выражение для максимальной суммарной полезной мощности источников испытательного стенда примет вид

(Ж.12)

Суммарная полезная энергия источников, затрачиваемая на проведение тепловых испытаний, будет определяться в виде

(Ж.13)

где – к. п. д. электромашин в функции времени;
– длительность тепловых испытаний (3600 с).

Режим 2. Проверка частоты вращения и реверсирования. Целью данных испытаний является проверка тяговых электромашин на соответствие требованиям ГОСТ 2582-81 в части допусков отклонений частоты вращения в номинальном режиме от типового значения номинальной частоты вращения.

Выполнение данной проверки требует измерение частоты вращения якоря при номинальных значениях напряжения, тока и степени возбуждения в двигательном режиме работы испытуемой электромашин

(Ж.14)

где – номинальное типовое значение тока испытуемой электромашин (часовой или длительный ток);

– номинальное значение систем возбуждения.

Для выполнения проверки частоты вращения и реверсирования необходима возможность взаимного изменения режимов работы испытуемых электромашин (двигатель-генератор), а также направления их вращения.

Проверка частоты вращения и реверсирования в соответствии с ГОСТ 2582-81 проводится на нагретой электрической машине. Суммарная полезная мощность источников испытательного стенда при этой проверке определяется формулой

(Ж.15)

где – к. п. д. в номинальном режиме.
Суммарная полезная энергия источников, расходуемая на проверку

, (Ж.16)

где – длительность проверки частоты вращения и реверсирования.

При данной проверке обмотки электромашин продолжают нагреваться и, строго говоря, для определения значения необходимо определение зависимости в течение времени . В упрощённом виде формула для может быть представлена при условии постоянства как

(Ж.17)

Режим 3. Испытание на повышенную частоту вращения. Целью данных испытаний является проверка работоспособности электрической машины после непродолжительного (2 минуты) вращения на холостом ходе с частотой, превышающей наибольшее её типовое значение на 20, 25 или 35 %.

Для тяговых двигателей электровозов и электропоездов переменного тока, питающихся от выпрямительной установки, включенных параллельно, испытательная повышенная частота вращения

где – наибольшая типовая частота вращения.

Для тяговых двигателей электровозов и электропоездов постоянного тока и электровозов двойного питания, постоянно попарно соединённых последовательно, испытательная частота вращения

Для вспомогательных электрических машин постоянного тока

Испытательная повышенная частота вращения для тяговых двигателей электропоездов постоянного тока, спроектированных до 1981 г., определяется в виде

Учитывая то, что испытания на повышенную частоту вращения проводят при холостом ходе, величины напряжения и тока определяются в основном механическими потерями и магнитной характеристикой

испытываемых электромашин.

Суммарная полезная мощность источников энергии испытательного стенда при данной проверке

(Ж.18)

где $P_{\text{мех}}$ и $P_{\text{ген}}$ – механические потери испытываемых двигателя и генератора соответственно при повышенной частоте вращения.

При упрощённых расчетах можно использовать формулу

(Ж.19)

где $P_{\text{мех}}$ – механические потери в одноступенчатых испытываемых электрических машинах, соответствующие испытательной частоте вращения по типовым характеристикам механических потерь.

Значение $P_{\text{мех}}$ для тяговых двигателей с независимой вентиляцией может быть в 2-3 раза больше суммарных потерь при номинальном режиме. Механические потери, соответствующие повышенной частоте вращения, в двигателях с самовентиляцией на порядок выше этих же потерь в номинальном режиме.

Суммарная полезная энергия источников стенда, расходуемая на испытание повышенной частотой вращения

(Ж.20)

где t – длительность испытания на повышенную частоту вращения (120 с).

Режимы 4-6. Проверка коммутации. Проверка коммутации является той частью программы приёмно-сдаточных испытаний тяговых электрических машин, которая в сравнении с испытаниями на нагрев требует существенной перегрузки источников испытательного стенда по току, напряжению, моменту и частоте вращения (для источников механической мощности). Целью данных испытаний является определение работоспособности щёточно-коллекторного узла электрической машины при перегрузках по напряжению, току, частоте вращения, искажающему действию реакции якоря.

При проверке коммутации тяговых электрических двигателей постоянного тока ГОСТом 2582-81 [25] предусмотрено три режима испытания. При проверке коммутации вспомогательных машин – два режима

Выполнение проверки коммутации по каждому из режимов 1, 2, 3, 8

проводится визуальная оценка степени искрения (не более 10^4) при вращении электромашин в течение 30 с в каждом направлении, а также

последствий самого искрения (возникновение кругового огня, остаточные деформации, повреждения коллектора и щеточного узла).

