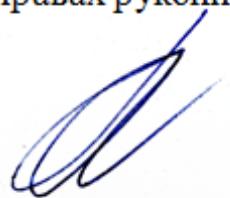


Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Омский государственный университет путей сообщения»  
(ОмГУПС (ОМИИТ))

На правах рукописи

ПОПОВ ДЕНИС ИГОРЕВИЧ



**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ  
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ  
ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация  
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор  
Харlamов Виктор Васильевич

Омск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Список принятых сокращений .....</b>	<b>6</b>
<b>Введение .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Актуальность разработки, анализ системных свойств и параметров электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин .....</b>	<b>18</b>
1.1. Постановка проблемы построения электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин .....	18
1.1.1. Анализ нормативной документации по испытаниям электрических машин .....	18
1.1.2. Проблема построения электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин и пути ее решения .....	22
1.2. Анализ актуальности вопроса испытаний тяговых электрических машин .....	26
1.3. Анализ системных свойств и параметров существующих электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин .....	33
1.3.1. Экспериментальная оценка эффективности электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин, применяющих возврат мощности, обусловленной нагрузкой .....	33
1.3.2. Анализ известных схемных решений для испытания асинхронных машин с возвратом мощности в сеть .....	38
1.3.3. Структурная схема электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки и классификация ее элементов .....	56
1.4. Выводы по первому разделу .....	61
<b>2. Математическое и имитационное компьютерное моделирование компонентов комплексов испытаний электрических машин .....</b>	<b>64</b>
2.1. Особенности математического моделирования преобразователя частоты .....	64
2.2. Особенности математического моделирования асинхронного двигателя .....	77
2.3. Математическая модель системы из двух асинхронных двигателей с механически связанными валами .....	80

2.4. Учет потерь при математическом моделировании взаимной нагрузки пары асинхронных машин.....	85
2.5. Выводы по второму разделу .....	87
<b>3. Математическое моделирование электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки.....</b>	<b>88</b>
3.1. Разработка показателей энергоэффективности электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки .....	89
3.1.1. Сравнение энергоэффективности различных схем испытаний, исходя из состава их оборудования .....	89
3.1.2. Разработка и расчет коэффициентов экономичности и затрат схем испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки .....	93
3.1.3. Сравнение энергоэффективности схем испытаний с асинхронной нагрузочной машиной и нагрузочным генератором постоянного тока.....	101
3.2. Формирование математических моделей электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки .....	104
3.2.1. Математическая модель испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с двумя преобразователями частоты .....	105
3.2.2. Математическая модель испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – генератор постоянного тока».....	111
3.2.3. Математическая модель испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» четырехфазного исполнения.....	114
3.2.4. Математическая модель испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с обменом энергией по сети .....	120
3.3. Экспериментальные исследования и сопоставление их результатов с результатами математического моделирования .....	126
3.4. Разработка программного обеспечения для расчета основных параметров элементов испытательных комплексов .....	131
3.5. Выводы по третьему разделу .....	135

<b>4. Разработка алгоритмов управления процессом испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, соответствующих схемных решений и принципов их применения.....</b>	<b>137</b>
4.1. Разработка алгоритма управления процессом стендовых испытаний методом взаимной нагрузки с системой асинхронный двигатель – асинхронный генератор с обменом энергией по сети .....	138
4.2. Разработка алгоритма управления процессом стендовых испытаний методом взаимной нагрузки с системой асинхронный двигатель – асинхронный генератор с обменом энергией по звену постоянного тока .....	143
4.3. Разработка алгоритма управления процессом стендовых испытаний методом взаимной нагрузки с системой асинхронный двигатель – генератор постоянного тока .....	149
4.4. Разработка алгоритма выбора варианта схемы испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки.....	160
4.5. Выводы по четвертому разделу .....	165
<b>5. Исследование влияния внутренних параметров и внешних воздействий на качество функционирования испытательных комплексов .....</b>	<b>167</b>
5.1. Исследование влияния параметров и схем испытательных комплексов на гармонический состав тока, потребляемого из сети .....	167
5.2. Исследование переходных режимов работы в звене постоянного тока испытательных комплексов.....	178
5.3. Исследование влияния изменения напряжения сети на качество функционирования испытательных комплексов .....	185
5.4. Разработка и исследование эффективности способа снижения потерь в схеме испытаний с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» .....	196
5.5. Выводы по пятому разделу .....	204
<b>6. Разработка способов и средств повышения эффективности электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин .....</b>	<b>206</b>
6.1. Разработка способов косвенного определения мощности на участках схем электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин .....	206
6.1.1. Совершенствование способов определения мощности и потерь в основных элементах схем испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки .....	207

6.1.2. Обоснование применимости предложенных способов определения мощностей, потребляемых и вырабатываемых асинхронными машинами в схемах испытания методом взаимной нагрузки.....	226
6.1.3. Экспериментальное апробирование способа определения потерь мощности на участках схем испытательных комплексов электрических машин .....	232
6.2. Разработка интегрированных схем испытаний электрических машин различного типа .....	238
6.3. Выводы по шестому разделу.....	255
<b>7. Совершенствование структурных компонентов электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин .....</b>	<b>257</b>
7.1. Разработка новых технических решений, направленных на совершенствование подсистемы измерений механических параметров на валу электрических машин.....	257
7.1.1. Разработка устройства для измерения вращающего момента на валу .....	257
7.1.2. Разработка способа измерения частоты вращения вала асинхронных машин, работающих по схеме взаимной нагрузки, с применением спектр-токового анализа .....	260
7.2. Разработка новых технических решений, направленных на совершенствование структурных компонентов комплексов для испытаний тяговых машин постоянного тока.....	269
7.2.1. Обоснование необходимости учета параметров режимов эксплуатации при испытаниях тяговых электродвигателей .....	269
7.2.2. Разработка способа определения остаточного ресурса электрощеток и метода настройки тяговых электродвигателей .....	273
7.2.3. Экспериментальная проверка предложенных решений по определению остаточного ресурса электрических щеток.....	292
7.3. Расчет экономической эффективности предложенных разработок .....	297
7.4. Выводы по седьмому разделу .....	302
<b>Заключение.....</b>	<b>304</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>308</b>
<b>Приложения.....</b>	<b>337</b>

## Список принятых сокращений

АД – асинхронный двигатель;  
АДКР – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;  
АГ – асинхронный генератор;  
АМ – асинхронная машина;  
БПФ – быстрое преобразование Фурье;  
ВДП – вольтодобавочный преобразователь;  
ГПТ – генератор постоянного тока;  
ДП – добавочные полюсы;  
ДПТ – двигатель постоянного тока;  
ЗПТ – звено постоянного тока;  
КПД – коэффициент полезного действия;  
КЩУ – коллекторно-щеточный узел;  
МДС – магнитодвижущая сила;  
МПСУиД – микропроцессорная система управления и диагностирования;  
МПТ – машина постоянного тока;  
НАМ – нагрузочная асинхронная машина;  
НГПТ – нагрузочный генератор постоянного тока;  
ОЯ – обмотка якоря;  
ПК – персональный компьютер;  
ПЧ – преобразователь частоты;  
СВЛТР – система взаимодействия с локомотивом посредством технологической радиосвязи;  
СУ – система управления;  
СУиД – системы управления и диагностирования;  
СУ ПЧ – система управления преобразователя частоты;  
ТП – тиристорный преобразователь;  
ТР – текущий ремонт;  
ТУ – Технические условия;  
ТЭД – тяговый электродвигатель;  
ТЭМ – тяговая электрическая машина;  
ЧДД – чистый дисконтированный доход;  
ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ШПТ – шина постоянного тока;  
ЭВМ – электронная вычислительная машина;  
ЭД – электродвигатель;  
ЭДС – электродвижущая сила;  
ЭМ – электрическая машина;  
ЭТК – электротехнический комплекс.

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

Актуальность изучения и развития вопросов, связанных с разработкой электротехнических комплексов для испытаний электрических машин, обусловлена особенностями современного этапа развития систем электропривода. В настоящее время происходит постепенное замещение электроприводов постоянного тока асинхронными, а также внедрение новых типов коллекторных электродвигателей с современными системами управления, выполненными на базе силовой электроники. Это приводит к существенному изменению показателей режимов работы электроприводов и, следовательно, увеличению количества их отказов. Данная ситуация усугубляется общим низким качеством технического обслуживания электрических машин, как правило, обусловленным отсутствием необходимого для этого оборудования, и несоблюдением норм, предписывающих полный объем испытаний, которые зачастую проводятся в сокращенном виде, например, без нагрузки.

Выполнение полного перечня программы приемо-сдаточных испытаний, приведенных в соответствующих Технических условиях, позволяет осуществлять контроль качества ремонта электродвигателей, что является необходимым условием снижения потока их отказов. Кроме того появляются исследования, указывающие на необходимость расширения установленных перечней испытаний, с целью учета в них показателей режимов работы электродвигателей в условиях реальной эксплуатации. Это требует выполнения испытаний под нагрузкой с задаваемыми определенным образом в течение испытаний параметрами режимов работы.

Важную роль в обеспечении высокой эффективности электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний электрических машин, играет метод взаимной нагрузки, с применением нагрузочного генератора для создания момента на валу испытуемого двигателя. Рекуперируемая генератором электроэнергия компенсирует часть энергии, необходимой для питания двигателя, в результате данная пара машин потребляет из сети мощность, равную их суммарным потерям. Данный метод испытаний, позволяющий снизить капитальные вложения в производство испытательных станций и затраты на их эксплуатацию, хорошо зарекомендовал себя на сети железнодорожных ремонтных депо при испытаниях тяговых электродвигателей постоянного тока. Применение данного метода для испытания как коллекторных, так и асинхронных машин позволит обеспечить высокую эффективность новых испытательных станций, а также выполнение полного перечня испытаний по программе соответствующей категории.

Особо актуальной тема исследования является для железнодорожного транспорта, что обусловлено необходимостью обеспечения эффективной эксплуатации подвижного состава и его компонентов, включающей своевременное техническое обслуживание, ремонт и послеремонтные приемо-сдаточные испытания тяговых электродвигателей.

В настоящее время на российские железные дороги поступают в эксплуатацию новые локомотивы с тяговым приводом на базе коллекторных электродвигателей, для которых накоплен значительный опыт технического обслуживания и полностью сформирована нормативная база, устанавливающая правила и технологии осуществления ремонта и послеремонтных испытаний. В то же время активно пополняется парк локомотивов и электропоездов с асинхронным тяговым электроприводом. Однако для них пока не сформирована материально-техническая база, необходимая для осуществления ремонта и приемосдаточных испытаний. Следовательно, с каждым годом повышается актуальность разработки и внедрения электротехнических комплексов, позволяющих проводить приемосдаточные испытания тяговых электродвигателей новых типов подвижного состава, что требует дооснащения или переоснащения ремонтных депо. Отмеченная проблема также касается вспомогательных машин (двигателей компрессоров и моторвентиляторов), как коллекторных, так и асинхронных.

Актуальной тема исследований также является при эксплуатации подвижного состава метрополитенов и городского наземного электрического транспорта, находящихся в условиях во многом аналогичных с железнодорожным транспортом. Так же актуальной тема исследования является для заводов-производителей электрических машин, осуществляющих их испытания (приемочные, квалификационные, типовые и др.), и предприятий, изготавливающих оборудование для данных испытаний. Кроме того электротехнические комплексы для испытаний электрических машин востребованы для научных исследований и в образовательном процессе.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Теоретическими исследованиями и разработкой технических решений в области испытаний электрических машин в России и ближнем зарубежье занимаются коллективы нескольких образовательных, научных и производственных организаций и предприятий (ТПУ, РУТ, ПГУПС, ОмГУПС, РГУПС, НГТУ, ВЭлНИИ, ИГЭУ, ПсковГУ, КамчатГТУ, МГТУ им. Г. И. Носова, ГГТУ им. П. О. Сухого, ООО «ЛокоТех», АО «СТМ», ПКБ ЦТ ОАО «РЖД» и др.).

Значительный научный вклад в развитие вопросов, связанных с математическим моделированием электротехнических комплексов, включающих в свой со-

став электромеханические преобразователи, испытаниями электродвигателей и оценкой их технического состояния внесли такие учёные как Г. К. Жерве, И. П. Копылов, О. Д. Гольдберг, Р. Хольм, В. Я. Беспалов, А. С. Курбасов, О. Л. Рапопорт, Н. Н. Портнягин, Ю. Б. Казаков, В. З. Ковалев, С. И. Качин, И. В. Плохов, А. С. Глазырин, В. Г. Букреев, В. М. Завьялов, И. Ю. Семыкина, О. В. Мельниченко, А. А. Пугачев, Н. И. Щуров, О. В. Крюков, М. Ю. Петушкин, В. В. Никитин, М. Ф. Карасев, В. Д. Авилов, В. В. Харламов и др.

Многочисленные исследования электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний асинхронных машин, работающих по одной из схем взаимной нагрузки, выполнялись под руководством О. Л. Рапопорта (ТПУ), В. Д. Авилова (ОмГУПС), Ю. Б. Казакова (ИГЭУ). Однако в известных исследованиях не рассмотрен полный спектр схем взаимной нагрузки асинхронных машин и машин постоянного тока, не выполнено сравнения показателей работы электротехнических комплексов, разработанных с применением данных схем, не изучено их влияние на питающую сеть, а также влияние сети на качество их функционирования.

Множество разработок посвящено устройствам, применяемым в электротехнических комплексах при испытаниях электрических машин для измерения и контроля параметров режимов их работы. При этом неизученными остаются вопросы применимости некоторых средств и способов измерения и контроля в схемах взаимной нагрузки. Требуют дополнительной проработки вопросы применения в испытательных комплексах информации, накапливаемой существующими бортовыми системами мониторинга подвижного состава, регистрирующими широкий набор показателей режимов работы тяговых двигателей.

Объектом исследования является электротехнический комплекс для испытания тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки.

Предметом исследования – принципы построения, моделирования и управления электротехническим комплексом для испытания тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки.

**Целью** диссертационной работы является повышение качества функционирования электротехнических комплексов для испытания тяговых электрических машин в процессе их проектирования, создания и эксплуатации.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ системных свойств и параметров существующих электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки, разработать обобщенную структурную схему электротехнического комплекса данного типа и выполнить классификацию ее элементов.

2. Сформировать совокупность математических моделей электротехнических комплексов для испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки, учитывающих физические процессы в элементах силовой электроники и энергетические показатели испытательных комплексов.

3. Осуществить экспериментальную проверку адекватности математического моделирования электротехнического комплекса для испытания тяговых электрических машин при изменении нагрузки испытуемого двигателя от холостого хода до номинального режима с учетом принятых допущений.

4. Разработать способ управления электротехническим комплексом, предназначенный для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, позволяющий снизить потери в нагрузочной асинхронной машине за счет регулирования параметров напряжения, подаваемого на ее обмотку статора.

5. Синтезировать алгоритмы управления электротехническим комплексом для испытаний асинхронных машин на нагрев методом взаимной нагрузки и соответствующие технические решения, применение которых позволяет осуществить автоматизацию процесса испытаний.

6. Исследовать влияние изменения напряжения питающей сети на качество функционирования электротехнических комплексов для испытания тяговых электрических машин.

7. Изучить влияние емкости конденсаторов в звене постоянного тока преобразователей частоты испытательного комплекса на показатели его режимов работы и обосновать диапазоны рекомендуемых значений данной емкости.

8. Определить влияние основных параметров испытательного комплекса на гармонический состав потребляемого из сети тока.

9. Выявить влияние основных параметров испытательного комплекса на его энергоэффективность.

10. Разработать способы и технические решения осуществления технологических операций, выполняемых в процессе испытаний тяговых электрических машин, направленные на повышение его технологичности, совершенствование компонентов испытательных комплексов и их структуры.

11. Разработать программное обеспечение, позволяющее осуществлять математическую обработку данных при проектировании, создании и эксплуатации электротехнических комплексов для испытания тяговых электрических машин.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

Сформированы научные основы построения электротехнических комплексов для испытания тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки, включающие следующие научные результаты:

1. Разработана обобщенная структурная схема электротехнического комплекса, предназначенного для испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки, и выполнена классификация ее элементов.
2. Сформирована совокупность математических моделей электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки, учитывающих физические процессы в элементах силовой электроники и энергетические показатели испытательных комплексов.
3. Разработан способ управления электротехническим комплексом, предназначенным для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, отличающийся снижением потерь в нагрузочной асинхронной машине за счет регулирования параметров напряжения, подаваемого на ее обмотку статора.
4. Синтезированы алгоритмы управления электротехническим комплексом для испытаний асинхронных машин на нагрев методом взаимной нагрузки и соответствующие технические решения, применение которых позволяет осуществить автоматизацию процесса испытаний.
5. Усовершенствован способ определения скорости вращения ротора асинхронного двигателя с применением спектр-токового анализа, учитывающий особенности спектров напряжения и тока при работе асинхронных машин в составе электротехнического комплекса, предназначенного для их испытаний методом взаимной нагрузки.
6. Синтезирован способ определения момента на валу и частоты вращения ротора электрической машины в процессе ее испытаний в составе электротехнического комплекса, отличающийся совмещением в сформированном электрическом сигнале информации о вращающем моменте и частоте вращения.
7. Усовершенствован способ определения остаточного ресурса электрощеток коллекторного тягового электродвигателя в процессе его испытаний за счет учета данных о частоте вращения, токе якоря и интенсивности искрения, полученных бортовой системой мониторинга при эксплуатации подвижного состава.
8. Разработаны принципы построения интегрированных электротехнических комплексов для испытаний асинхронных двигателей и машин постоянного тока методом взаимной нагрузки, исключающие дублирование оборудования в составе электротехнических комплексов, выполняющего одинаковые функции.

9. Разработаны технические решения, позволяющие обеспечить косвенное определение мощности, потребляемой и вырабатываемой асинхронными машинами при испытаниях методом взаимной нагрузки, отличающиеся структурой и составом оборудования электротехнического комплекса.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Полученная совокупность математических моделей позволяет исследовать физические процессы во всех силовых электрических цепях в предложенных схемах испытаний в динамических и статических режимах работы.

2. Разработанные математические модели обеспечивает возможность в процессе проектирования электротехнических комплексов для испытаний электрических машин определять необходимые параметры их оборудования при заданных номинальных параметрах испытуемых двигателей, а также обосновать применение для питания уже имеющейся на предприятии электросети или необходимость установки дополнительного источника питания.

3. Применение алгоритмов управления процессом испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки и соответствующих им схемных решений позволяет автоматизировать процесс испытаний асинхронных двигателей на нагрев при различных типах нагрузочных генераторов и вариантах обмена энергией между испытуемыми машинами.

4. Применение разработанного алгоритма обеспечивает возможность осуществлять научно обоснованный выбор конкретной схемы при разработке электротехнического комплекса для испытания тяговых асинхронных двигателей.

5. Способ нагружения асинхронного двигателя при его испытании методом взаимной нагрузки с регулированием параметров напряжения, подаваемого на обмотку статора генератора, позволяет повысить показатели энергоэффективности электротехнического комплекса с асинхронной нагрузочной машиной.

6. Разработанные принципиальные схемы позволяют с необходимой точностью реализовать косвенное определение мощности, потребляемой испытуемым асинхронным двигателем и вырабатываемой нагрузочной асинхронной машиной в составе электротехнического комплекса для испытания тяговых электрических машин, по значениям напряжения и тока в звене постоянного тока преобразователей частоты.

7. Предложенные интегрированные схемы силовой части электротехнических комплексов для испытания асинхронных двигателей и машин постоянного тока методом взаимной нагрузки обеспечивает возможность исключить дублирование оборудования, выполняющего одинаковые функции при испытаниях электрических машин различного типа.

8. Способ определения момента на валу и частоты вращения ротора электрической машины в процессе ее испытаний в составе электротехнического комплекса позволяет использовать один сигнал для определения данных механических параметров, что уменьшает количество необходимых датчиков и преобразователей.

9. Способ определения скорости вращения ротора асинхронного двигателя с применением спектр-токового анализа позволяет за счет учета особенности силовой части схемы электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин уменьшить диапазон поиска зубцовых гармоник и, как следствие, снизить затраты вычислительных ресурсов и вероятность ошибочного определения номеров зубцовых гармоник при обеспечении высокого уровня автоматизации.

10. Способ прогнозирования износа электрощеток тяговых электродвигателей в составе электротехнического комплекса, предназначенного для их испытаний, позволяет сформировать обоснованные рекомендации по своевременной замене щеток с учетом показателей режимов работы электродвигателей, фиксируемых бортовой системой мониторинга.

### **Методология и методы исследования.**

Решение исследовательских задач в работе базируется на известных результатах и разработках в данном научном направлении, корректном применении системного подхода, методов теоретической электротехники, теории электромеханических преобразователей энергии, нелинейных дифференциальных уравнений, математического моделирования, спектрального анализа, математического планирования эксперимента. Экспериментальные исследования проведены на разработанных физических моделях. Имитационное моделирование выполнялось в программе *Multisim*. Для расчета систем нелинейных дифференциальных уравнений применялась компьютерная программа *Mathcad*, а также разработанные алгоритмы, реализованные в среде *Java*. Массивы данных, полученных от систем мониторинга показателей режимов работы, обрабатывались в программе *Microsoft Excel*.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Совокупность математических моделей электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки.

2. Способ снижения потерь в электротехническом комплексе для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки за счет регулирования параметров напряжения, подаваемого на обмотку статора нагрузочной асинхронной машины.

3. Алгоритмы управления электротехническим комплексом для испытаний асинхронных машин на нагрев методом взаимной нагрузки.

4. Способ определения скорости вращения ротора асинхронного двигателя с применением спектр-токового анализа, учитывающий особенности спектров напряжения и тока при работе асинхронных машин в составе электротехнического комплекса, предназначенного для их испытаний методом взаимной нагрузки.