Выполнение проверки коммутации вспомогательных машин в режиме 9 предусматривает ту же визуальную оценку степени искрения и его последствий при пятикратном пуске, способом, соответствующим работе на электроподвижном составе. Рассмотрим каждый из упомянутых режимов отдельно.

Режим 4. Проверка коммутации. Проверка в режиме 4 выполняется при максимальном напряжении, максимальном пусковом токе и минимальной степени возбуждения:

(Ж.21)

Суммарная полезная мощность источников испытательного стенда для каждого режима будет определяться в виде

(Ж.22)

где k – значение к. п. д. одноступенчатых испытываемых электрических двигателей в режиме 4.

Учитывая то, что значение к. п. д. не является типовым параметром испытываемых электромашин, для данного режима может быть более удобной в использовании формула

(Ж.23)

где R – сопротивление обмоток в горячем состоянии;

ΔP_0 – потери холостого хода в режиме 4.

Потери холостого хода являются функцией тока возбуждения и частоты вращения. Частота вращения сама является функцией тока якоря при постоянных напряжении и коэффициенте ослабления поля.

при $I_f = I_{f0}$. (Ж.24)

при $I_f = I_{f0}$; $I_a = I_{a0}$.

Ток возбуждения в режиме 4

(Ж.25)

Суммарная полезная энергия источников испытательного стенда в режиме 4

(Ж.26)

где t_4 – длительность испытания в режиме 4.

Режим 5. Проверка коммутации. Проверка в режиме 5 выполняется при наибольшем напряжении, наибольшей частоте вращения и наименьшей степени возбуждения:

(Ж.27)

Суммарная полезная мощность источников испытательного стенда для режима 5

(Ж.28)

где I_5 , n_5 – значения тока и к. п. д. в режиме 5 соответственно.

Ни значение тока I_5 , ни к. п. д. η_5 не являются типовыми параметрами испытуемых электромашин. Поэтому более удобной в использовании может быть формула

(Ж.29)

где P_{05} – потери холостого хода в режиме 5.

Потери холостого хода являются функцией тока возбуждения и частоты вращения. Ток является функцией частоты вращения при постоянных напряжении и коэффициенте ослабления поля.

(Ж.30)

(Ж.31)

Ток возбуждения в режиме 5

(Ж.32)

Суммарная полезная энергия источников испытательного стенда в режиме 5

(Ж.33)

где t_5 – длительность испытания в режиме 5.

Режим 6. Проверка коммутации. Проверка в режиме 6 выполняется при наибольшем напряжении, наибольшем пусковом токе и наименьшей степени возбуждения:

(Ж.34)

Суммарная полезная мощность источников испытательного стенда для режима 6

(Ж.35)

где η_6 – значение к. п. д. в режиме 6.

Значение к. п. д. η_6 не является типовым параметром испытуемых электромашин. Поэтому более удобной в использовании может быть формула

(Ж.36)

где P_{06} – потери холостого хода в режиме 6.

Потери холостого хода являются функцией тока возбуждения и частоты вращения. Частоты вращения является функцией тока при постоянных напряжении и коэффициенте ослабления поля.

(Ж.37)

(Ж.38)

Ток возбуждения в режиме 6

(Ж.39)

Суммарная полезная энергия источников испытательного стенда

(Ж.40)

где t – длительность испытания в режиме б.

Суммарные затраты электроэнергии на проведение испытаний тяговых электродвигателей на стенде взаимной нагрузки могут быть найдены в виде суммы

Проблема определения норм расходов электроэнергии на проведение приемо-сдаточных испытаний тяговых электромашин для предприятий по ремонту тягового подвижного состава магистрального и промышленного транспорта весьма актуальна. На большинстве испытательных станций вообще не ведется учет электроэнергии, расходуемой на испытания тяговых электрических машин. При этом нормы расхода электроэнергии для испытательных станций устанавливаются без научного обоснования.

Данная методика может быть использована для нормирования расхода электроэнергии на приемо-сдаточные испытания тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока различных типов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Определение экономии электроэнергии от использования рациональных схем и режимов нагружения тяговых электрических машин при приёмо-сдаточных испытаниях

Рассмотрим экономию электроэнергии от применения рациональных схем и режимов нагружения тяговых электродвигателей электровозов при их послеремонтных испытаниях.