5. Способ определения момента на валу и частоты вращения ротора электрической машины в процессе ее испытаний в составе электротехнического комплекса, позволяющий совместить в формируемом электрическом сигнале информацию о вращающем моменте и частоте вращения.

6. Способ определения остаточного ресурса электрощеток тяговых электродвигателей с учетом показателей их режимов работы, фиксируемых бортовой системой мониторинга.

7. Технические решения построения интегрированных электротехнических комплексов для испытаний асинхронных двигателей и машин постоянного тока методом взаимной нагрузки.

8. Технические решения, позволяющие обеспечить косвенное определение мощности, потребляемой и вырабатываемой асинхронными машинами при испытаниях методом взаимной нагрузки.

### **Реализация результатов работы.**

Основные научные результаты диссертационной работы реализованы и внедрены на следующих предприятиях и организациях:

- схема испытания асинхронных электродвигателей методом взаимной нагрузки внедрена в производственный процесс на предприятии ООО «ЛокоТех-Сервис»;

- схема для испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки принята к использованию и внедрена в технологические процессы разработки и изготовления стендов для испытания асинхронных двигателей в ООО «Омский завод транспортной электроники»;

- схема испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки и программа «Расчет параметров схемы испытаний АД-АГ» внедрена в процесс производства стендов, предназначенных для испытания асинхронных двигателей, в ООО «ТПИ»;

- способ прогнозирования износа электрощеток тяговых электродвигателей с учетом показателей, измеряемых при эксплуатации подвижного состава внедрен в процесс эксплуатации подвижного состава в ООО «ЛокоТех»;

- способ измерения момента на валу двигателя и частоты вращения его ротора принят к использованию при разработке испытательных стендов в ОАО «НИИТКД»;

- способ измерения момента на валу двигателя и частоты вращения его ротора внедрен в процесс разработки стендов, предназначенных для испытания электродвигателей, в ООО НПО «ОМИКС»;

- математические модели электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки, используются в учебном процессе в Омском государственном университете путей сообщения.

Внедрение результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

**Степень достоверности** научных исследований и результатов диссертационной работы подтверждена качественным совпадением и достаточной сходимостью расчетных и экспериментальных данных, практической апробацией полученных технических решений и основана на корректно использованных методах, алгоритмах и допущениях, принятых при математическом моделировании.

Правомерность принятых допущений при математическом моделировании процесса испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки подтверждается достаточно высокой степенью сходимости теоретических расчетов с экспериментальными данными. Относительные погрешности полученных в результате математического моделирования значений коэффициента мощности, мощности и тока соответственно не превышают 5, 7 и 10 % в пределах рабочего диапазона нагрузки асинхронного двигателя.

### **Апробация результатов.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на конференциях различного уровня, тематика которых соответствовала направлению диссертационного исследования, в том числе на Всероссийской научно-практической конференции «115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: образование – наука – производство» (Чита, 2017 г.), Международной научной конференции «Технические науки в России и за рубежом» (Москва, 2017 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности» (Хабаровск, 2018 г.), Всероссийской национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (Ростов на Дону, 2018 г.), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (Омск, 2015 г.), Международной научно-практической конференции «Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем» (Омск, 2016 г.), научной конференции

«Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2016, 2017, 2019 гг.), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (Омск, 2018, 2020 гг.), Международной научно-практической конференции «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (Омск, 2020 гг.), Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2019 г.), Международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения» (Омск, 2019 г.).

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Рассматриваемая область исследования соответствует паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», а именно: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»; п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Публикации.** Основное содержание работы опубликовано в 57 печатных работах, из них 19 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, пять статей в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, шесть патентов РФ на изобретение и 10 на полезные модели.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, семи разделов, заключения, библиографического списка из 259 наименований и 3 приложений. Общий объем работы составляет 365 страниц, 16 таблиц и 199 рисунков.

# 1. АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ, АНАЛИЗ СИСТЕМНЫХ СВОЙСТВ И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В основе разработки электротехнических комплексов для испытаний электрических машин лежит понимание всего объема задач, которые необходимо решать данным техническим системам. Это требует глубокого анализа проблемы с точки зрения существующих норм и правил текущего обслуживания и ремонта. Не менее важным является анализ существующего уровня техники, создающий базу для развития новых научных идей. Глубокое понимание системных свойств и связей в электротехническом комплексе, вытекающее из понимания физических процессов, позволяет найти верные технические решения в процессе дальнейшего проектирования.

В данном разделе выполнена постановка проблемы разработки электротехнических комплексов испытаний электрических машин, приведены результаты проведенного анализа нормативной документации по испытаниям электрических машин, выполнен анализ отказов оборудования подвижного состава железных дорог рассмотрены наиболее современные схемы для испытания электрических машин, позволяющие использовать энергию, вырабатываемую нагрузочным генератором, на питание испытуемого двигателя (схемы со взаимной нагрузкой), проведены оценочные экспериментальные исследования, доказывающие высокую энергоэффективность данных схем. Представлены схемные решения для возможности проведения испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки в соответствии с нормативными требованиями.

## **1.1. Постановка проблемы построения электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин**

### *1.1.1. Анализ нормативной документации по испытаниям электрических машин*

Разработке оборудования всегда должен предшествовать анализ нормативной документации, которой оно должно соответствовать.

Объем задач по испытанию электрических машин описывается комплексом нормативных документов, включающих в себя стандарты, и другие руководящие документы, разрабатываемые, в том числе, отдельными предприятиями для внутреннего пользования [170, 208]. Данные документы дают понятийный аппарат,

классифицируют виды деятельности (например, по видам и категориям испытаний) и устанавливают конкретные правила проведения работ.

Количество испытаний различного типа, которые проходят электрические машины с целью диагностирования их технического состояния, достаточно велико [143, 216, 229]. Конструкция электрических машин, выпускаемых серийно, имеет незначительные отличия. В связи с этим их испытания подразделяются на определенный ряд категорий.

Категории, виды и методы испытаний в зависимости от принадлежности электрической машины (ЭМ) к той или иной группе регламентируются целым рядом ГОСТов.

Ниже приведен перечень основных ГОСТов, регламентирующих объем различных видов испытаний и методы их проведения. Основные ГОСТы, регламентирующие процессы испытаний, охватывающие машины постоянного и переменного тока, указаны в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Основные нормативные документы по испытанию машин постоянного и переменного тока**

Нормативный документ	Примечания
11828-86. Машины электрические врачающиеся. Общие методы испытаний [30]	Не распространяется на электрические машины бортовых систем подвижных средств наземного и воздушного транспорта
2582-2013. Машины электрические врачающиеся тяговые. Общие технические условия [35]	Распространяется на тяговые ЭМ мощностью более 300 Вт подвижного состава железнодорожного и городского (рельсового и безрельсового) транспорта
16264.0-2018. Машины электрические малой мощности. Двигатели. Общие технические условия [32]	Распространяется на электродвигатели (ЭД) мощностью до 1000 Вт; не распространяется на ЭД подвижного транспорта и асинхронные двигатели серий 4А, 4АМ, АИ

Основные ГОСТы, регламентирующие процессы испытаний, охватывающие машины постоянного тока, указаны в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Основные нормативные документы по испытанию машин постоянного тока

Нормативный документ	Примечания
10159-79. Машины электрические вращающиеся коллекторные. Методы испытаний [29]	Не распространяется на ЭМ бортовых систем наземного, водного и воздушного транспорта
12049-75. Двигатели постоянного тока для машин напольного безрельсового электрифицированного транспорта. Общие технические условия [31]	Распространяется на двигатели постоянного тока (ДПТ) машин напольного безрельсового электрифицированного транспорта (электропогрузчики, электротягачи, электроштабелеры, электротележки и электромобили) и ДПТ, работающие во взрывоопасных и агрессивных средах
16264.3-2018. Двигатели коллекторные. Общие технические условия [34]	Распространяется на коллекторные ЭД до 1000 Вт; не распространяется на ЭД электрифицированных игрушек и следящих приводов

Основные ГОСТы, регламентирующие процессы испытаний, охватывающие асинхронные машины, указаны в табл. 1.3.

Государственные стандарты предусматривают основные категории испытаний, приведенные на рис. 1.1.

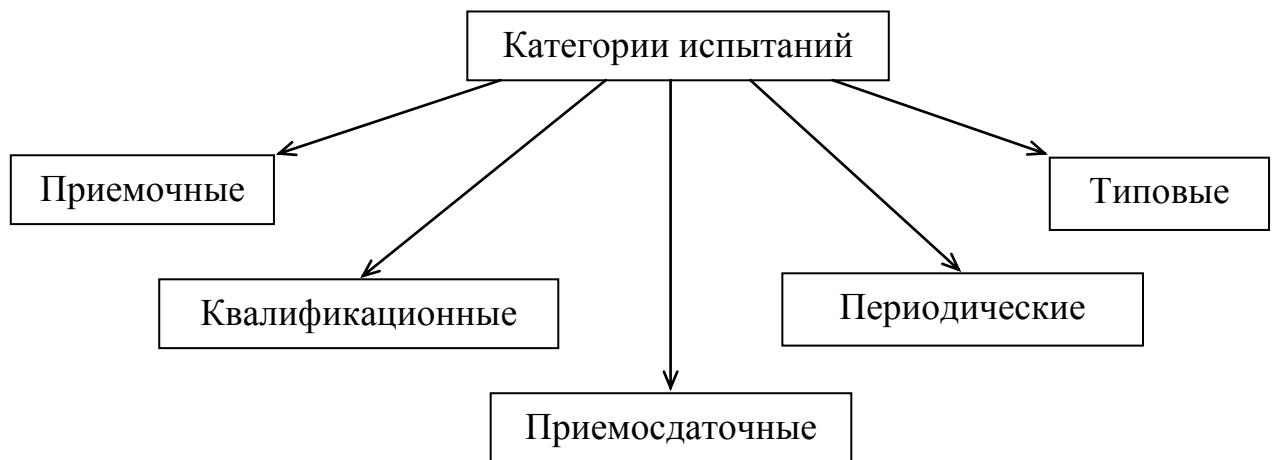


Рис. 1.1. Категории испытаний

Приемочным, квалификационным, периодическим и типовым испытаниям должны подвергаться только некоторые опытные образцы. Все названные категории испытаний проводятся на предприятиях – изготовителях электрических машин.

Таблица 1.3

## Основные нормативные документы по испытанию асинхронных машин

Нормативный документ	Примечания
Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний [41]	В большей части повторяет ГОСТ 7217-87
31606-2012. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования [39]	Распространяется на АД от 0,12 до 400 кВт напряжением до 690 В; при мощности от 0,12 до 1 кВт – только на АД типоразмерного ряда; не распространяется на АД наземного, морского и воздушного транспорта и взрывозащищенные
16264.1-2016. Двигатели асинхронные. Общие технические условия [33]	Распространяется на АД до 1000 Вт; не распространяется на АД взрывозащищенные, следящих электроприводов, питающиеся от несинусоидальных источников и управляемые пространственным поворотом осей потоков

Приемочные испытания включают в себя наиболее широкий спектр типов испытаний, которые приведены в соответствующих нормативных документах (стандартах или Технических условиях) [28]. Приемочные испытания проводят для определения соответствия электрических машин требованиям нормативных документов [53].

Приемосдаточные испытания проводят со всеми машинами, выпускаемыми предприятием. Программа данных испытаний составляется из некоторых пунктов приемочных испытаний с целью минимизации временных затрат необходимых для определения соответствия параметров конкретной электрической машины техническим требованиям.

Приемосдаточные испытания проводят с каждой электрической машиной. Приемосдаточные испытания осуществляют не только производители электрических машин, но и на предприятия, занимающиеся их эксплуатацией и ремонтом.

Так, например, методику технического обслуживания и ремонта ТЭД электровозов, конкретные виды работ и их объем определяет «Руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту тяговых электродвигателей локомотивов» [170]. В соответствии с данным руководством каждый выпускаемый из ремонта тяговый двигатель необходимо подвергнуть приемосдаточным испытаниям в соответствии с требованиями ГОСТ 2582. Данный стандарт предписывает проведение испытаний по определенной программе в зависимости от их категории [35].

Каждый ТЭД после капитального, среднего или текущего ремонта (ТР-3) должен пройти приемо-сдаточные испытания по программе, указанной в Руководстве [208].

Внесение изменений в конструкцию изделия требует проведения типовых испытаний. Также проведение испытаний данной категории необходимо в случае внесения существенных изменений в технологии производства или в случае замены конструкционных материалов. Такое требование к проведению испытаний обусловлено тем, данные изменения в производстве могут привести к изменению технических характеристик изделия. Программа испытаний данной категории частично повторяет приемочные испытания.

Периодические испытания выполняют через определенные промежутки времени, установленные в технических условиях на данный тип электрических машин с целью контроля их качества при серийном выпуске. Программы данных испытаний являются значительно более подробными по сравнению с приемосдаточными и близки к приемочным испытаниям.

Эксплуатационные испытания выполняют с целью осуществления контроля над техническим состоянием электрических машин в процессе эксплуатации.

#### *1.1.2. Проблема построения электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин и пути ее решения*

Неизбежное замещение привода постоянного тока на асинхронный электропривод обусловлено его известными преимуществами – более высокой надежностью и меньшими эксплуатационными расходами. Постепенный переход на асинхронные машины происходит во многих отраслях промышленности, в том числе и

на железнодорожном транспорте. Задача широкого внедрения асинхронного тягового привода поставлена в таких основополагающих документах как «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» и «Стратегии развития транспортного машиностроения Российской Федерации до 2030 года» [182, 183]. В настоящее время уже принят в эксплуатацию на сети российских железных дорог целый ряд различных типов подвижного состава с асинхронными ТЭД: созданный российской компанией «Группа Синара» при участии немецкого концерна *Siemens* грузовой электровоз «Гранит» (2ЭС10), спроектированный Трансмашхолдингом пассажирский электровоз «Олимп» (ЭП20), изготовленный Брянским машиностроительным заводом тепловоз «Витязь» (2ТЭ25А) и др. [103, 104, 165, 171].

Высокая эффективность эксплуатации новых типов подвижного состава может быть обеспечена только при правильной организации процесса технического обслуживания и ремонта. Однако ввиду значительной инерционности процесса введения новых производственных мощностей в локомотивных ремонтных депо актуальной задачей является разработка и внедрение современных электротехнических комплексов для обеспечения послеремонтных (приемо-сдаточных) испытаний тяговых двигателей в соответствии с руководящими документами [170].

Вводимые в эксплуатацию новые испытательные комплексы должны обладать наиболее современным уровнем техники в них должны быть обеспечены высокие показатели производительности экономической эффективности, энергоэффективности, безопасности, эргonomичности и др., что соответствует не только принятым стратегиям развития отдельных отраслей, но и законодательству [100, 181-183]. Кроме того необходимо предусмотреть вопрос рациональной интеграции нового оборудования для испытания асинхронных машин в функционирующие системы испытаний машин постоянного тока, исключить возможное дублирование различным оборудованием одних и тех же функций.

Понятие эффективности электротехнических комплексов для испытаний электрических машин можно связать с возможностью комплекса выполнять свою основную функцию (испытания электрических машин) при высоких значениях обозначенных выше показателей. Следует отметить, что часть из этих показателей могут быть оценены количественно (например, энергоэффективность), другая часть – только качественно (например, эргономичность и безопасность).

Экономическая эффективность электротехнического комплекса зависит от двух параметров: стоимость капитальных затрат на внедрение и затраты на экс-

плуатацию. Затраты на внедрение во многом определяется себестоимостью оборудования, которая зависит от его состава. Затраты на эксплуатацию во многом зависят от энергетической эффективности применяемых методов испытаний.

Все категории испытаний требуют значительных затрат электроэнергии. Следовательно, экономия электроэнергии при испытаниях является важной научной задачей.

В известных исследованиях по данной теме отмечают следующие способы повышения энергоэффективности процесса испытаний [23].

### 1. Безнагрузочные испытания.

Способы осуществления испытаний машин с нагрузкой на валу требуют применения специальных электротехнических комплексов. Их разработка и внедрение требуют значительных капитальных затрат.

На примере опыта эксплуатации железнодорожного подвижного состава можно отметить, что ограничения в финансировании внедрения нового оборудования приводят к нарушениям технологии испытаний, предписанной стандартами и правилами испытаний и сведению их к испытанию электрических машин без нагрузки [37].

Принцип безнагрузочных испытаний АМ с короткозамкнутым ротором основан на проведении опытов холостого хода и короткого замыкания. Также иногда проводят эксперимент с искусственным нагружением (задается режим холостого хода с обрывом одной фазы статора) на пониженном напряжении в полтора – два раза [90].

По значениям электрических параметров, измеренных при проведении опытов холостого хода и короткого замыкания вычисляют значения сопротивлений Г-образной схемы замещения, на основе чего рассчитывают рабочие характеристики АМ [20].

В случае искусственного нагружения АД нагрузка обеспечивается тормозным моментом, созданным обратным магнитным потоком, получаемым при разложении эллиптического магнитного поля на два круговых, вращающихся в разные стороны.

Безнагрузочные испытания позволяют получить значительную экономию электроэнергии в процессе испытаний по сравнению с методами, при реализации которых создается непосредственная нагрузка испытуемой машине

Однако безнагрузочные испытания дают полного объема диагностической информации, позволяющего составить заключение о исправности двигателя и его

готовности к выпуску в эксплуатацию. Также такие испытания противоречат требованиям стандартов.

2. Энергосберегающие испытания по сокращенным программам с применением методов компьютерного моделирования. Данные методы имеют те же недостатки, что и безнагрузочные испытания.

3. Применение обратного преобразования механической энергии в электрическую с ее последующим полезным использованием.

Одним из вариантов реализации данного способа является динамическое нагружение электродвигателя переходным процессом [85-87, 92, 117].

Процесс нагружения электродвигателя динамическим моментом осуществляется путем поочередного разгона в двигательном режиме и торможения в рекуперативном.

Однако следует заметить, что если при задании динамического режима средние потери в меди станут такими же, как в номинальном режиме, то потери в магнитопроводе не будут соответствовать номинальному режиму. Таким образом, метод испытаний путем нагружения динамическим моментом значительно искажает диагностическую картину и затрудняет постановку верного диагноза: годен ли электродвигатель к эксплуатации.

Другим вариантом, относящимся к данному способу экономии электроэнергии, может быть признан метод взаимной нагрузки, который подразумевает работу двух электрических машин с механическим соединением их валов [4, 9, 13, 49-51, 56, 58, 63-65, 71, 77, 93, 95, 128, 129, 137-139, 180, 212, 236-237]. При этом одна машина работает в режиме генератора (рекуперации), создает момент нагрузки на валу и передает выработанную электрическую энергию второй машине, вторая машина (испытуемый двигатель) потребляет электрическую энергию, преобразует ее в механическую и передает ее по валу первой машине. Энергия, потребляемая такой парой двигателей, расходуется только на потери энергии в них. Такой метод позволяет нагрузить двигатель в номинальном режиме и не вносит искажения в диагностическую информацию.

Таким образом, добиться высокой эффективности разрабатываемых электротехнических комплексов для испытаний электрических машин можно за счет обеспечения рационального использования входящего в их состав оборудования, разработке новых образцов высокотехнологичного оборудования, разработке новых схем и способов испытаний электрических машин, обеспечивающих более высокую энергоэффективность [79].

## **1.2. Анализ актуальности вопроса испытаний тяговых электрических машин**

Актуальность разработки новых электротехнических комплексов для испытаний электродвигателей непосредственно связана с актуальностью проблем, связанных с их испытаниями.

Ряд категорий испытаний электродвигателей необходимо проводить при их выпуске на заводах-изготовителях, которые являются первым звеном, заинтересованным в разработке современных эффективных испытательных комплексов.

Однако не меньшее значение имеют предприятия, осуществляющие ремонт и техническое обслуживание электродвигателей.

К наиболее крупным предприятиям такого типа относятся локомотивные ремонтные депо на железнодорожном транспорте, осуществляющие по окончании ремонта приемосдаточные испытания тяговых электрических машин подвижного состава.

В данном случае именно вопрос надежности электродвигателей в совокупности с внедрением новых типов подвижного состава с асинхронными ТЭД определяют актуальность исследований, связанных с разработкой испытательных комплексов.

Ниже представлен анализ отказов электрических машин на основе данных за 2017-2018 гг. по подвижному составу относительно новых серий, получивших на текущий момент широкое внедрение на железнодорожном транспорте.

Анализ данных по отказам пассажирских электровозов ЭП20 с асинхронными тяговыми двигателями выполнен по состоянию на 01.01.2019 г. На указанную дату в приписном парке находилось 65 электровозов данного типа.

Распределения отказов электрооборудования электровозов ЭП20 за 2017-2018 гг. приведены на рис. 1.2.

Электровоз ЭП20 имеет асинхронный тяговый двигатель ДТА-1200А номинальной мощностью в часовом режиме 1200 кВт, а также асинхронные двигатели вентиляторов: АЭВ160С2У2 (11 кВт), АЭВ132М2У2 (7,5 кВт), АЭВ80В2М2 (1,5 кВт).