В качестве базового варианта будем рассматривать систему взаимной нагрузки с электромашинами преобразователями: вольтодобавочной машиной и линейным генератором. Данный вариант стенда взаимной нагрузки является наиболее распространенным на станциях для испытаний тяговых электрических машин электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Особенностью таких стендов взаимной нагрузки является то, что в качестве вольтодобавочной машины (ВДМ) и линейного генератора (ЛГ) практически на всех испытательных станциях используются либо однотипные с испытуемыми, либо близкие по мощности электрические машины. Такая ситуация обусловлена тем, что подбор генераторов, параметры которых полностью соответствуют требованиям к ВДМ и ЛГ, на практике представляют собой существенную проблему. ВДМ должна быть низковольтным генератором, рассчитанным на большие токи нагрузки, а ЛГ – высоковольтным генератором, рассчитанным на небольшую силу тока.

Необходимо отметить, что на практике линейный генератор, работающий в установившемся режиме с относительно малыми токами нагрузки, при переходных процессах подвержен многократным перегрузкам по току. Достаточно часто в реальных условиях испытаний линейный генератор переходит в двигательный режим. Именно высокая перегрузочная способность электромашиного линейного генератора и большой запас по его мощности обеспечивает достаточную надежность существующих стендов взаимной нагрузки тяговых электромашин.

Главной особенностью режимов работы ВДМ является то, что электрические потери в ней соизмеримы с электрическими потерями в одной испытуемой тяговой электромашине, а потери холостого хода определяются практически только механическими потерями. Особенность режима работы ЛГ заключается в том, что потери холостого хода в нём такие же, как в одной испытуемой тяговой электромашине, а электрические потери минимальны.

Приводятся во вращение и ВДМ и ЛГ, как правило, асинхронными двигателями мощностью, соизмеримой с мощностями ВДМ, ЛГ и самих испытуемых тяговых электромашин. Основную долю потерь в приводных асинхронных двигателях составляют потери холостого хода, соответствующие их номинальной мощности.

Исходя из изложенного выше можно сделать вывод, что общие потери мощности в ВДМ, ЛГ и их приводных асинхронных двигателях приблизительно равны суммарным потерям мощности двух испытуемых тяговых двигателей. Если считать данные суммарные потери равными, коэффициент энергетической эффективности системы взаимной нагрузки с электромашинами преобразователями можно принять

Как показывает опыт модернизации испытательных станций, самую большую проблему в решении этой задачи представляет замена ЛГ на статический преобразователь. Данный источник должен иметь многократный запас мощности, требуемый из-за существенных перегрузок по току в переходных режимах, обусловленных параллельным включением источника.

Использование схемных решений стенда взаимной нагрузки без параллельного источника напряжения, предложенных в диссертации, как раз и позволяет решить данную проблему.

При использовании полупроводникового преобразователя напряжения в стенде взаимной нагрузки энергетическая эффективность последнего может быть повышена до значения как минимум

Энергетическая эффективность испытаний при базовом варианте стенда взаимной нагрузки и часового режима нагружения будет равна

где $\eta_{\text{ч}}$ – энергетическая эффективность нагревания при часовом режиме нагрузки.

Энергетическая эффективность испытаний при использовании предложенных рациональных вариантов системы взаимного нагружения и рационального режима нагружения тяговых электромашин будет равна

где $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент энергетической эффективности нагревания при пусковом (пятнадцатиминутном) токе нагрузки.

Отношение коэффициентов энергетической эффективности испытания при пусковом и часовом режимах нагрузки

Как показывают расчеты, отношение коэффициентов энергетической эффективности нагревания для данных режимов может быть принято

Тогда отношение коэффициентов энергетической эффективности испытания

Исходя из определения коэффициента энергетической эффективности испытания можно сделать вывод, что использование рекомендаций, предложенных в диссертации, позволит снизить расход электроэнергии на проведение испытаний на нагрев в 2,7 раз. Расход электроэнергии на выполнение других пунктов программы испытаний может быть снижен в 1,8 раз ().

С учетом соотношения длительностей испытания на нагрев, проверки коммутации и частоты вращения можно принять, что расход электроэнергии на проведение всей программы испытаний на стенде взаимной нагрузки будет снижен в 2,5 раза.