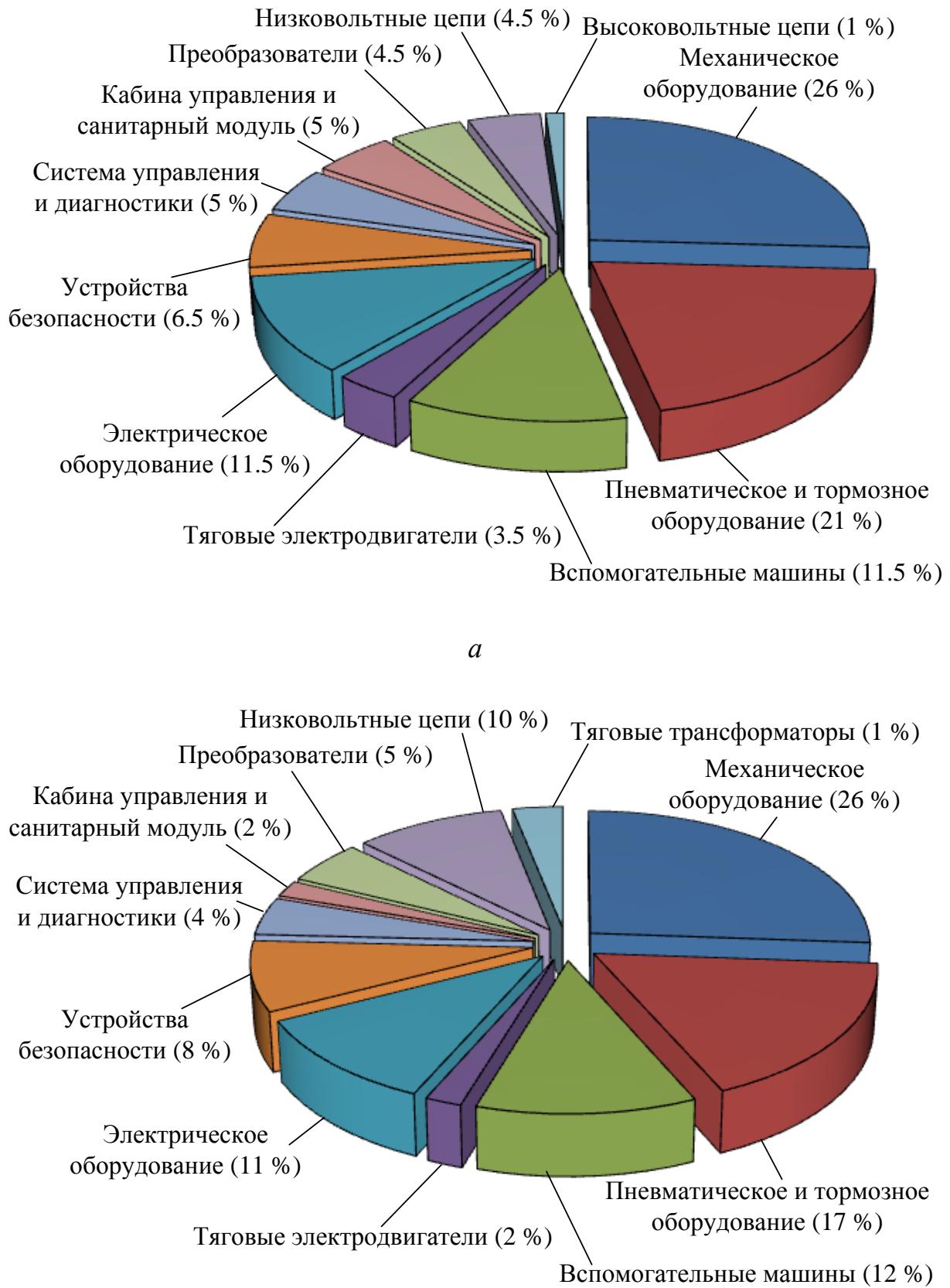


Рис. 1.2. Распределение отказов электрооборудования электровозов ЭП20: а – за 2017 г., б – за 2018 г.

За рассматриваемый период эксплуатации зафиксированы более 300 отказов, которые привели одному из четырех исходов: к вызову вспомогательного локомотива, задержке поезда, постановке локомотива на неплановый ремонт или устранению неисправности на плановом ремонте.

Как показывает анализ за 2017-2018 гг. отказы электровозов типа ЭП20, связанные с тяговыми и вспомогательными электродвигателями, суммарно составляют 14 – 15 % и обусловлены неисправностями их различных узлов.

Проанализируем данные по отказам грузовых электровозов 2ЭС10 с асинхронными тяговыми двигателями. По состоянию на 01.01.2019 г. в приписном парке находилось 157 электровозов данного типа.

Распределения отказов электрооборудования электровозов 2ЭС10 за 2017-2018 гг. в виде диаграмм Парето приведены на рис. 1.3, 1.4.

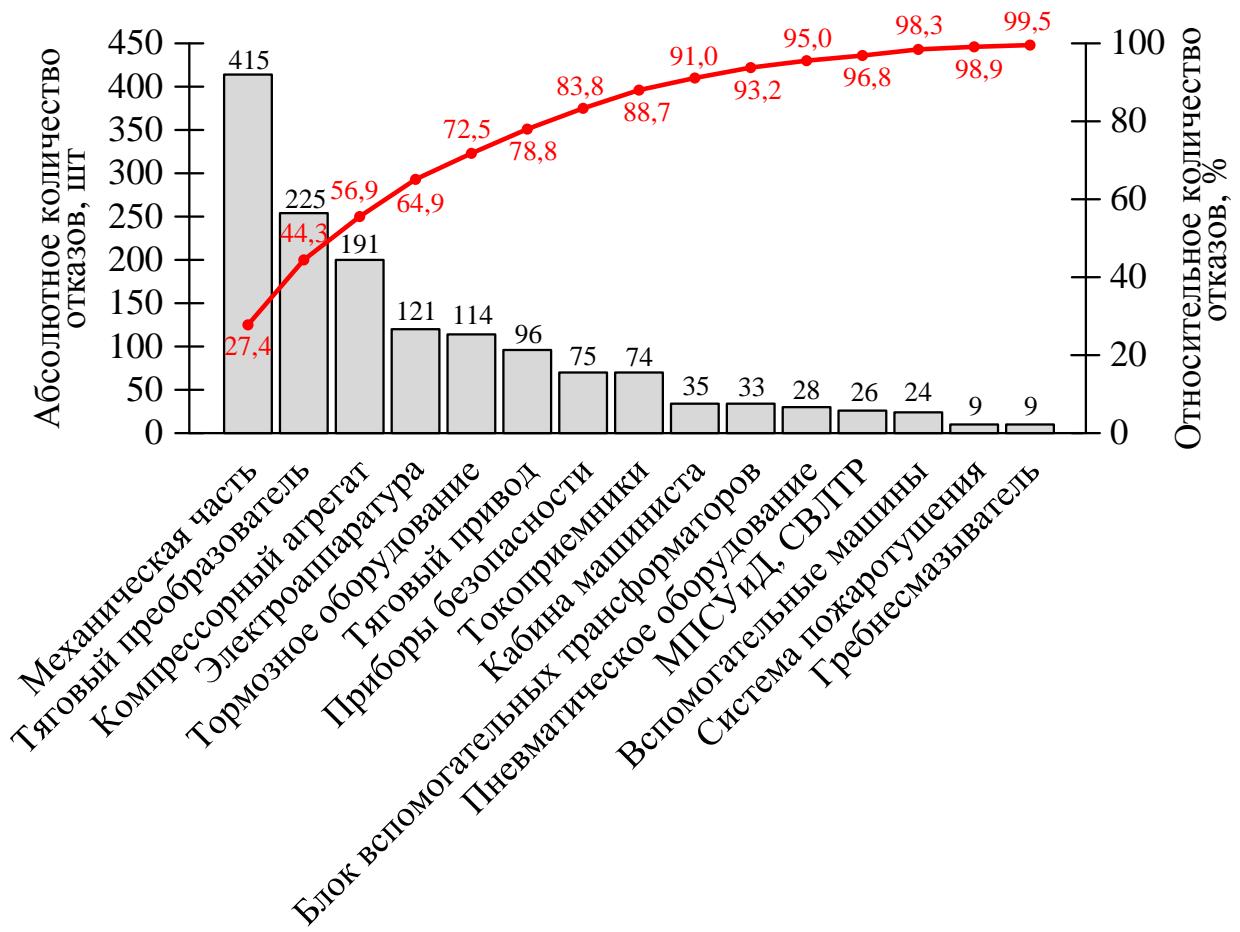


Рис. 1.3. Распределение отказов электрооборудования электровозов 2ЭС10 за 2017 г.

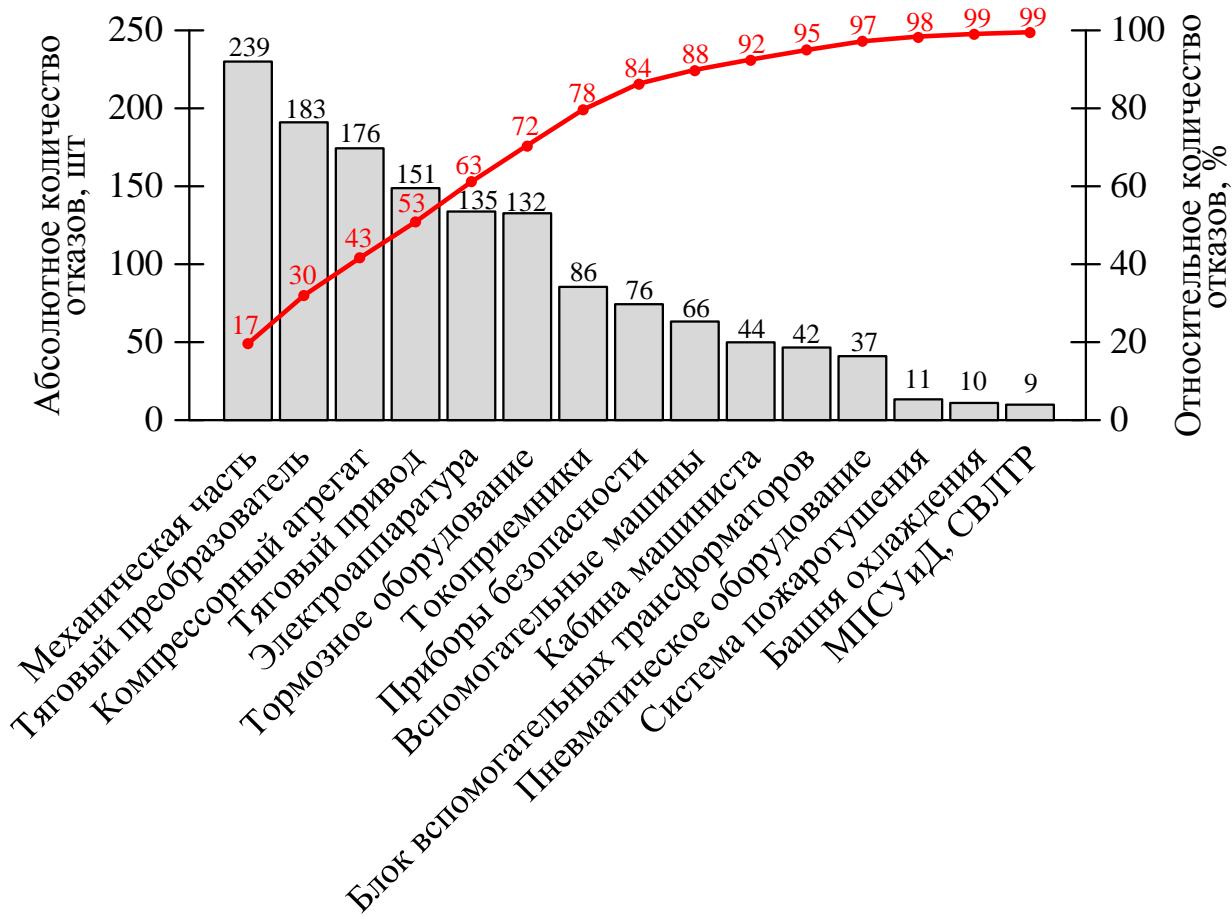


Рис. 1.4. Распределение отказов электрооборудования электровозов 2ЭС10 за 2018 г.

На приведенных рисунках использованы сокращения: микропроцессорная система управления и диагностирования (МПСУиД), система взаимодействия с локомотивом посредством технологической радиосвязи (СВЛТР).

Электровоз 2ЭС10 имеет асинхронный тяговый двигатель номинальной мощностью 1200 кВт, асинхронный двигатель компрессора рДМ180LB40M5 (30 кВт), а также асинхронные двигатели вентиляторов: рДМ180L4 (30 кВт), рДМ180M2У1 (22 кВт), рДМ112МВ2 (7,5 кВт).

Как показывает анализ отказов электровозов 2ЭС10 за 2017-2018 гг. тяговый привод попадает в разряд лимитирующих узлов.

За рассматриваемый период из зафиксированных отказов тягового электропривода 34 случая (3 случая в 2017 г., 31 – в 2018 г.) связаны с неисправностью изоляции и 8 (в 2018 г.) – с неисправностью подшипников. При этом в 2018 г. зафиксирован резкий прирост неисправностей электродвигателей. Остальные случаи отказов связаны с неисправностями тягового редуктора, заzemляющих шунтов, датчиков оборотов и температуры.

Проанализируем данные по отказам грузовых тепловозов 2ТЭ25А с асинхронными тяговыми двигателями. По состоянию на 01.01.2019 г. в приписном парке находилось 55 локомотивов данного типа.

Распределения отказов электрооборудования тепловозов 2ТЭ25А за 2017-2018 гг. приведены на рис. 1.5.

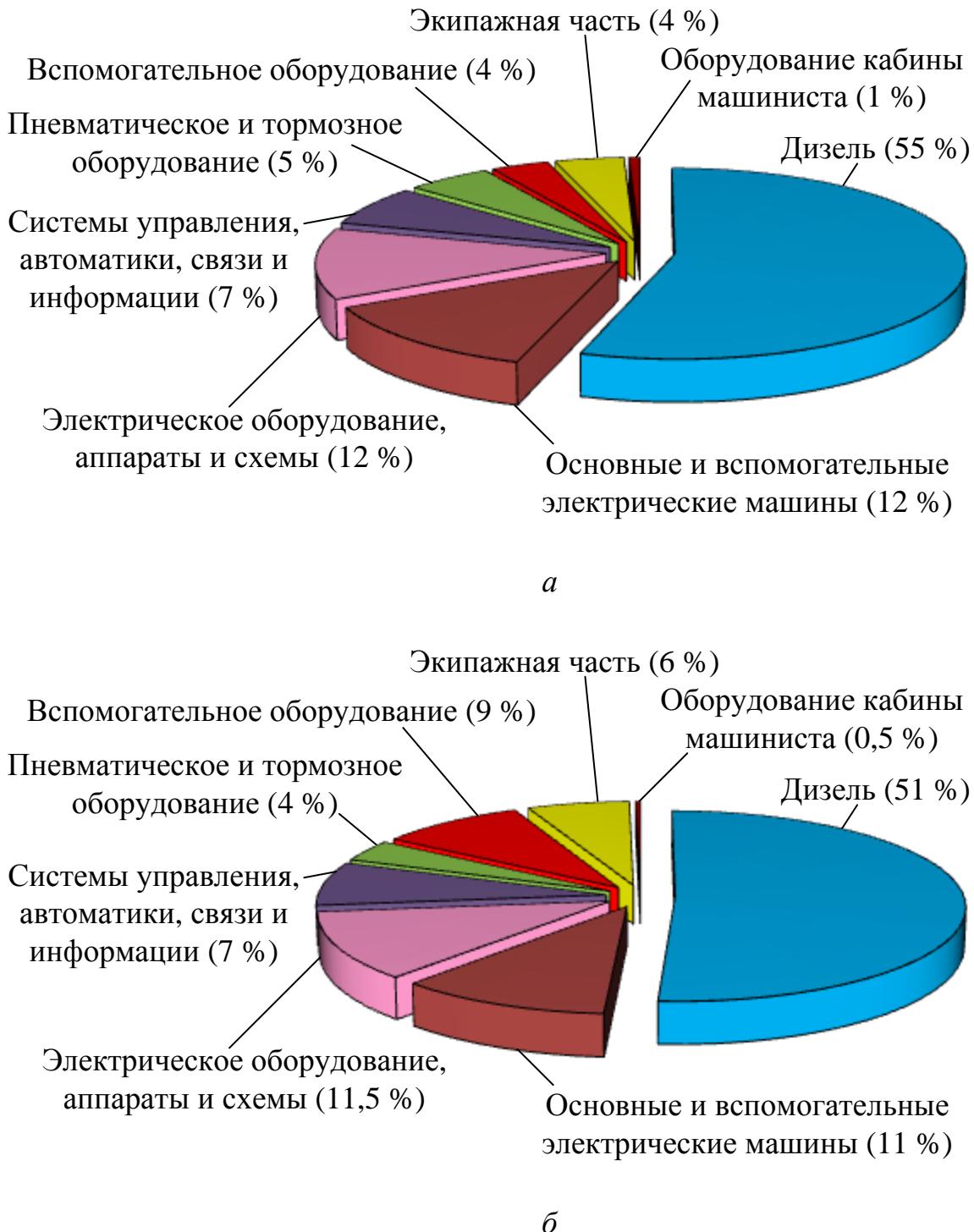


Рис. 1.5. Распределение отказов электрооборудования тепловозов 2ТЭ25А: а – за 2017 г., б – за 2018 г.

Тепловоз 2ТЭ25А имеет асинхронный тяговый двигатель ДАТ350-БУХЛ1, АД917УХЛ1 или ДТА350Т номинальной мощностью 350 кВт, асинхронные двигатели вентиляторов: АЖ280А10 (65 кВт), 4АЖ225М602 (2 шт. по 45 кВт), АТ160М602 (7,5 кВт). Кроме того электровоз снабжен двигателями постоянного тока компрессора ДПТ-37 или 2П2КМ (37 кВт) и вентиляторов П21М (1,4 кВт), П11 (0,66 кВт).

Как показывает анализ за 2017-2018 гг. отказы тепловозов типа 2ТЭ25А, связанные с тяговыми или вспомогательными электродвигателями, составляют 11 – 12 %. К наиболее частым отказам основных и вспомогательных машин относятся: обрыв фаз, неисправность подшипников, низкое сопротивление изоляции.

Таким образом, сравнительный анализ приведенных данных по отказам показал принципиально схожую картину по различным типам подвижного состава в плане доли отказов электрических машин в общем числе и конкретных причин отказов.

Проанализируем данные по отказам грузовых электровозов 2ЭС6 с коллекторными тяговыми двигателями. По состоянию на 01.01.2019 г. в приписном парке находилось 711 электровозов данного типа.

Распределения отказов электрооборудования электровозов 2ТЭ25А за 2017-2018 гг. приведены на рис. 1.6.

Тепловоз 2ТЭ25А имеет коллекторный тяговый двигатель ЭДП810 номинальной мощностью в часовом режиме 810 кВт, двигатель постоянного тока вентилятора обдува резисторов 4ПНЖ-200МА (60 кВт), асинхронные двигатели вентиляторов рДМ180М2 (22 кВт) и АИР71А2 (0,75 кВт).

Как показывает сравнительный анализ отказов за 2017-2018 гг., электровозы с коллекторным тяговым приводом имеют 22,3 – 28,3 % отказов связанных только с тяговыми двигателями. С учетом вспомогательных машин доля отказов составляет 25,9 – 31,8 %. Таким образом, несмотря на большой опыт эксплуатации коллекторных тяговых двигателей, они остаются основным лимитирующим элементом подвижного состава, требующим значительных капитальныхложений в его техническое обслуживание.

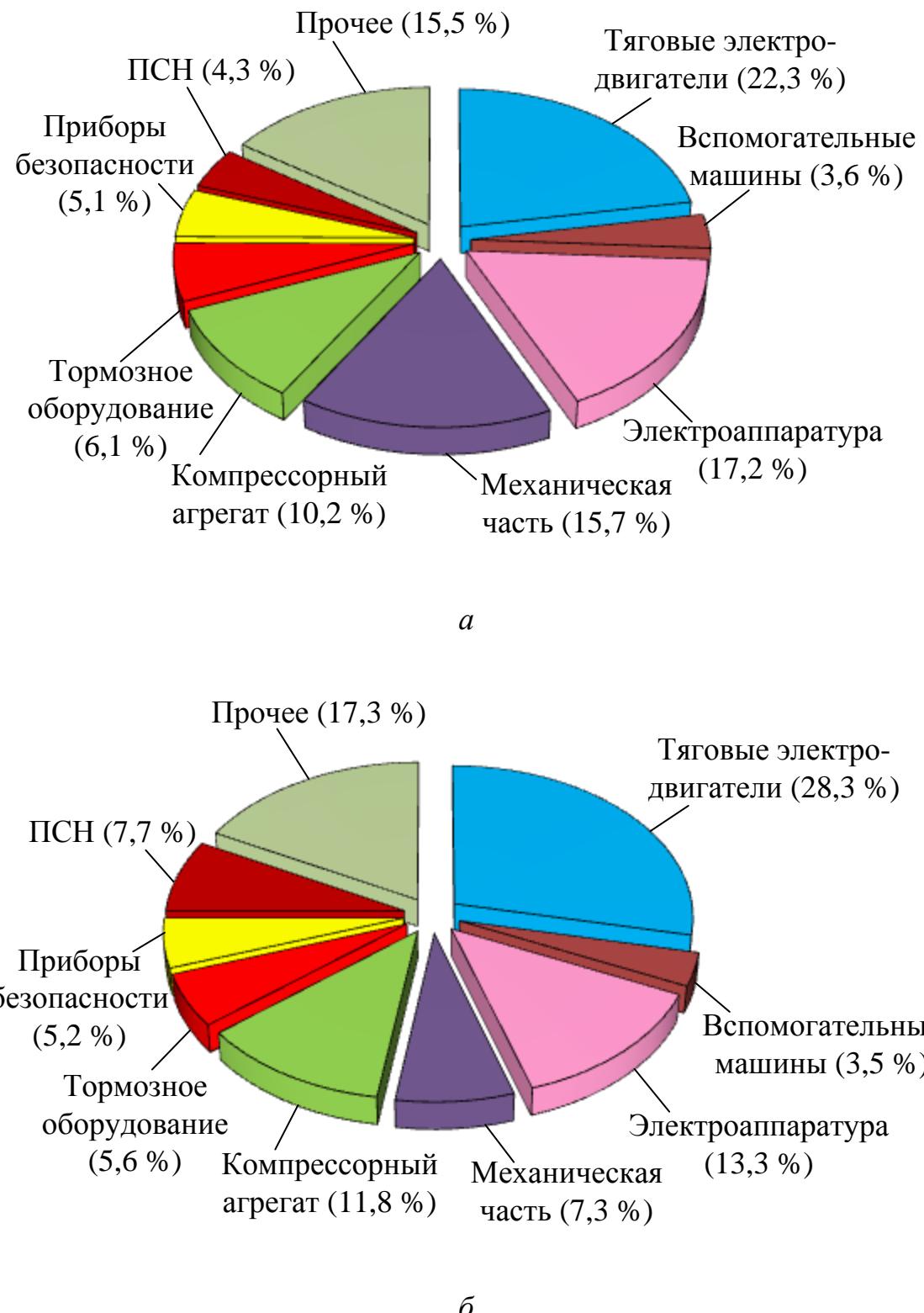


Рис. 1.6. Распределение отказов электрооборудования электровозов 2ЭС6: а – за 2017 г., б – за 2018 г.

### **1.3. Анализ системных свойств и параметров существующих электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин**

#### *1.3.1. Экспериментальная оценка эффективности электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин, применяющих возврат мощности, обусловленной нагрузкой*

Высокая энергетическая эффективность метода испытаний электрических машин путем их взаимной нагрузки при приемосдаточных испытаниях коллекторных тяговых электродвигателей хорошо известна. Данный метод широко применяется на сети железнодорожных локомотивных ремонтных депо.

Экспериментальная оценка энергетической эффективности данного метода при испытаниях АМ была осуществлена на научном лабораторном стенде, изготовленном на базе кафедры «Локомотивы» Омского государственного университета путей сообщения [60].

Стенд включает в себя установленную на общем фундаменте пару асинхронных машин с жестким соединением их валов посредством муфты.

Электрическая схема научного лабораторного стенда для исследования метода взаимной нагрузки для испытаний АМ приведена на рис. 1.7.

Данная пара асинхронных машин (рис. 1.8) подключена к коммутационно-измерительной части стенда, общий вид которой приведен на рис. 1.9.

Коммутационно-измерительная часть стенда включает два двухзвенных преобразователя частоты (ПЧ1 и ПЧ2). Первым звеном преобразователя является неуправляемый выпрямитель. Вторым звеном – управляемый выпрямитель-инвертор. Выход выпрямителя соединен со входом управляемого выпрямителя-инвертора посредством звена постоянного тока (ЗПТ).

ЗПТ обоих преобразователей соединены общей шиной постоянного тока (ШПТ), которая обеспечивает передачу электрической энергии от одного преобразователя к другому [213, 214, 244].

Для измерения напряжения и тока, передаваемого по ШПТ в схеме применены вольтметр и амперметр постоянного тока ( $PA$ ,  $PV$ ).

Обмотки статора асинхронных машин подключены к выходам ПЧ1 и ПЧ2. К валам машин присоединен тахометр, передающий показания на индикатор.

На всех участках электрической цепи (см. рис. 1.7) выведены клеммы для подключения осциллографа.

Для измерения мощности на стенде установлены приборы ЩМ 120, внесенные в гос. реестр средств измерения, которые позволяют измерить мощность, потребляемую всей схемой ( $PW1$ ), и мощности, потребляемые каждым преобразователем частоты ( $PW2$ ,  $PW3$ ).

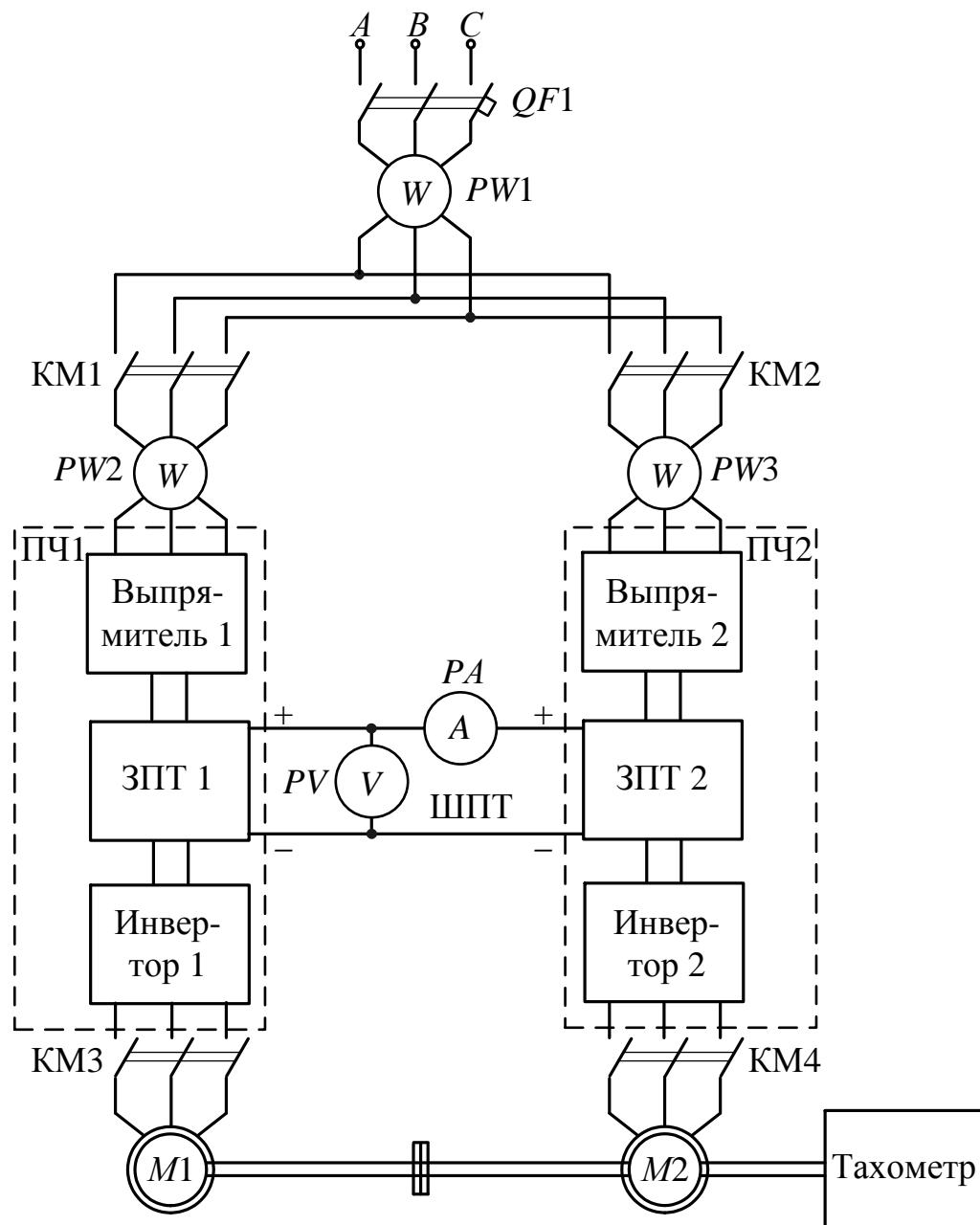


Рис. 1.7. Электрическая схема научного лабораторного стенда для исследования метода взаимной нагрузки асинхронных машин

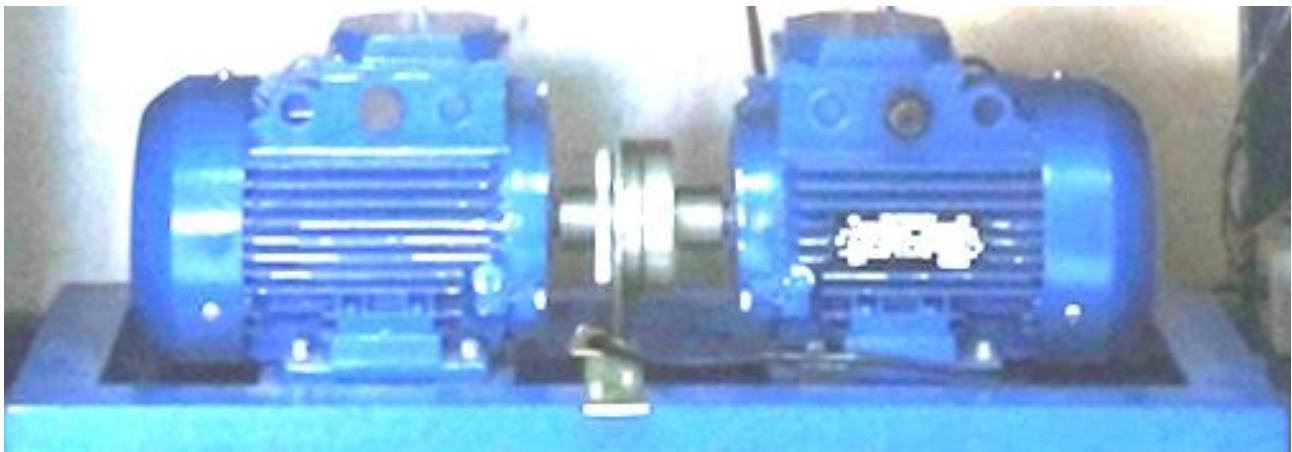


Рис. 1.8. Пара асинхронных машин с общим валом  
в составе исследовательского стенда



Рис. 1.9. Лицевая панель исследовательского стенда  
для изучения метода взаимной нагрузки

Мощность на входе асинхронной машины, работающей в двигательном режиме, и на выходе машины, работающей – в генераторном, измерялась посредством анализатора количества и показателей качества электроэнергии AR.5 (внесен в гос. реестр средств измерений).

В процессе эксперимента частота напряжения на выходе обоих ПЧ плавно увеличивалась до 50 Гц таким образом, чтобы в процессе разгона отсутствовал статический момент нагрузки на валу. Это обеспечивалось за счет равенства частот напряжений в каждый момент времени в процессе их увеличения [210]. Далее частота на выходе одного из ПЧ снижалась, вследствие чего АМ, подключенная к данному ПЧ переходила в режим рекуперативного торможения. Электрическая мощность, вырабатываемая данной машиной передавалась через ЗПТ другому ПЧ, пытающему испытуемый АД, работающий в этот момент двигательном режиме. При этом прибором AR.5 поочередно измерялась мощность в цепях обмоток статора обеих машин.

В результате проведенного эксперимента построены зависимости (рис. 1.10) потребляемой мощности  $P_d$  испытуемым двигателем и генерируемой мощности  $P_g$  нагрузочной АМ, а также суммарной мощности, потребляемой парой АМ  $P_{\text{потр}}$  (равна разности  $P_d$  и  $P_g$ ), от разности частот напряжений, на выходах ПЧ –  $\Delta f$ .

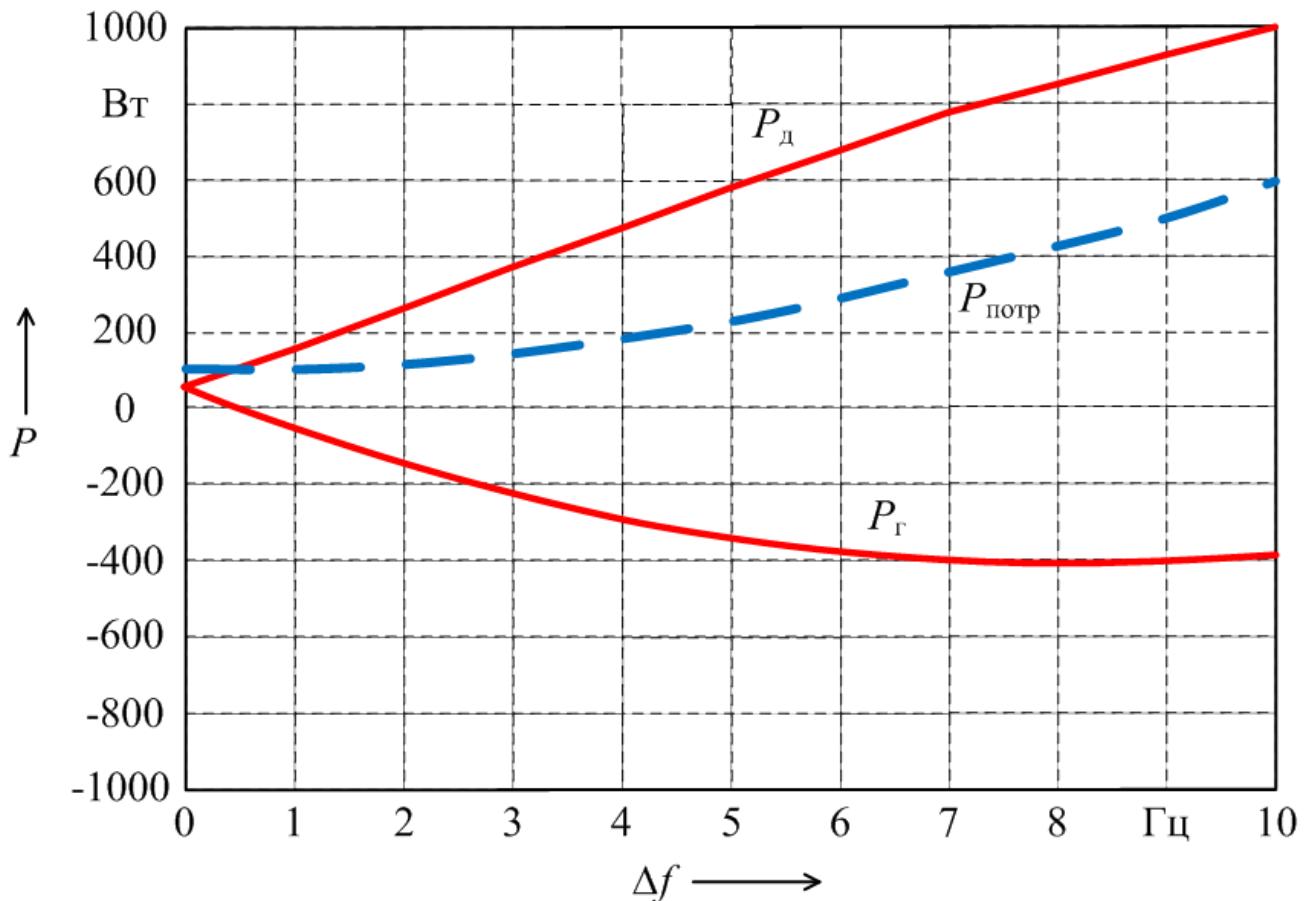


Рис. 1.10. Зависимость мощности потребляемой и вырабатываемой асинхронными машинами от разности частот питающих напряжений  $\Delta f$

Как показывает анализ результатов испытаний (см. рис. 1.10), возврат электрической энергии нагрузочной машиной на испытательном стенде в номинальном режиме может достигать 60 %.

Полученный результат подтверждает достаточно высокую энергетическую эффективность метода взаимной нагрузки для испытаний асинхронных машин.

Следует отметить, что количество электроэнергии, потребляемой испытательным комплексом из сети, зависит не только от параметров испытуемой и нагрузочной электрических машин, но и в значительной степени определяется параметрами преобразователей частоты.

Одним из таких параметров является частота широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения, формируемого управляемым инвертором, преобразователя частоты. Суммарные потери в схеме испытаний имеют сложную зависимость от частоты ШИМ. С одной стороны, увеличение данной частоты неизбежно должно приводить к увеличению потерь в транзисторах инверторов, с другой стороны, при большей частоте ШИМ будут обеспечиваться лучшее сглаживание тока статора АМ, что в результате приводит к повышению энергоэффективности установки в целом.

На исследовательском лабораторном стенде дополнительно выполнено исследование зависимости потерь в элементах схемы испытаний от частоты ШИМ [153].

Преобразователи частоты, используемые на данном стенде, позволяют вручную с панели оператора задавать одно из следующих трех значений частоты ШИМ: 4, 8 и 16 кГц.

При всех перечисленных значениях частот коммутаций были проведены измерения следующих мощностей:  $P_d$ , потребляемой асинхронным двигателем;  $P_c$ , потребляемой электротехническим комплексом из сети;  $P_{ш.п.т.}$ , передаваемой по шине постоянного тока.

Данные, полученные в результате экспериментальных исследований, приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Значения мощности, полученные экспериментально в силовой части схемы электротехнического комплекса при осуществлении взаимной нагрузки испытуемого двигателя с различной частотой коммутации транзисторов

$f_k$ , кГц	$f_1$ , Гц	$f_2$ , Гц	$P_c$ , Вт	$P_{ш.п.т.}$ , Вт	$P_d$ , Вт
4	50	50	400	197,69	136
	47	50	495	599,55	526
	44	50	730	986,58	915
	41	50	1080	1333,4	1266
8	50	50	407	199,75	168
	47	50	490	594,88	562
	44	50	715	1007,1	965
	41	50	1065	1406,2	1350
16	50	50	459	224,25	193
	47	50	530	562,52	524
	44	50	726	922,53	884
	41	50	1027	1282,5	1224

По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что частота коммутации транзисторов в значительной степени влияет на потери электроэнергии в схеме взаимной нагрузки АМ. Это следует учитывать как при разработке и проектировании схемы испытаний, так и при интерпретации результатов испытаний асинхронных двигателей. Следовательно, более адекватно оценить техническое состояние асинхронного двигателя возможно только при той же частоте коммутаций транзисторов, при которой он реально эксплуатируется.

### 1.3.2. Анализ известных схемных решений для испытания асинхронных машин с возвратом мощности в сеть

В связи с тем, что наиболее энергозатратным видом испытаний является испытание на нагрев, при котором двигателю задается номинальная нагрузка на продолжительный режим работы, важной научной проблемой является разработка и применение эффективных способов повышения энергоэффективности данного метода испытаний. Достижения данной цели возможно путем применения схем,

которые позволяют осуществить преобразование механической энергии, обусловленной нагрузкой на валу испытуемого двигателя, обратно в электрическую таким образом, чтобы имелась или возможность либо ее возврата в электрическую сеть, либо использования для питания испытуемого двигателя. Такие схемы позволяют значительно снизить энергозатраты на весь процесс испытаний, обеспечивая существенный экономический эффект от их внедрения.

В настоящее время известно множество схем нагружочных испытаний электрических машин, обеспечивающих такой реверс энергии в питающую сеть, однако многие из известных схем имеют ряд существенных недостатков, в том числе ограниченную область применения.

Одна из известных энергоэффективных схем, позволяющих осуществить возврат мощности, обусловленной нагрузкой АД, приведена на рис. 1.11 [48].

Схема асинхронно-вентильного каскада позволяет отобрать энергию скольжения асинхронного двигателя из цепи обмотки ротора и передать ее на вход выпрямителя. Выпрямитель полученную на входе энергию переменного тока преобразует в энергию постоянного тока на выходе. При помощи управляемого инвертора выпрямленное напряжение преобразуется в переменное с частотой сети  $f = 50$  Гц. Электроэнергия через согласующий трансформатор передается в сеть за счет того, что электродвижущая сила (ЭДС), наводимая основным магнитным потоком в обмотке, подключенной к сети, выше напряжения в ней.

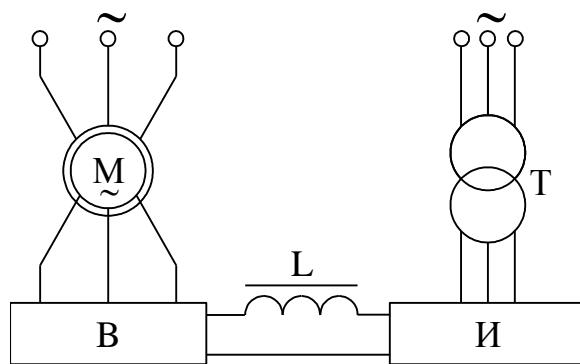


Рис. 1.11. Схема асинхронно-вентильного каскада

Главный недостаток асинхронно-вентильного каскада состоит в том, что он применим исключительно для асинхронных двигателей с фазным ротором.

Другая схема, позволяющая осуществить возврат электроэнергии от нагрузочной машины в питающую сеть при испытании асинхронных двигателей любого типа (как с короткозамкнутым, так и с фазным ротором) [53], приведена на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Схема испытания асинхронных двигателей с использованием промежуточных электромеханических преобразователей

Данная схема лишена недостатка асинхронно-вентильного каскада и позволяет плавно регулировать нагрузку испытуемого асинхронного двигателя в широком диапазоне. В данном случае энергоэффективность обусловлена тем, что затраты электроэнергии, потребляемой в приведенной схеме из сети, обусловлены только потерями в электрических машинах, участвующих в процессе электромеханического преобразования энергии. Однако главным недостатком представленной схемы является избыточное количество электромеханических преобразователей, равное в данном случае четырем. Энергия потребляемая из сети будет равна потерям сразу в четырех электромеханических преобразователях. Избыточность оборудования такой схемы снижает ее энергоэффективность и надежность, одновременно увеличивая ее стоимость.

Наиболее низкой себестоимости и высокой надежности комплекса для испытаний асинхронных машин можно добиться за счет применения метода самонагружения динамическим режимом работы. При этом схема испытаний, обеспечивающая данный метод имеет вид, представленный на рис. 1.13.



Рис. 1.13. Схема испытания асинхронных двигателей с использованием метода самонагружения динамическим режимом работы

Преобразователь в данной схеме должен иметь систему управления, обеспечивающую разгон двигателя с последующим его торможением в генераторном режиме с отдачей энергии в сеть [85-87]. При этом необходимо задать такой режим работы, при котором потери будут эквивалентны режиму номинальной нагрузки.

К недостаткам данного способа можно отнести то, что действительно можно подобрать такой режим работы, чтобы суммарные потери в двигателе равнялись его номинальным потерям, но при этом отдельные виды потерь (электрические, магнитные и механические) в этих режимах будут различаться.

Таким образом, невозможно подобрать такой режим динамической нагрузки, чтобы все виды потерь совпали с номинальными.