Как показывает опыт, средний расход электроэнергии на проведение испытаний пары тяговых двигателей электровозов под нагрузкой на существующих стендах составляет

Внедрение предложений по повышению энергетической эффективности испытаний позволит снизить этот показатель до значения

Экономия электроэнергии на одну пару испытуемых тяговых двигателей

Годовой экономический эффект от экономии электроэнергии на испытания тяговых двигателей для электровозного парка Украины из расчета , что в год производится ремонт не менее 3000 тяговых двигателей грузовых и пассажирских магистральных электровозов, а стоимость электроэнергии 0,8 грн/кВт·ч,

Годовой экономический эффект от использования систем взаимного нагружения при испытании вспомогательных машин может быть рассчитан из условия снижения расхода электроэнергии приблизительно на 80 % в сравнении с используемым в настоящее время методом непосредственной нагрузки.

Если принять средний расход электроэнергии на испытание одной вспомогательной электромашины методом непосредственной нагрузки 30

кВт·ч, то при использовании взаимной нагрузки годовой экономический эффект из расчета, что в год производится ремонт не менее, чем 1000 вспомогательных электрических машин электровозов

Суммарный годовой экономический эффект от экономии электроэнергии на испытаниях всех тяговых электромашин для электровозного парка Украины

Данная экономия является существенной для локомотивного хозяйства «Укрзалізниця».

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Акты использования результатов диссертационной работы

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер

Головного управління локомотивного
господарства «Укрзалізниці»

Ткаченко Є. В.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Афанасова Андрія Михайловича на тему «Розвиток наукових основ та
вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових
електричних машин постійного та пульсуючого струму»

м. Київ

29 січня 2013 р.

Цій акт складений про те, що результати дисертаційних досліджень
Афанасова Андрія Михайловича прийнято до розгляду на предмет
впровадження Головним управлінням локомотивного господарства
«Укрзалізниці».

Найбільш важливими як в теоретичному, так і в практичному плані
вважаємо такі наукові результати дисертації як:

- введення поняття та отримання аналітичних виразів для визначення
енергетичної ефективності випробування тягових електромашин на нагрів;
- обґрунтування можливості підвищення енергетичної ефективності
випробування на нагрів тягових двигунів електрорухомого складу за рахунок
збільшення струму навантаження до пускового значення;
- отримання аналітичних виразів для визначення потрібної потужності
джерел живлення системи взаємного навантаження тягових електромашин.

Головний технолог Головного

Управління локомотивного господарства

Головний спеціаліст з ремонту електровозів

Головний спеціаліст з ремонту тепловозів

В. В. Журавель

І. В. Білан

О. В. Камчатний

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник голови правління,

головний інженер ПрАТ

«Запорізький електровозоремонтний завод»

С. В. Федюченко

31.01.2013 р.

АКТ

про використання наукових результатів дисертації

Афанасова Андрія Михайловича «Розвиток наукових основ та вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму»

Цім актом підтверджується те, що результати досліджень докторської дисертації Афанасова Андрія Михайловича прийнято до розгляду щодо впровадження на ПрАТ «Запорізький електровозоремонтний завод».

Найбільш важливими з точки зору доцільності використання при проведенні приймально-здавальних випробувань тягових електромашин вважаємо такі наукові результати дисертації як:

– визначення раціональних схем взаємного навантаження для проведення приймально-здавальних випробувань електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту;

– наукове обґрунтування доцільності проведення випробувань на нагрів тягових електричних двигунів при пусковому або п'ятнадцятихвилинному струмі навантаження;

Головний технолог ПрАТ

«Запорізький електровозоремонтний завод»



О. М. Мазікін

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Дніпропетровського
національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна,
д.т.н., проф.  Б. Є. Боднар
« 17 » січня 2013 р.



АКТ

про використання результатів докторської дисертації
Афанасова Андрія Михайловича «Розвиток наукових основ та вдосконалення
енергоефективних методів випробування тягових електричних машин
постійного та пульсуючого струму»

Цій акт складений про те, що результати теоретичних та експериментальних досліджень докторської дисертації доцента Афанасова А. М. прийнято до використання у навчальному процесі університету. При викладанні студентам спеціальності «Електричний транспорт» предмету «Теорія електроприводу» використовуються:

- універсальна характеристика магнітних втрат у тягових електричних двигунах постійного та пульсуючого струму;
- формалізація енергетичних та електромеханічних принципів взаємного навантаження електричних машин постійного та пульсуючого струму;
- метод аналітичного визначення вагових коефіцієнтів впливу на перевищення температури обмотки якоря тягових електромашин електричних та магнітних втрат;
- метод моделювання магнітних характеристик тягових електричних двигунів постійного та пульсуючого струму.

Начальник НМУ, к. т. н., доц.

О. О. Матусевич

Завідувач кафедри електрорухомого
складу залізниць, д. т. н., проф.

Г. К. Гетьман