Наилучший технико-экономический эффект при нагрузочных испытаниях можно получить за счет уменьшения количества электромеханических преобразователей в схеме до минимально возможного количества, т. е. до двух.

Метод нагрузочных испытаний с двойным электромеханическим преобразованием получил название метода взаимной нагрузки.

Однако простое включение в сеть двух механически связанных асинхронных двигателей (рис. 1.14) само по себе не обеспечивает переход одного из них в генераторный режим. Для обеспечения взаимной нагрузки асинхронных машин необходимо обеспечить такой режим их работы, чтобы частота вращения механически связанных роторов, превышала значение частоты вращения магнитного потока одной машины, и при этом была ниже значения частоты вращения магнитного потока другой.

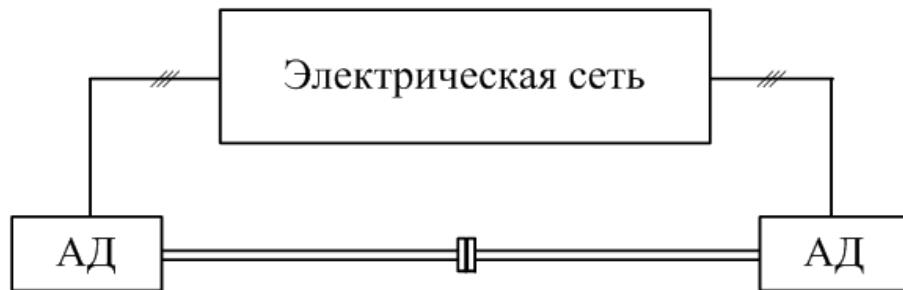


Рис. 1.14. Схема параллельного включения в сеть двух асинхронных двигателей

При данной схеме включения оба асинхронных двигателя будут работать в двигательном режиме, близком к идеальному холостому ходу.

Для обеспечения перехода одного из двигателей в генераторный режим необходимо запитать его от другого источника электроэнергии с частотой, меньшей, чем у источника, от которого питается другая машина, работающая в режиме двигателя (рис. 1.15).

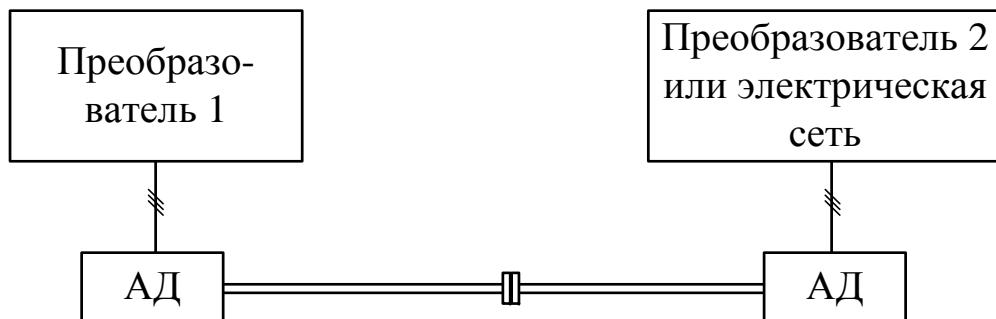


Рис. 1.15. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин

Обеспечение требуемой мощности нагрузки на валу испытуемого двигателя требует наличия возможности изменения частоты напряжения на выходе хотя бы одного из источников. С этой целью в первом случае требуется еще один электрический генератор, позволяющий регулировать напряжение и требующий в свою очередь какого-то источника механической энергии, что вновь увеличивает количество электромеханических преобразователей до четырех. либо, во втором случае, в качестве хотя бы одного из двух источников питания необходим статический преобразователь частоты.

Исторически схемы, обеспечивающие метод взаимной нагрузки, изначально нашли применение при испытаниях машин постоянного тока.

Схема испытания машин постоянного тока с последовательным возбуждением методом взаимной нагрузки, широко применяемая в ремонтных депо на сети железных дорог [5, 9, 53, 58], приведена на рис. 1.16.

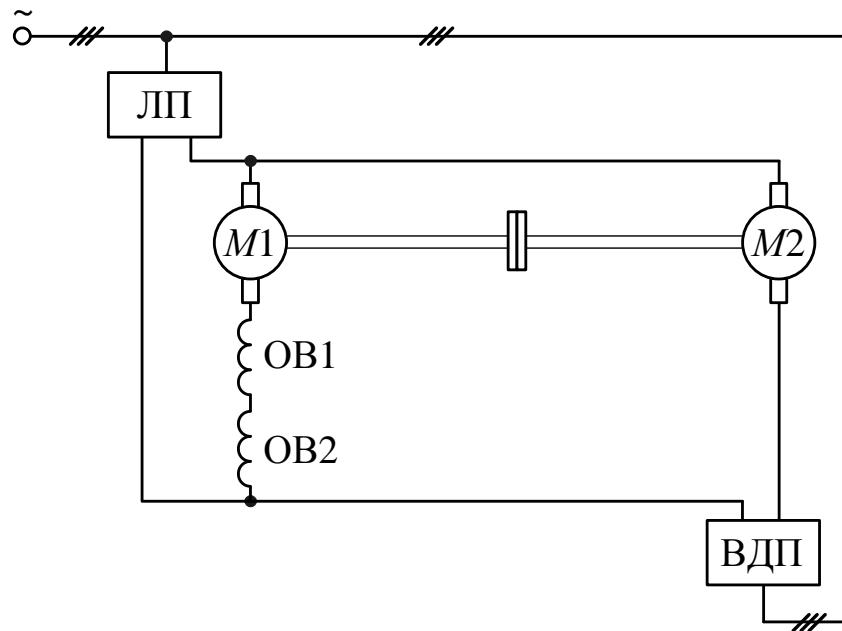


Рис. 1.16. Структурная схема для испытания машин постоянного тока с последовательным возбуждением методом взаимной нагрузки

Преимуществом данной схемы испытаний является то, что она имеет в своем составе только два электромеханических преобразователя.

Линейный преобразователь (ЛП) представляет собой, как правило, неуправляемый выпрямитель, питающий цепи якоря как испытуемой, так и нагружочной машины. Испытуемая машина ( $M_1$ ) работает в режиме двигателя.

Вольтодобавочный преобразователь (ВДП), представляющий собой управляемый выпрямитель, позволяет ввести добавочное ЭДС в цепь якоря нагружочной машины ( $M_2$ ). За счет этого ЭДС якоря нагружочной машины ( $M_2$ ) оказывается выше приложенного к ее зажимам напряжения, и данная машина переходит в генераторный режим, механически нагружая испытуемую машину ( $M_1$ ).

Регулируя величину ЭДС у вольтодобавочного преобразователя, можно получить необходимое значение тока якоря испытуемой машины.

Затраты электроэнергии в данной схеме обусловлены только потерями в испытуемой и нагрузочной машинах, а также в линейном и вольтодобавочном преобразователях.

Простота и высокая энергоэффективность схемы взаимной нагрузки обусловили ее широкое применение на многих предприятиях как железнодорожной, так и других отраслей, связанных с производством, ремонтом и эксплуатацией коллекторных электрических машин.

Использование метода взаимной нагрузки для испытания асинхронных двигателей с использованием нагрузочной асинхронной машиной стало возможным благодаря значительному развитию силовой полупроводниковой техники, благодаря которому появились достаточно мощные ПЧ [26, 166-167, 232, 233, 250].

Электротехнические комплексы, предназначенные для испытаний асинхронных машин, должны иметь в своем составе преобразователи частоты в качестве устройств управления процессом испытаний.

Основной причиной применения преобразователей частоты в составе схем испытаний является требование ГОСТ 2582-2013, в п.8.1.3 которого указано: «Испытания следует проводить при питании тем родом тока, для которого предназначена электрическая машина [35]. Схемы, применяемые для испытаний, должны иметь характеристики, соответствующие характеристикам подвижного состава, для которого предназначен данный тип электрической машины».

В ГОСТ 25941-83 указано: «При испытаниях машин переменного тока, питаемых от полупроводниковых преобразователей (далее – преобразователей), должны применяться типы преобразователей, с которыми они будут эксплуатироваться» [36].

Приведенные требования продиктованы необходимостью проведения испытаний в условиях, наиболее близких к условиям эксплуатации, и тем, что при питании асинхронных двигателей от преобразователей частоты появляются дополнительные потери, связанные с высшими гармоническими составляющими токов фаз обмотки статора.

В результате анализа известных схем взаимной нагрузки асинхронных машин, можно выделить из них четыре типа.

**К первому** типу можно отнести схемы испытаний асинхронных машин с применением одного ПЧ.

Такой тип схемы реализован в виде технического решения учеными из Томского политехнического университета (ТПУ) [13, 137, 255]. Принципиальный вид схемы приведен на рис. 1.17. В данной схеме использованы контакторы 3 – 6 для переключения машин между источниками питания – сетью 1 и преобразователем частоты (ПЧ). Соединительная муфта 2 осуществляет механическую связь между валами асинхронных машин  $M_1$  и  $M_2$ .

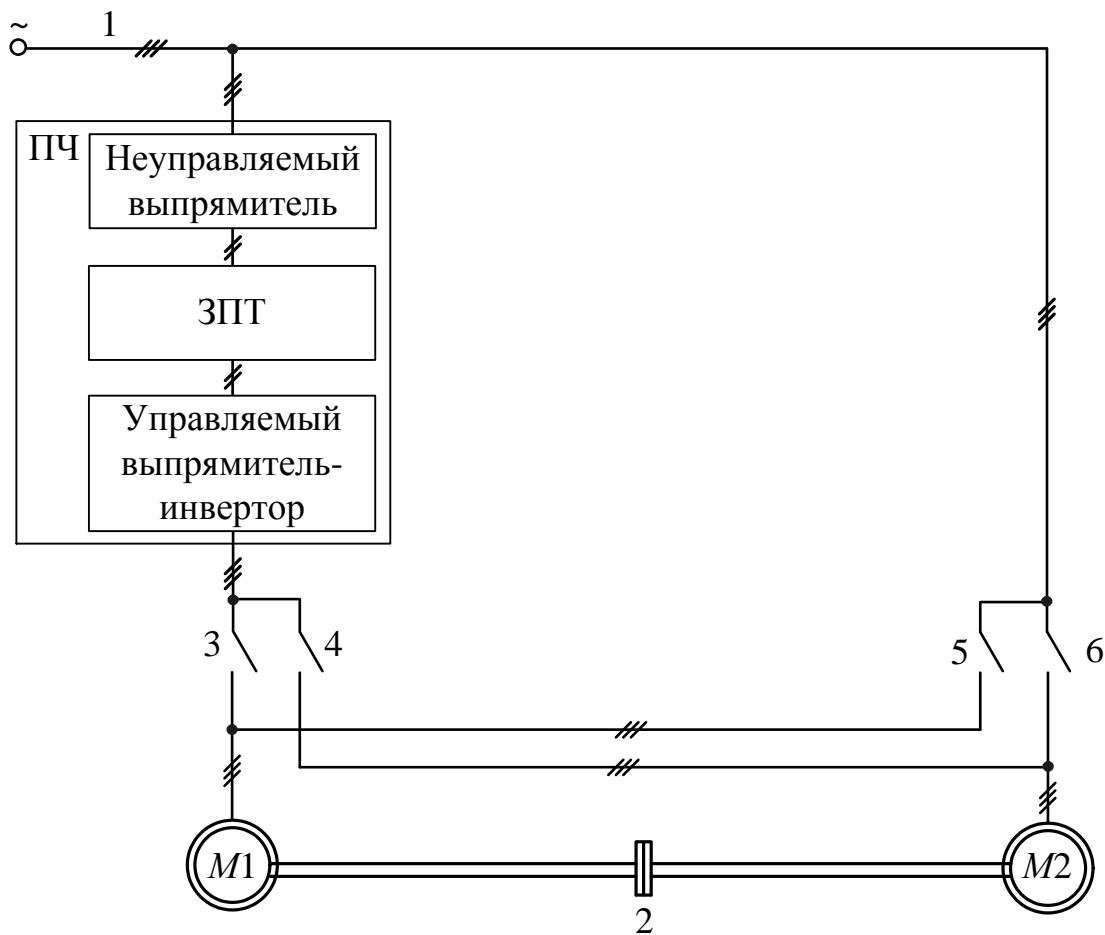


Рис.1.17. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин  
с одним преобразователем частоты,  
оснащенным на входе неуправляемым выпрямителем

Примененный в схеме преобразователь частоты имеет на входе неуправляемый выпрямитель. Преобразователи частоты такого типа применяются более широко, чем преобразователи с управляемым выпрямителем-инвертором на входе, т.к. имеют меньшую стоимость.

При замкнутых контакторах 3 и 6 и разомкнутых контакторах 4 и 5 машина  $M_1$  является испытуемой, а  $M_2$  – нагрузочной. При замкнутых контакторах 4 и 5 и разомкнутых контакторах 3 и 6 машина  $M_2$  является испытуемой, а  $M_1$  – нагрузочной.

Рассмотрим работу приведенной схемы (см. рис. 1.17) при замкнутых контакторах 3 и 6 и разомкнутых контакторах 4 и 5. Данная схема позволяет создать нагрузку асинхронному двигателю  $M_1$  машиной  $M_2$  путем повышения частоты модуляции напряжения на выходе ПЧ. При этом возрастает скорость вращения магнитного поля асинхронной машины  $M_1$ , что приводит к увеличению ее нагрузки в двигательном режиме, асинхронная машина  $M_2$  переходит в генераторный режим.

Такой принцип работы схемы взаимной нагрузки приведен в описании патента, предложенного коллективом авторов из Томского политехнического университета (ТПУ) [137].

Если снизить частоту питающего напряжения машине  $M_1$ , то она сможет перейти в генераторный режим и отдавать вырабатываемую электроэнергию в сеть, т.к. на входе ПЧ установлен неуправляемый выпрямитель, который способен пропускать электроэнергию только в одном направлении – из сети в ЗПТ.

Таким образом, асинхронный двигатель при испытаниях по представленной схеме (см. рис. 1.17) при номинальной нагрузке будет получать напряжение со строго определенной частотой, которая выше 50 Гц и не совпадет с ее номинальным значением, что входит в противоречие с требованием ГОСТ 25941-83.

Для получения возможности испытания асинхронного двигателя при постоянной частоте напряжения, подаваемого на обмотку статора, равной 50 Гц, коллективом авторов из ОмГУПСа, предложена схема, принципиальный вид которой близок к предыдущему варианту (рис. 1.18) [115].

На данной схеме обозначены трехфазная сеть 1, два асинхронных двигателя  $M_1$  и  $M_2$ , муфта 2, контакторы 3 – 6. Двухзвенный преобразователь частоты в данной схеме (см. рис. 1.18) отличается тем, что на его входе в отличие от схемы, приведенной на рис. 1.17, вместо неуправляемого выпрямителя

применен управляемый выпрямитель-инвертор, позволяющий передавать электроэнергию из ЗПТ в сеть.

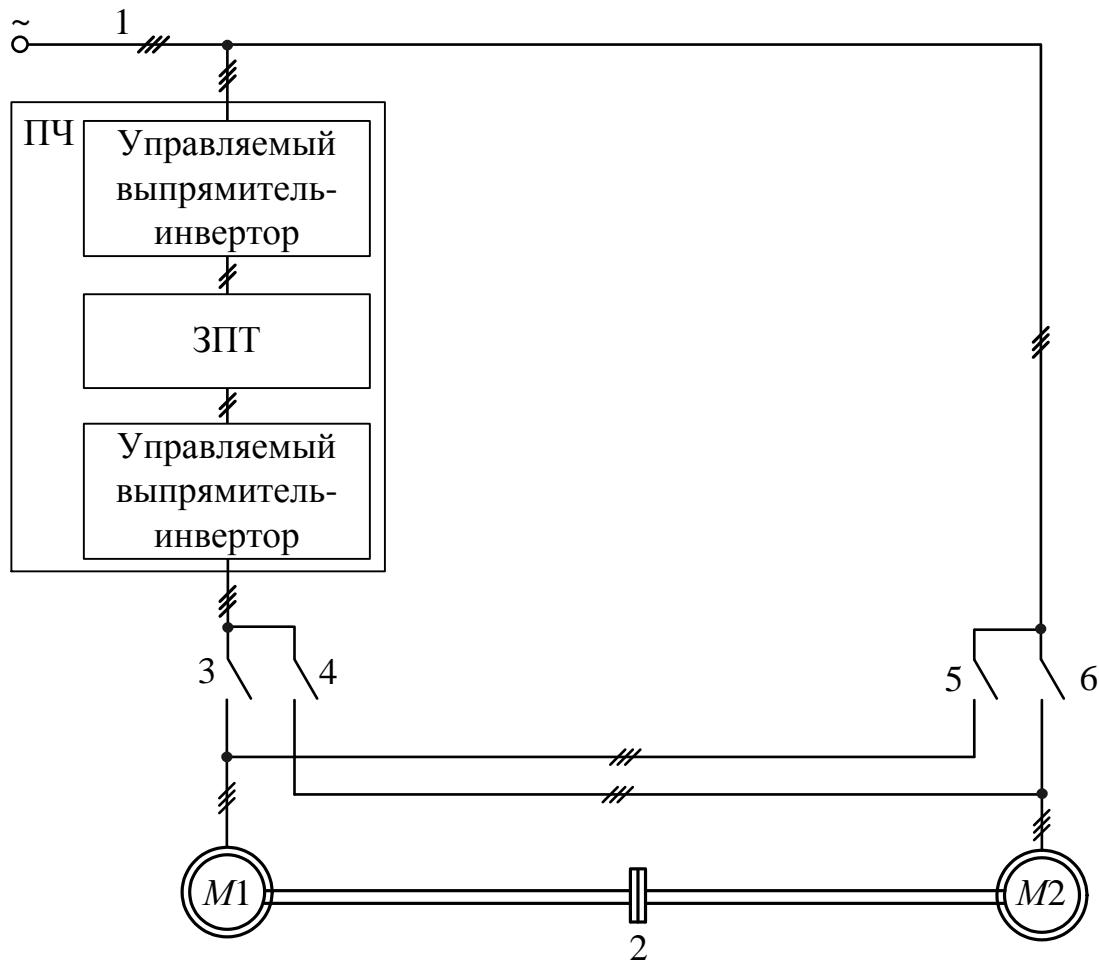


Рис. 1.18. Схема взаимной нагрузки асинхронных двигателей с одним ПЧ, оснащенным двумя управляемыми выпрямителями-инверторами

Данная схема (см. рис. 1.18) в отличие от предыдущей (см. рис. 1.17) позволяет создать нагрузку асинхронному двигателю  $M_2$  машиной  $M_1$  путем снижения частоты первой гармоники напряжения на выходе ПЧ, в следствие чего машина  $M_1$  переходит в режим рекуперации и увеличивается ее нагрузка в данном режиме, а машина  $M_2$  нагружается в режиме двигателя. Таким образом, испытуемый асинхронный двигатель  $M_2$ , работая под нагрузкой питается от стандартной трехфазной сети (с частотой напряжения 50 Гц).

Преимуществом данной схемы является возможность проводить испытания асинхронных машин, которые в эксплуатации питаются от стандартной трехфаз-

ной сети (с частотой напряжения 50 Гц), без противоречий требованиям ГОСТ 25941-83.

Ко второму типу схем можно отнести схемы взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя ПЧ.

В отличие от предыдущих схем, данный тип, в состав которого входит один ПЧ, обеспечивает номинальную нагрузку испытуемого асинхронного двигателя за счет его питания напряжением, сформированным широтно-импульсной модуляцией заданной частоты. Данный тип схем позволяет осуществить пуск асинхронных машин на холостом ходу до достижения ими номинальной частоты вращения и с дальнейшим снижением частоты питающего напряжения той машине, которая будет выполнять роль нагрузочного генератора. Это позволяет нагрузить другую машину в двигательном режиме.

Схему данного типа можно реализовать, например, с применением двух ПЧ, каждый из которых имеет как на входе, так и на выходе выпрямитель-инвертор (рис. 1.19).

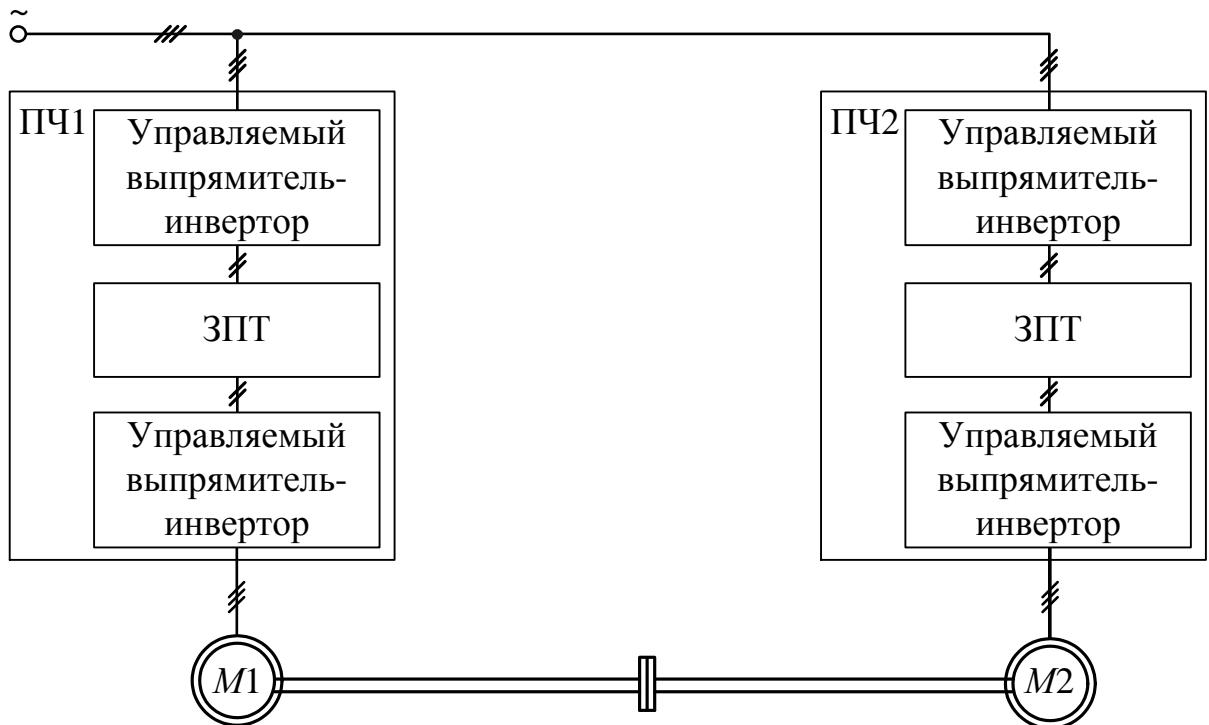


Рис. 1.19. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя преобразователями частоты с обменом энергией через сеть

Недостатком данной схемы является то, что электроэнергия, выработанная нагрузочной машиной, будет проходить к испытуемому двигателю через четыре управляемых выпрямителя-инвертора: по два в каждом преобразователе частоты. Такой путь обмена электроэнергией между нагрузочной и испытуемой машинами приводит к наличию дополнительных потерь в элементах ПЧ. Другим недостатком данной схемы является высокая стоимость. Ввиду названных недостатков данная схема не рекомендуется к применению.

Все схемы, относящиеся ко второму типу, представленные далее, лишены недостатков, отмеченных у предыдущей схемы (см. рис. 1.19) за счет передачи электроэнергии от нагрузочного генератора к испытуемому двигателю через шину постоянного тока (ШПТ), соединяющую ЗПТ обоих ПЧ.

Передача мощности по ШПТ позволяет использовать преобразователи частоты с неуправляемыми выпрямителями на их входах вместо управляемых выпрямителей-инверторов, что в значительной степени упрощает систему управления и, следовательно, снижает стоимость ЭТК.

Одна из схем второго типа, разработанная сотрудниками ОмГУПСа, приведена на рис. 1.20 [129].

Данная схема включает в свой состав управляемый тормозной модуль, который подключен к блоку сопротивлений  $R$ . Исходя из описания авторов патента, после запуска машин  $M1$  и  $M2$  до режима холостого хода следует на несколько герц понизить частоту напряжения, питающего нагрузочную машину и ее успешного для перехода в режим генератора необходимо на полторы – две секунды подключить в преобразователе частоты блок сопротивлений.

Изначальное предназначение данного блока сопротивлений и тормозного модуля заключается в потреблении избыточной энергии в звене постоянного тока в режиме рекуперации асинхронной машины, подключенной к ПЧ [178]. Кроме того идея соединения выводов ЗПТ преобразователей частоты не является новой, а наоборот – заявляется изготовителями ПЧ в качестве одной из полезных характеристик при их параллельной работе.

В данном случае указанная идея применяется для передачи избытка электрической энергии, поступающей от машины, перешедшей в рекуперативный режим, через ЗПТ другим машинам, работающим в двигательном режиме.

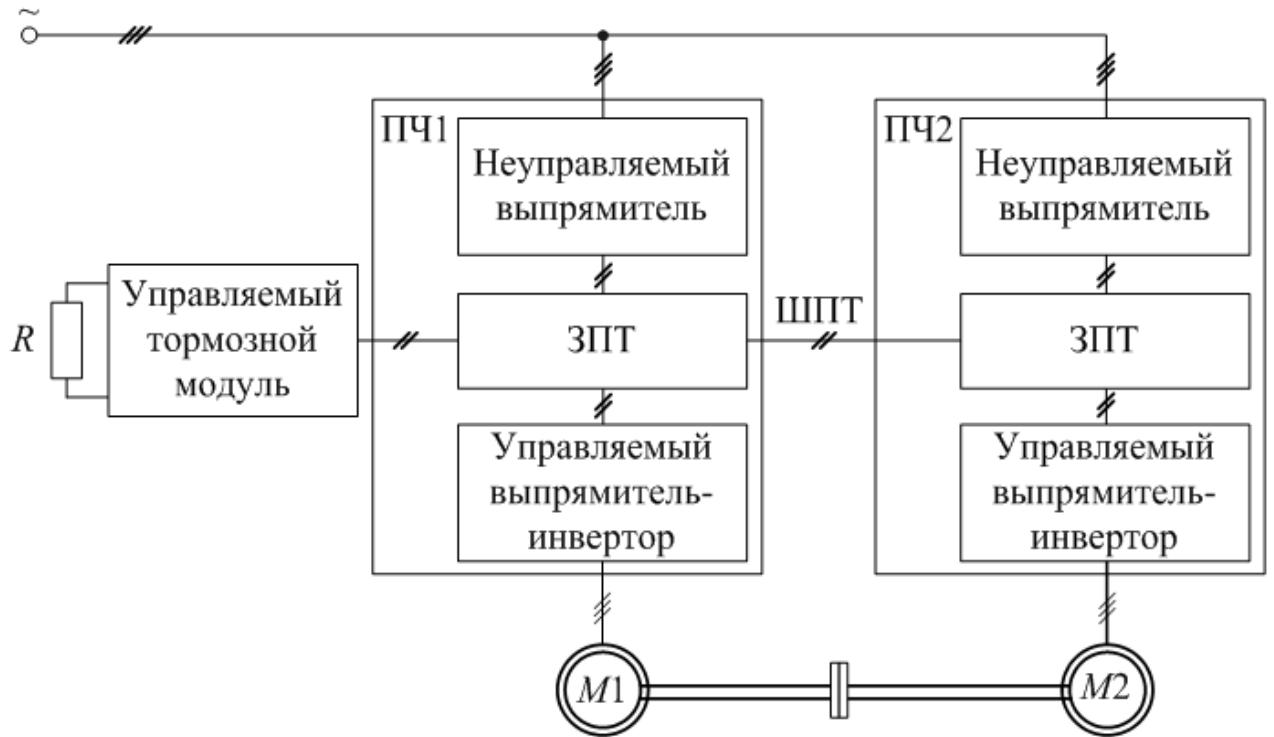


Рис. 1.20. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя преобразователями частоты с обменом мощности по звену постоянного тока и наличием тормозного модуля с блоком сопротивлений

Известны технические решения, в которых при питании нескольких асинхронных двигателей от преобразователей частоты, электрическая мощность передается по общей ШПТ от одной машины, перешедшей в генераторный режим, к другой, работающей в двигательном режиме. Однако идея применения звена постоянного тока для обмена энергией между двумя машинами в процессе нагрузочных испытаний в рассмотренной схеме является относительно новой.

Как показали испытания, проведенные на научном лабораторном стенде в ОмГУПСе, схема взаимной нагрузки асинхронных машин, приведенная на рис. 1.20, не требует наличия управляемого тормозного модуля с блоком сопротивлений [82].

Недостаток приведенной схемы – наличие в ней избыточных элементов, приводящих к излишним потерям мощности, снижению надежности и усложнению принципа управления.

Избавиться от недостатков предыдущей схемы (см. рис. 1.20) удалось в техническом решении, также предложенном авторами Омского государственного

университета путей сообщения [113]. Предложенная авторами схема испытаний, лишенная избыточных элементов, приведена на рис. 1.21.

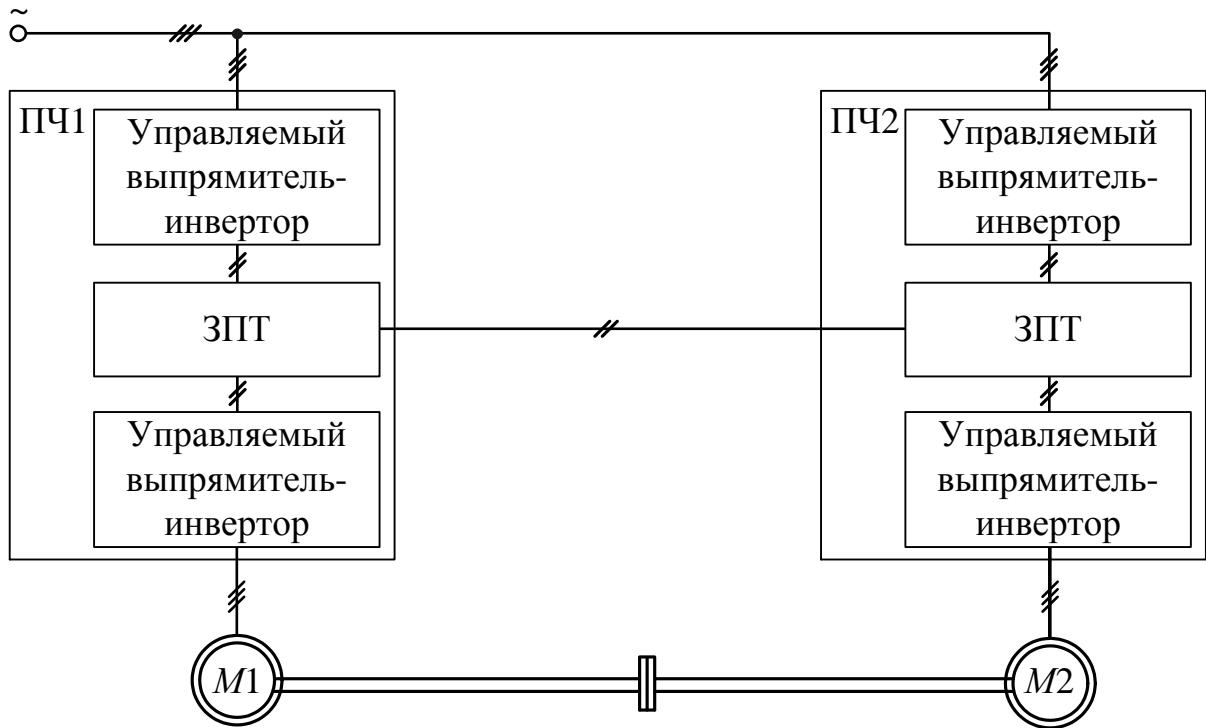


Рис. 1.21. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя преобразователями частоты с обменом энергией по ЗПТ

Схема, приведенная на рис. 1.21 является наилучшей из схем второго типа (с двумя преобразователями частоты), т.к. имеет их полный функционал и лишена недостатков присущих двум предыдущим схемам (см. рис. 1.19, 1.20).

К третьему типу схем можно отнести схему для испытания АМ методом взаимной нагрузки без ПЧ, в которой применяется общий выпрямитель и ЗПТ, а также два управляемых выпрямителя-инвертора, питающих асинхронные машины.

Вариант схемы данного типа представлен на рис. 1.22 [116]. Принцип осуществления взаимной нагрузки в данной схеме аналогичен принципу работы схем второго типа (с двумя преобразователями частоты).

Однако по сравнению с ними данная схема является более простой и надежной. Вместо двух неуправляемых выпрямителей в данной схеме имеется только один, и вместо двух звеньев постоянного тока также – только одно.

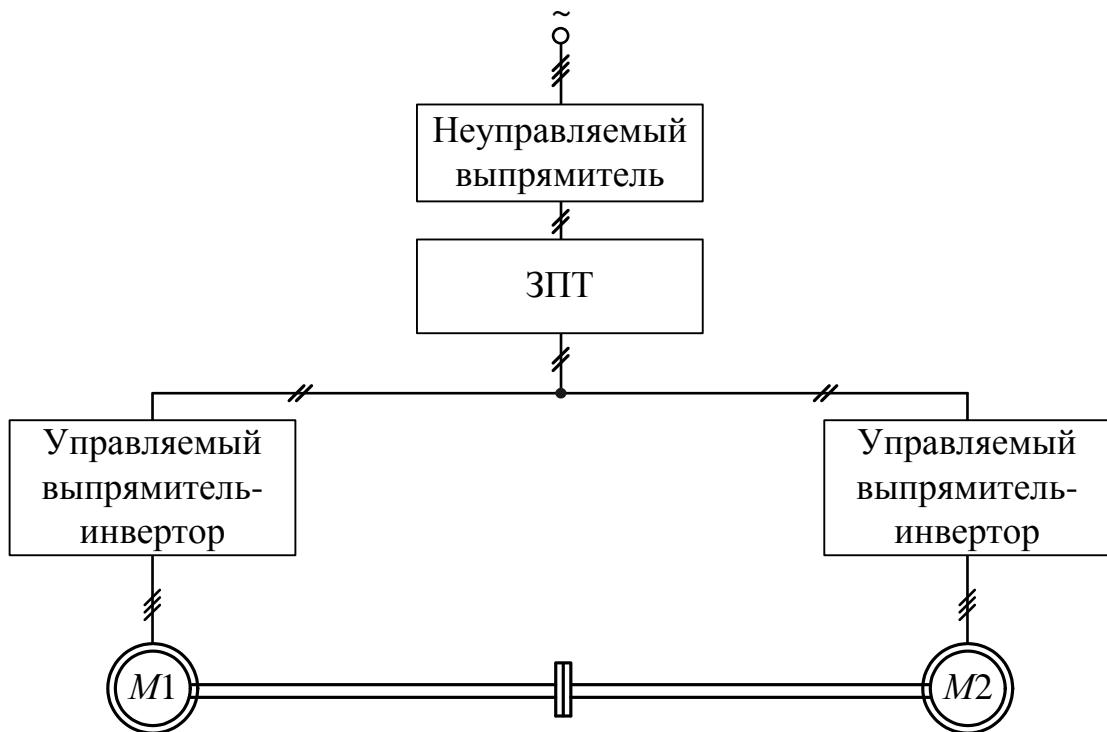


Рис.1.22. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин с общим выпрямителем, питающим два выпрямителя-инвертора

Данная схема также позволяет задать испытуемому двигателю номинальную нагрузку при питании его от преобразователя частоты напряжением, сформированным путем ШИМ, с произвольной частотой.

К **четвертому** типу схем можно отнести схемы взаимной нагрузки асинхронных машин с одним или несколькими нагрузочными генераторами постоянного тока.

Одна из таких схем, патент на которую получен группой авторов из МИИТа, приведена на рис. 1.23 [139].

Наличие в схеме двух нагрузочных машин постоянного тока 4 и 5 объясняется тем, что номинальная мощность испытуемого тягового двигателя 1 может составлять 1200-1500 кВт, при том, что в качестве нагрузочных генераторов предлагается применять коллекторные тяговые двигатели мощностью порядка 800 кВт.

В описании патента авторы отмечают, что данная схема предназначена для испытания тяговых электродвигателей большой мощности (до 2000 кВт) на электровозостроительных и электровозоремонтных заводах.

На представленной схеме испытуемый асинхронный двигатель 9 имеет выходы вала с двух сторон, с которых посредством муфт он соединен с валами нагрузочных генераторов 10 и 11. Нагрузочные генераторы имеют якорные обмотки 10.1 и 11.1, подключенные к выходу управляемого выпрямителя-инвертора 9, и обмотки возбуждения 10.2 и 11.2, подключенные к выходам управляемых выпрямителей 3 и 5, питающихся от понизительных трансформаторов 1 и 2.

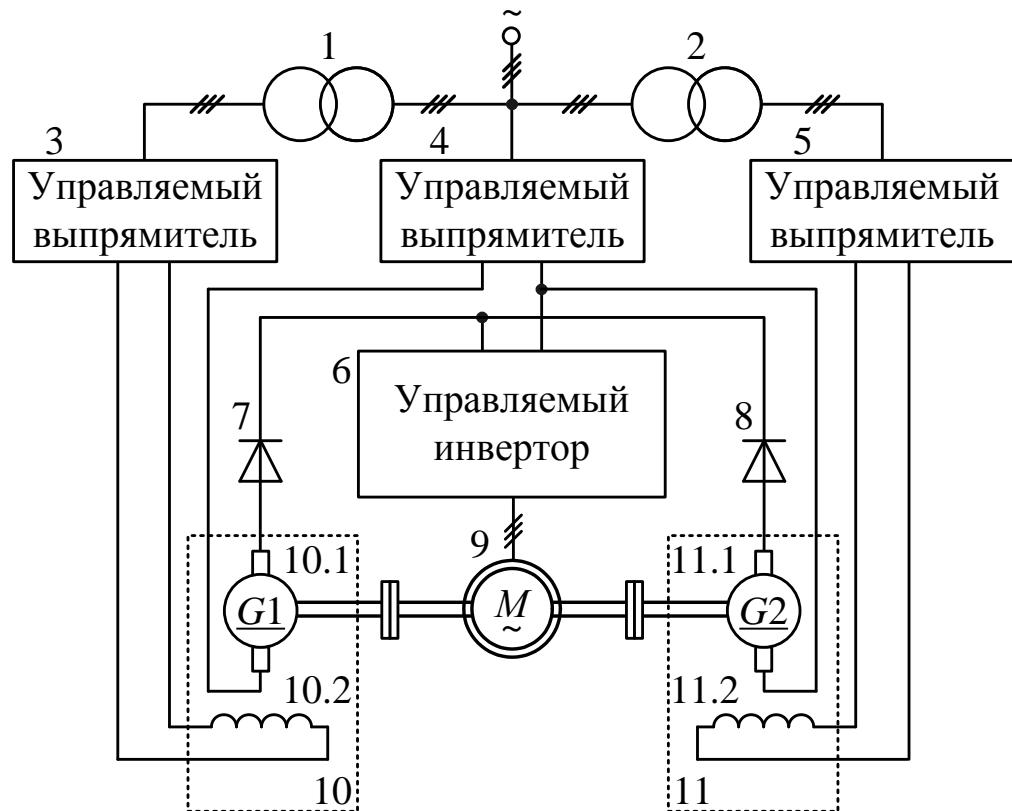


Рис.1.23. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя нагрузочными генераторами постоянного тока

Обмотка статора асинхронного двигателя 9 подключена к выходу управляемого инвертора 6, получающего питание от управляемого выпрямителя 4 и нагрузочных генераторов 10 и 11. Для предотвращения возможности короткого замыкания по цепям обмоток якоря генераторов 10.1 и 11.1 к ним подключены диоды 7 и 8 соответственно.

Схема, представленная на рис. 1.23, осуществляет режим взаимной нагрузки следующим образом. Запускают асинхронный двигатель 9 без нагрузки на валу до

необходимой скорости вращения путем подачи ему питания от управляемого инвертора 6.

Одновременно с валом асинхронного двигателя 9 разгоняются якоря нагрузочных генераторов 10.1 и 11.1. Далее для увеличения якорных ЭДС подается питание на обмотки возбуждения 10.2 и 11.2 от управляемых инверторов 3 и 5. Обмотка якоря нагрузочного генератора 10.1 включена последовательно в звене постоянного тока, соединяющего выход управляемого выпрямителя 4 и вход управляемого инвертора 6, позволяя повысить напряжение в данной цепи. Параллельно с выходом управляемого выпрямителя 4 подключена обмотка якоря 11.1. Управляемый выпрямитель 4 получает питание от сети.

Недостатком данной схемы (см. рис. 1.23) является ее специфичность и, как следствие, избыточность ее составных элементов: при равенстве мощностей испытуемого асинхронного двигателя 9 и нагрузочной машины 11 отсутствует необходимость во второй нагрузочной машине 10.

Однако для работы подобной схемы с одним нагрузочным генератором необходимо, чтобы его номинальное напряжение якоря было выше напряжения на выходе выпрямителя 4, определяемого напряжением сети и конкретным типом схемы выпрямления.

Схема взаимной нагрузки АМ с одним нагрузочным генератором постоянного тока, у которой отсутствует недостаток, отмеченный у предыдущей схемы, представлена на рис. 1.24 [128]. Такая схема может быть применена для испытаний как асинхронных, так и синхронных двигателей. На данной схеме изображены только элементы ее силовой части (электрические машины, статические преобразователи, контактор и электрические соединения) и датчики напряжения. Остальные элементы схемы, разработанной авторами данного патента, являющиеся элементами управления, опущены.

Работа устройств в данной схеме при испытании асинхронного двигателя осуществляется в следующем порядке. Исходное положение контактора 2 – разомкнутое. От источника постоянного тока подается питание на управляемый инвертор 4, который формирует переменное напряжение необходимой амплитуды и частоты. Данное напряжение подается на обмотку статора машины переменного тока, которая запускается на холостом ходу до необходимой частоты вращения, раскручивая также и якорь нагрузочного генератора 7.1.

Питание обмотки возбуждения 7.2 НГПТ 7 осуществляется от управляемого выпрямителя.

Напряжения источника постоянного тока и обмотки якоря, фиксируются с помощью датчиков 1 и 3 соответственно. При равенстве данных напряжений включается контактор 2. Далее за счет увеличения напряжения на выходе управляемого выпрямителя 5, подаваемого на обмотку возбуждения 7.2, увеличивается ЭДС обмотки якоря 7.1, что приводит к переходу нагрузочной машины постоянного тока в генераторный режим и увеличению нагрузки асинхронного двигателя 6.

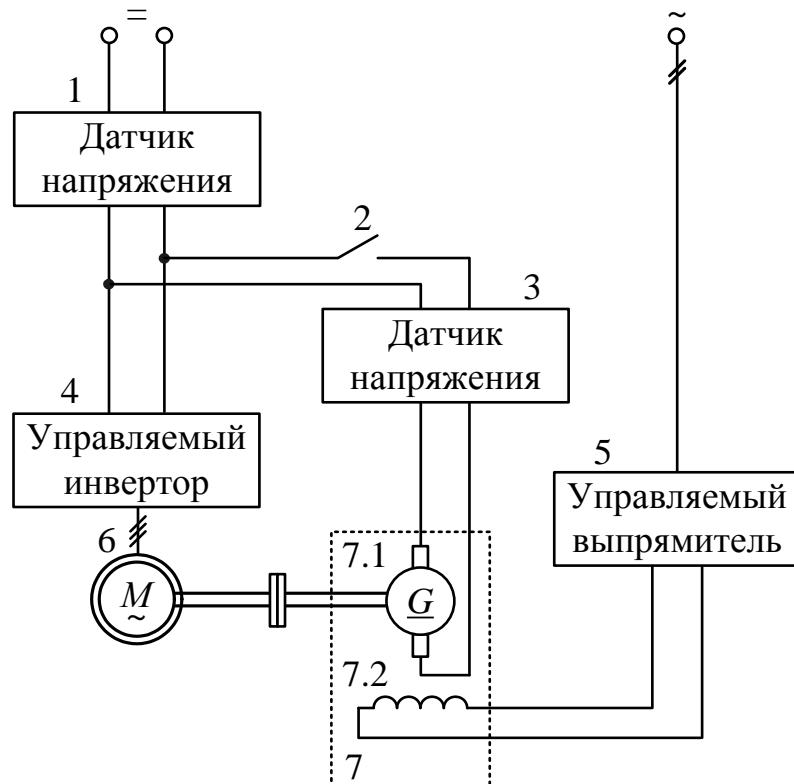


Рис. 1.24. Схема взаимной нагрузки асинхронных двигателей с нагрузочным генератором постоянного тока

Данная схема испытаний асинхронных двигателей по сравнению с предыдущей (см. рис. 1.23) является более простой и надежной. Кроме того она имеет меньшее количество преобразователей и, следовательно, меньшие потери энергии.

Недостатком данной схемы по сравнению с предыдущей является усложнение подключения якоря к ЗПТ через контактор с применением двух датчиков напряжения, а также необходимость устройства для сравнения их измерений и формирования управляющего сигнала на срабатывание контактора.

*1.3.3. Структурная схема электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки и классификация ее элементов*

Все представленные выше схемы взаимной нагрузки электрических машин имеют общие характерные черты, которые позволяют синтезировать обобщенную структурную схему электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки, представленную на рис. 1.25.

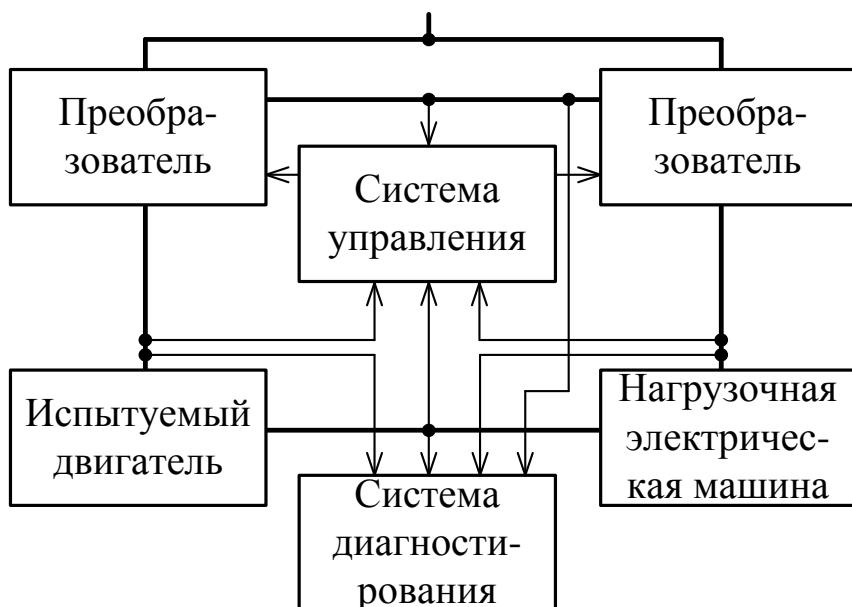
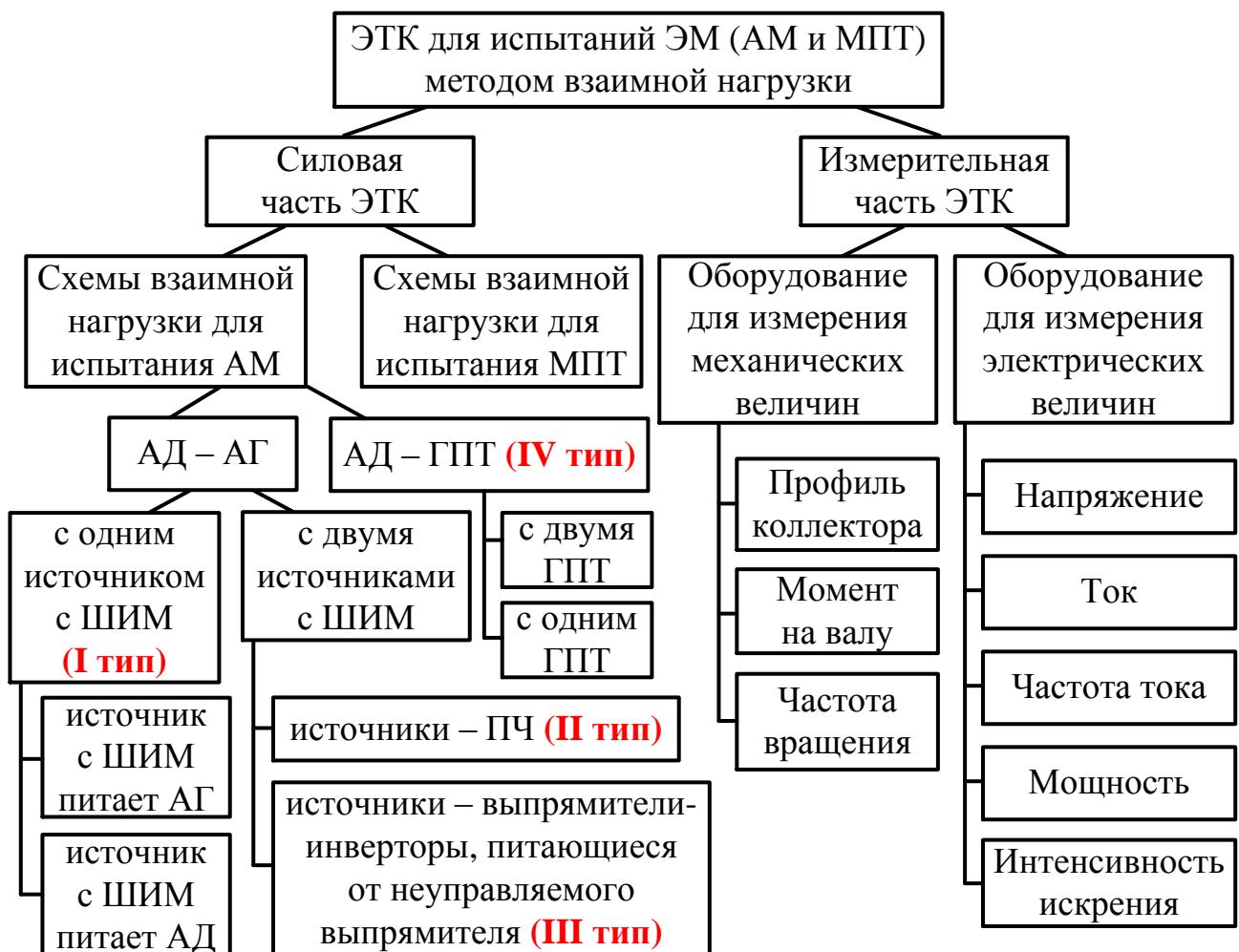


Рис. 1.25. Обобщенная структурная схема ЭТК для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки

Схема, приведенная на рис. 1.25, включает в себя пару электрических машин (испытуемый двигатель и нагрузочную электрическую машину), пару преобразователей, систему управления и систему диагностирования. В данной схеме под преобразователем понимается звено, которое может осуществлять либо не осуществлять преобразование параметров электрического тока с помощью полупроводниковых и релейных элементов. Система управления получает данные от датчиков электрических и механических показателей режимов работы элементов ЭТК и формирует управляющие воздействия по заложенному алгоритму испытаний (в автоматическом режиме) или с участием оператора. Система диагностирования также получает от датчиков различного типа данные, которые необходимы для формирования заключения об исправности или неисправности испытуемого

двигателя. Таким образом, системы управления и диагностирования включают в свой состав датчики. При этом один и тот же датчик может использоваться как одной, так и другой системой. Жирными линиями на рис. 1.25 показаны связи (вертикальные и горизонтальные), по которым осуществляется передача энергии. По вертикальным связям электроэнергия может передаваться как от преобразователей к электрическим машинам, так и в обратном направлении. По горизонтальным связям передача энергии может осуществляться по трем путям: от испытуемого двигателя к нагрузочной машине (механическая), от одного к другому преобразователю и через питающую сеть.

Анализ схем испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки позволяет классифицировать их структурные элементы, как показано на рис. 1.26.



Рассмотренные в п.п. 1.3.2 схемы взаимной нагрузки относятся к силовой части электротехнического комплекса. Их можно разделить на те, которые предназначены для испытаний АД и те, которые предназначены для испытаний ДПТ. Последние хорошо известны, имеют варианты с автоматическим управлением и широко применяются. Однако схемы для испытания АД не имеют такого широкого применения и отсутствуют научно обоснованные принципы их разработки, а также выполнения алгоритмизации и автоматизации процесса испытаний. Приведенные в п.п. 1.3.2 недостатки схем четвертого типа также требуют совершенствования их силовой части.

Перспективным направлением представляется интеграция схем испытаний асинхронных двигателей со схемами испытаний МПТ методом взаимной нагрузки. Такая задача может иметь место на предприятиях, занимающихся испытаниями обоих типов электрических машин. Интеграция различных схем должна учесть состав их оборудования с целью его оптимизации, что обусловит снижение себестоимости электротехнического комплекса в целом.

Помимо силовой части в электротехническом комплексе для испытаний электрических машин (АМ и МПТ) следует выделить его измерительную часть. При испытаниях машин различных типов, как правило, требуется проведение измерений электрических (напряжения, тока, частоты тока, активной мощности, интенсивности искрения) и механических величин (момента на валу, частоты вращения и профиля коллектора машин постоянного тока).

Возможность применения и совершенствования различных способов прямых измерений или косвенной идентификации величин указанных показателей режима работы и параметров испытуемых машин с учетом особенностей схем взаимной нагрузки требует внимательного анализа и проработки.

Таким образом, с учетом перспективных направлений для разработки новых технических и технологических решений по совершенствованию электротехнических комплексов для испытания асинхронных машин и машин постоянного тока классификация структурных элементов ЭТК может быть расширена до вида, приведенного на рис. 1.27.

На рис. 1.27 сплошными красными линиями выделены перспективные разработки, которые предлагаются в рамках данной диссертационной работы и не имеют аналогов в известных работах по ЭТК для испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки. Пунктирными красными линиями отмечено оборудование, которое имеет потенциал для модернизации, в том числе с учетом особенностей работы схем взаимной нагрузки.

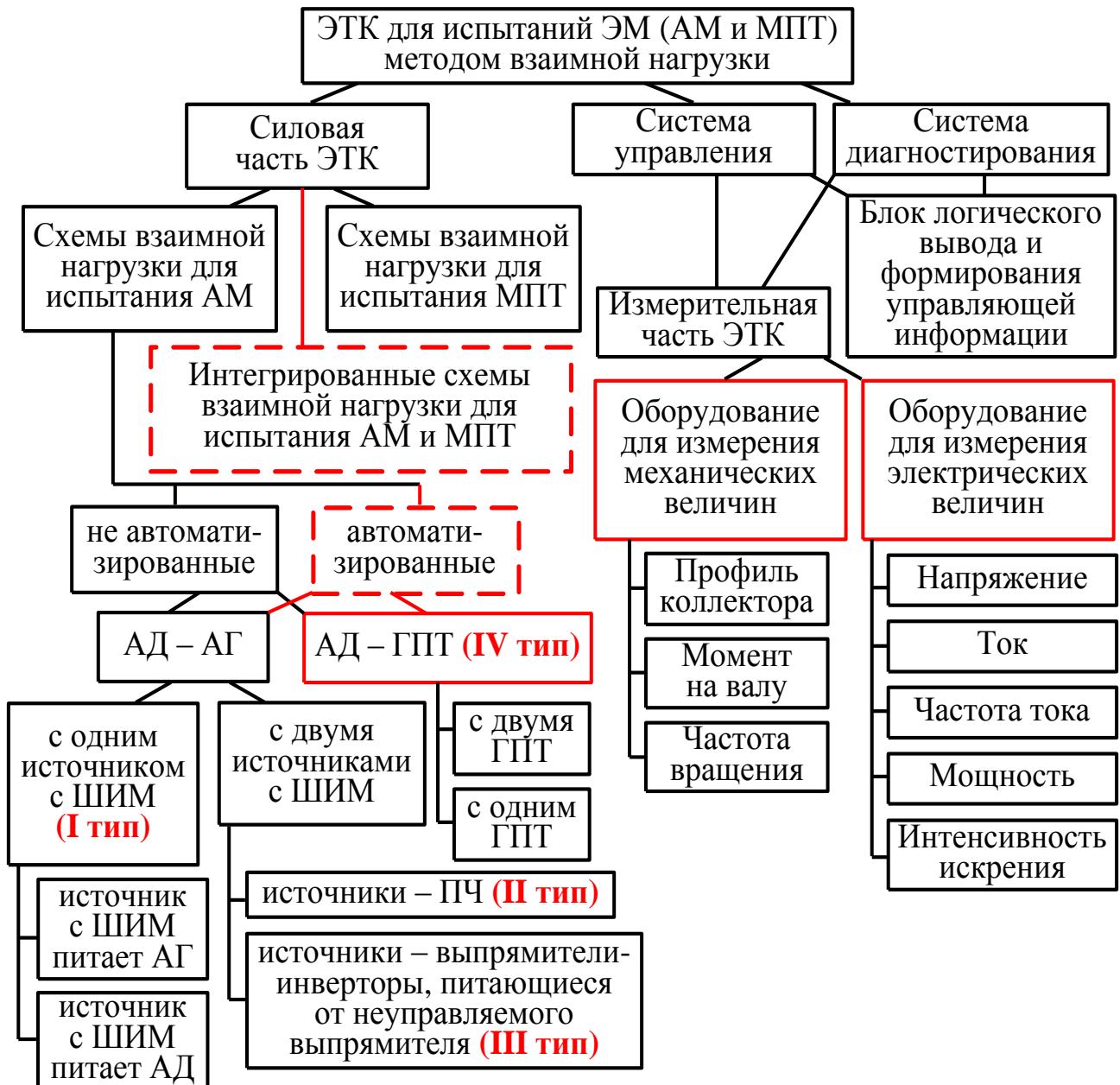


Рис. 1.27. Классификация структурных элементов электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки с учетом перспективных разработок

Анализ четырех типов схем взаимной нагрузки позволил детализировать обобщенную структурную схему для испытаний тяговых АМ, которая приведена на рис. 1.28.

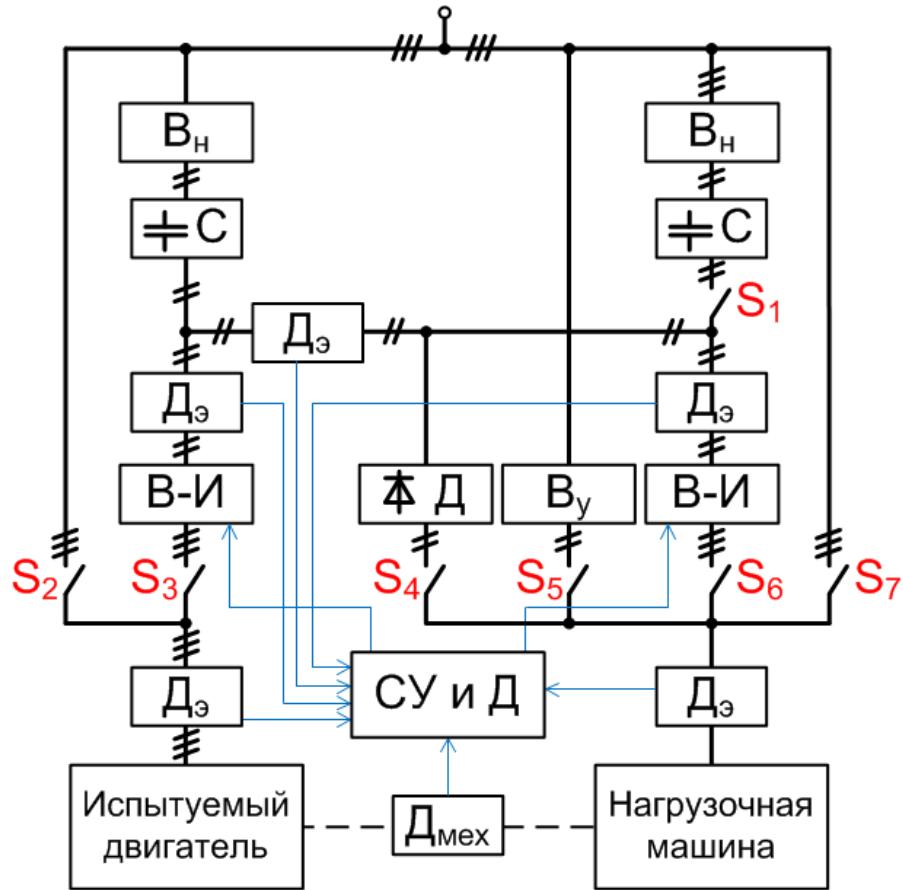


Рис. 1.28. Детализированная обобщенная структурная схема ЭТК для испытаний тяговых асинхронных машин методом взаимной нагрузки

Приведенная схема имеет следующие обозначения:

$B_H$  – выпрямитель неуправляемый;

$B_y$  – выпрямитель управляемый;

$B\text{-И}$  – выпрямитель-инвертор управляемый;

$D$  – диод;

$C$  – конденсатор;

$D_{\text{э}}$  – датчик для измерения электрического показателя;

$D_{\text{мех}}$  – датчик для измерения механического показателя;

$\text{СУ и Д}$  – блок логического вывода и формирования управляющей информации (включает в себя системы управления и диагностирования);

$S_1 - S_7$  – коммутаторы.

Различные сочетания включенного и выключенного положений коммутаторов  $S_1$  -  $S_7$  позволяет получить одну из рассмотренных схем в п.п. 1.3.2. Типы схем взаимной нагрузки и способы их получения сведены в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

Типы схем взаимной нагрузки и способы их получения с применением структурной схемы электротехнического комплекса для испытаний асинхронных двигателей

Тип схемы взаимной нагрузки для испытаний АД	Коммутаторы, которые необходимо включить на структурной схеме
I	$S_1, S_2, S_6$ или $S_3, S_7$
II	$S_1, S_3, S_6$
III	$S_3, S_6$
IV	$S_3, S_4$ или $S_3, S_5$

Разработанные обобщенные структурные схемы испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки и классификация структурных элементов электротехнического комплекса позволили проанализировать структуру изучаемого объекта (ЭТК для испытаний ЭМ) и наметить направления исследований.

#### 1.4. Выводы по первому разделу

1. В результате проведенного анализа актуальной нормативной документации по испытаниям электрических машин (асинхронных и постоянного тока) установлено, что все категории испытаний тяговых электродвигателей имеют в своих программах испытания с нагрузкой на валу. К методам испытаний, требующих создания нагрузки на валу испытуемого двигателя, относятся:

- для АМ и МПТ: испытания на нагревание в течение 1 ч., определение потерь, характеристики КПД, врачающего момента;

- для АМ: определение коэффициента мощности и скольжения в номинальном режиме,

- для МПТ: определение скоростных и нагрузочных характеристик, проверка коммутации (при максимальной частоте вращения, при номинальных данных и при кратковременной перегрузке по току в нагретом состоянии), определение класса коммутации на скоростных характеристиках, определение зоны наилучшей коммутации, измерение уровня шума.

2. Наиболее энергозатратным методом испытаний является испытание на нагревание в течение 1 ч., которое необходимо проводить при всех категориях испытаний (приемочные, квалификационные, приемосдаточные, периодические, типовые). Данное испытание не допускается проводить косвенным методом (без нагрузки, т.е. по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания), однако допускается применение метода взаимной нагрузки.

3. Как показал проведенный анализ отказов тяговых электрических машин на примере подвижного состава железных дорог, к основным причинам отказов подвижного состава относятся отказы электрических машин, доля которых для подвижного состава с асинхронными ТЭД составляет от 11 % и более, с коллекторными ТЭД – в два-три раза выше. Выявленный уровень отказов тяговых электрических машин железнодорожного подвижного состава доказывает высокую актуальность вопроса повышения качества их технического обслуживания, что требует создания и внедрения современных электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний ТЭМ.

4. Выполненные экспериментальные исследования ЭТК для испытаний асинхронных машин по схеме взаимной нагрузки и предварительная оценка энергоэффективности данного метода испытаний показала, что возврат мощности нагрузочной асинхронной машиной при номинальном режиме работы испытуемого асинхронного двигателя (номинальной мощностью 0,75 кВт) составил порядка 60 %.

5. Анализ известных схемных решений для испытания электрических машин с возвратом энергии в сеть позволил получить следующие выводы: схемы для испытания машин постоянного тока с последовательным возбуждением методом взаимной нагрузки известны, широко распространены в ремонтных депо на сети железных дорог и на практике доказали свою высокую эффективность; схемы взаимной нагрузки асинхронных машин имеют несколько известных вариантов, для которых отсутствует общая теоретическая база, позволяющая произво-

дить расчеты их основных параметров, а также осуществлять научно обоснованный выбор той или иной схемы.

6. Анализ особенностей работы различных схемных решений для испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки позволил выделить из них четыре основных типа и выявить их преимущества и недостатки, а также области возможного применения.

7. Анализ схем испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки позволил синтезировать обобщенную структурную схему электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки, классифицировать ее структурные элементы, а также в обобщенном виде детализировать данную схему для испытаний асинхронных машин.

8. Анализ структуры электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин позволил выявить основные пути повышения качества его функционирования: автоматизация процесса испытаний, совершенствование отдельных типов силовых частей схем, а также оборудования для измерительной части ЭТК, интеграция схем взаимной нагрузки, предназначенных для испытаний АМ и МПТ. Отмечено, что достижение данной цели возможно за счет обеспечения рационального использования оборудования входящего в состав схем, разработке новых образцов высокотехнологичного оборудования, разработке новых схем и способов испытаний электрических машин, обеспечивающих более высокую технологичность, энергоэффективность и более низкую стоимость внедрения.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ КОМПЛЕКСОВ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Процесс разработки электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний электрических машин невозможен без глубокого понимания физических процессов, происходящих в испытательных комплексах в целом и в их отдельных компонентах в частности. Провести адекватный анализ физических процессов можно только при наличии соответствующих математических моделей.

Электротехнические комплексы, предназначенные для испытаний электрических машин, имеют различный состав оборудования (силового, измерительного, управления). Однако часть оборудования в некоторых комплексах является общей. Таким образом, перед составлением полных математических моделей электротехнических комплексов следует рассмотреть математические модели их отдельных компонентов. Кроме того, по отдельности следует рассматривать математические модели физических процессов, не значительно влияющих друг на друга.

Ниже представлены математические модели преобразователя частоты и асинхронного двигателя, которые являются общими элементами для всех испытательных электротехнических комплексов, реализующих метод взаимной нагрузки. Также рассмотрена математическая модель пары асинхронных машин, у которых валы закреплены друг с другом посредством жесткой муфты.

Рассмотрены математические модели механического взаимодействия электрической щетки с коллектором, которая заложена в основу математической модели изнашивания электрических щеток МПТ, являющейся основой для прогнозирования их ресурса и правильного планирования операций по своевременному техническому обслуживанию и ремонту коллекторных электрических машин.

### **2.1. Особенности математического моделирования преобразователя частоты**

Наиболее распространенным типом преобразователей частоты являются двухзвенные преобразователи (рис. 2.1).

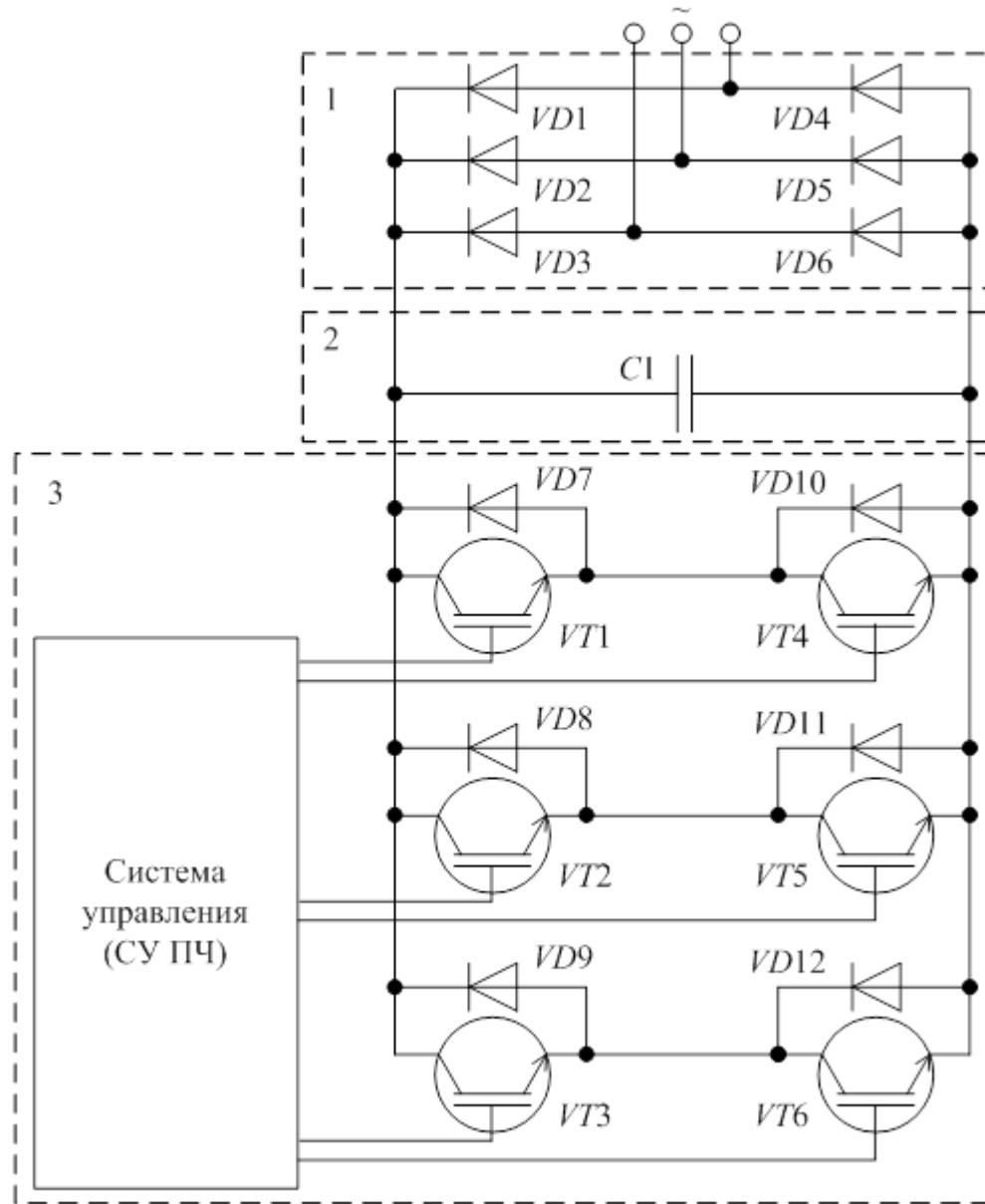


Рис. 2.1. Схема двухзвенного преобразователя частоты:

- 1 – шестипульсовая схема выпрямления;
- 2 – звено постоянного тока с конденсатором;
- 3 – выпрямитель-инвертор с системой управления

В силовой части двухзвенных преобразователей частоты как правило применяют трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель, собранный по схеме Ларионова. Неуправляемый выпрямитель является первым звеном ПЧ и преобразует переменное напряжение сети в постоянное в ЗПТ. Выпрямленное напряжение имеет шесть пульсаций на один период сетевого напряжения.

Вторым звеном в ПЧ является управляемый выпрямитель-инвертор, который преобразует выпрямленное первым звеном напряжение в переменное с за-

данной частотой посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), осуществляющей с помощью *IGBT*-транзисторов [12, 83].

Принцип работы системы управления преобразователя частоты, осуществляющей широтно-импульсную модуляцию, основан на сравнении опорного (пилообразного) и задающего (синусоидального) сигналов. Если в текущий момент времени задающее напряжение в какой-либо фазе оказалось выше опорного – подается сигнал на открытие нечетного транзистора этой фазы. Иначе – открывается четный транзистор. Если три задающих напряжения по всем фазам одновременно ниже или выше опорного – открываются либо все четные, либо все нечетные транзисторы. В таком случае напряжения на выходе ПЧ отсутствует [210].

Выражение, позволяющее получить выпрямленное напряжение на выходе первого звена преобразователя частоты, может быть сформирована в виде функции, заданной по интервалам:

$$u_{\text{вып}}(t) = \begin{cases} U_{\text{л max}} \sin(2\pi f t + \pi/3), & \text{если } 0 \leq t < T_{\text{в}}; \\ U_{\text{л max}} \sin(2\pi f(t - T_{\text{в}}) + \pi/3), & \text{если } T_{\text{в}} \leq t < 2T_{\text{в}}; \\ \dots \\ U_{\text{л max}} \sin(2\pi f(t - (N_{\text{вып}} - 1)T_{\text{в}}) + \pi/3), & \text{если } (N_{\text{вып}} - 1)T_{\text{в}} \leq t < N_{\text{вып}}T_{\text{в}}. \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $T_{\text{в}}$  – период напряжения выпрямителя,  $T_{\text{в}} = 1 / (6f) = 1 / 300$  с;

$f$  – частота напряжения в сети,  $f = 50$  Гц;

$U_{\text{л max}}$  – амплитудное значение линейного напряжения сети, которое при действующем значении фазного напряжения 220 В можно определить по выражению:

$$U_{\text{л max}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 220 \approx 538,88 \text{ В};$$

$N_{\text{вып}}$  – количество рассматриваемых периодов напряжения выпрямителя.

Данный способ задания математической модели достаточно нагляден. Однако такая запись имеет два существенных недостатка. Во-первых, с ростом  $N$  увеличивается размер выражения (2.1). Так, например, при рассмотрении задачи по расчету переходного электромеханического процесса на промежутке времени в 5 с необходимо задать  $N_{\text{вып}} = 5 \cdot 300 = 1500$  строк, что неприемлемо повышает трудоемкость создания расчетной программы. Во-вторых, скорость расчета при таком задании математической модели выпрямителя, как показали численные эксперименты в программе *Mathcad*, оказывается на порядок ниже, чем при следующей форме, требующей записи всего одной строки:

$$u_{\text{вып}}(t) = U_{\text{л max}} \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3}\text{Int}(6ft)\right), \quad (2.2)$$

где  $\text{Int}$  – функция, выделяющая целую часть числа.

График данного напряжения, рассчитанного по выражению (2.2), имеет вид, приведенный на рис. 2.2.

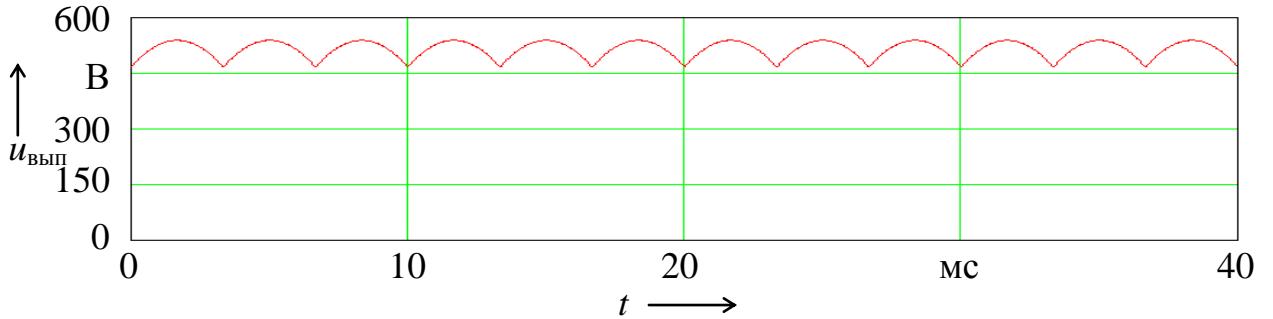


Рис. 2.2. Напряжение на выходе выпрямителя

Математическая модель системы управления инвертором частотного преобразователя может быть описана выражениями, определяющими задающий и опорный сигналы.

В качестве опорного сигнала в частотном преобразователе применяют пилообразное напряжение. Такой тип сигнала можно математически описать в виде кусочно-линейной функции следующего вида:

$$u_{\text{пп}}(t) = \begin{cases} U_4, & \text{если } 0 \leq t < T_4; \\ -U_4(t - 2T_4), & \text{если } T_4 \leq t < 3T_4; \\ U_4(t - 4T_4), & \text{если } 3T_4 \leq t < 5T_4; \\ -U_4(t - 6T_4), & \text{если } 5T_4 \leq t < 7T_4; \\ \dots \\ U_4(t - (2N_{\text{пп}} - 2)T_4), & \text{если } (2N_{\text{пп}} - 3)T_4 \leq t < (2N_{\text{пп}} - 1)T_4; \\ -U_4(t - 2N_{\text{пп}}T_4), & \text{если } (2N_{\text{пп}} - 1)T_4 \leq t < 2N_{\text{пп}}T_4, \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $T_4$  – четверть периода пилообразной функции  $u_{\text{пп}}(t)$ , определяющего частоту ШИМ управляемого инвертора преобразователя частоты;

$U_4$  – коэффициент, определяющий амплитуду пилообразной функции  $u_{\text{пп}}(t)$ ;

$N_{\text{пп}}$  – количество рассматриваемых периодов пилообразной функции  $u_{\text{пп}}(t)$ .

Данный способ задания математической модели, как и выражение (3.1), достаточно нагляден и имеет те же недостатки. При этом ввиду того, что период пи-

лообразной функции  $u_{\text{п}}(t)$  значительно меньше периода функции  $u_{\text{вып}}(t)$ , так как частота ШИМ  $f_{\text{п}}$ , как правило, составляет несколько килогерц, а для описания  $N_{\text{п}}$  периодов требуется количество строк  $(2N_{\text{п}}+1)$ , то для записи такой функции на промежутке времени 5 с потребуется еще большее количество строк, чем для описания  $u_{\text{вып}}(t)$ .

Таким образом, для математического моделирования опорного сигнала более приемлемой является функция следующего вида, записываемая выражением в две строки:

$$u_{\text{п}}(t) = \begin{cases} U_{\text{п max}} (4f_{\text{п}}t - 4\text{Int}(f_{\text{п}}t) - 1), & \text{если } 0 \leq t - \text{Int}(f_{\text{п}}t)/f_{\text{п}} < 0,5/f_{\text{п}}; \\ -U_{\text{п max}} (4f_{\text{п}}t - 4\text{Int}(f_{\text{п}}t) - 3), & \text{если } 0,5/f_{\text{п}} \leq t - \text{Int}(f_{\text{п}}t)/f_{\text{п}} < 1/f_{\text{п}}, \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $T_{\text{п}}$  – период пилообразной функции  $u_{\text{п}}(t)$ , определяющий частоту ШИМ выпрямителя-инвертора;

$U_{\text{п max}}$  – амплитуда опорного сигнала.

Значение амплитуды опорного сигнала при математическом моделировании преобразователя частоты не играет принципиальной роли, т.к. напряжение на выходе ПЧ определяется только отношением значения амплитуды  $U_{\text{з max}}$  к амплитудам задающих сигналов  $u_{\text{з}a}(t)$ ,  $u_{\text{з}b}(t)$  и  $u_{\text{з}c}(t)$ , сравниваемых с опорным сигналом при формировании импульсов IGBT транзисторами в силовой цепи.

Таким образом, задающие сигналы могут быть записаны в следующем виде:

$$u_{\text{з}a}(t) = U_{\text{з max}} \sin(2\pi f_{\text{з}} t); \quad (2.5)$$

$$u_{\text{з}b}(t) = U_{\text{з max}} \sin(2\pi f_{\text{з}} t - 2\pi/3); \quad (2.6)$$

$$u_{\text{з}c}(t) = U_{\text{з max}} \sin(2\pi f_{\text{з}} t - 4\pi/3). \quad (2.7)$$

Пример построения опорного сигнала частотой  $f_{\text{п}} = 4\text{кГц}$  и задающих сигналов трех фаз частотой  $f_{\text{з}} = 50$  Гц на интервале времени 10 мс при их одинаковой амплитуде приведен на рис. 2.3.

Рассмотрим процесс широтно-импульсной модуляции по фазе А.

Если в какой-то момент времени опорный сигнал в фазе А выше задающего – открывается четный транзистор фазы А, в противном случае – нечетный. Такой же алгоритм работы транзисторов в остальных фазах. Если опорный сигнал

во всех фазах либо превышает, либо ниже задающих, то напряжение на выходе ПЧ равно нулю.

Таким образом, при всех вариантах группировки включения/отключения транзисторов, возможны только три варианта напряжения, приходящегося на фазу.

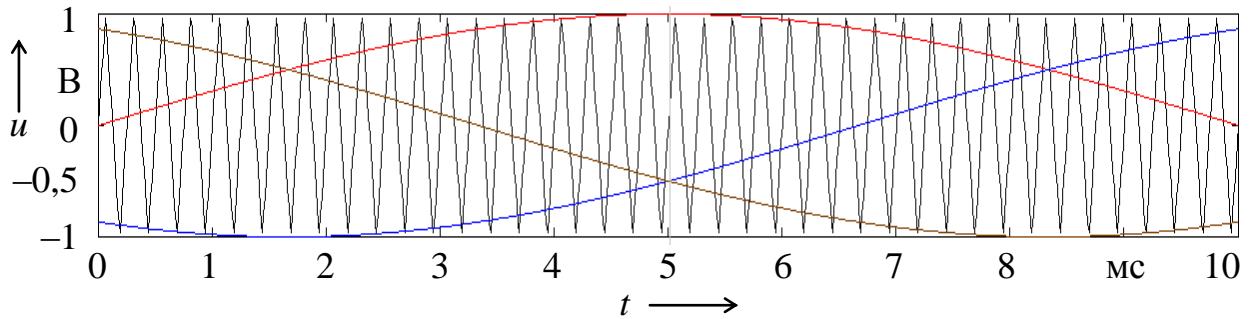


Рис. 2.3. Пример построения опорного сигнала частотой 4кГц и задающих сигналов трех фаз частотой 50 Гц на интервале времени 10 мс

В первом случае, если у фаз В и С открылись транзисторы одинаковой четности, а у фазы А – другой, то к фазе А будет приложено 2/3 от напряжения  $u_{\text{вып}}(t)$ .

Во втором случае, если у фаз В и С открылись транзисторы разной четности и открыт любой транзистор у фазы А, к ней оказывается приложена 1/3 от напряжения  $u_{\text{вып}}(t)$ .

В третьем случае, если во всех трех фазах открыты транзисторы одинаковой четности, в фазе А напряжение отсутствует.

Следовательно, выражение для напряжения в фазе А на выходе преобразователя частоты принимает следующий вид:

$$u_a(t) = \begin{cases} \frac{2}{3}u_{\text{вып}}(t)\text{sign}(u_{3a}(t)-u_{\text{пп}}(t)), & \text{если } \text{sign}(u_{3b}(t)-u_{\text{пп}}(t))=... \\ ...=\text{sign}(u_{3c}(t)-u_{\text{пп}}(t)) \neq \text{sign}(u_{3a}(t)-u_{\text{пп}}(t)); \\ \frac{1}{3}u_{\text{вып}}(t)\text{sign}(u_{3a}(t)-u_{\text{пп}}(t)), & \text{если } \text{sign}(u_{3b}(t)-u_{\text{пп}}(t)) \neq \\ ... \neq \text{sign}(u_{3c}(t)-u_{\text{пп}}(t)); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2.8)$$

Аналогичным образом для фаз  $B$  и  $C$  могут быть получены следующие выражения:

$$u_b(t) = \begin{cases} \frac{2}{3}u_{\text{вып}}(t)\text{sign}(u_{3b}(t) - u_{\text{пп}}(t)), & \text{если } \text{sign}(u_{3a}(t) - u_{\text{пп}}(t)) = \dots \\ & \dots = \text{sign}(u_{3c}(t) - u_{\text{пп}}(t)) \neq \text{sign}(u_{3b}(t) - u_{\text{пп}}(t)); \\ \frac{1}{3}u_{\text{вып}}(t)\text{sign}(u_{3b}(t) - u_{\text{пп}}(t)), & \text{если } \text{sign}(u_{3a}(t) - u_{\text{пп}}(t)) \neq \\ & \dots \neq \text{sign}(u_{3c}(t) - u_{\text{пп}}(t)); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$u_c(t) = \begin{cases} \frac{2}{3}u_{\text{вып}}(t)\text{sign}(u_{3c}(t) - u_{\text{пп}}(t)), & \text{если } \text{sign}(u_{3b}(t) - u_{\text{пп}}(t)) = \dots \\ & \dots = \text{sign}(u_{3a}(t) - u_{\text{пп}}(t)) \neq \text{sign}(u_{3c}(t) - u_{\text{пп}}(t)); \\ \frac{1}{3}u_{\text{вып}}(t)\text{sign}(u_{3c}(t) - u_{\text{пп}}(t)), & \text{если } \text{sign}(u_{3b}(t) - u_{\text{пп}}(t)) \neq \\ & \dots \neq \text{sign}(u_{3a}(t) - u_{\text{пп}}(t)); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2.10)$$

Расчетный график одного периода напряжения фазы  $A$  на выходе двухзвенового преобразователя частоты, полученный в программе *Mathcad* исходя из выражений (2.2), (2.4), (2.5) и (2.8), приведен на рис. 2.4.

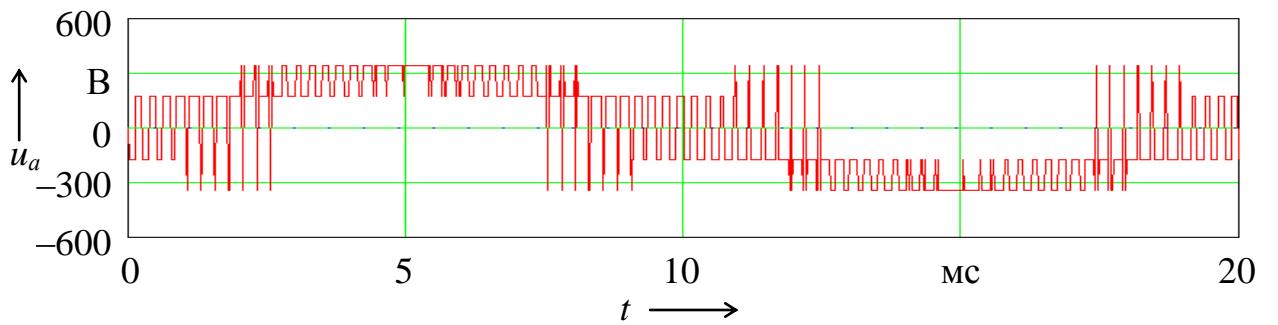


Рис. 2.4. Расчетное фазное напряжение на выходе двухзвенного преобразователя частоты

Расчетный график половины периода линейного напряжения  $u_{ab} = u_b - u_a$  на выходе двухзвенного преобразователя частоты, полученный в программе *Mathcad* исходя из выражений (2.2), (2.4) – (2.6), (2.8), (2.9), приведен на рис. 2.5.

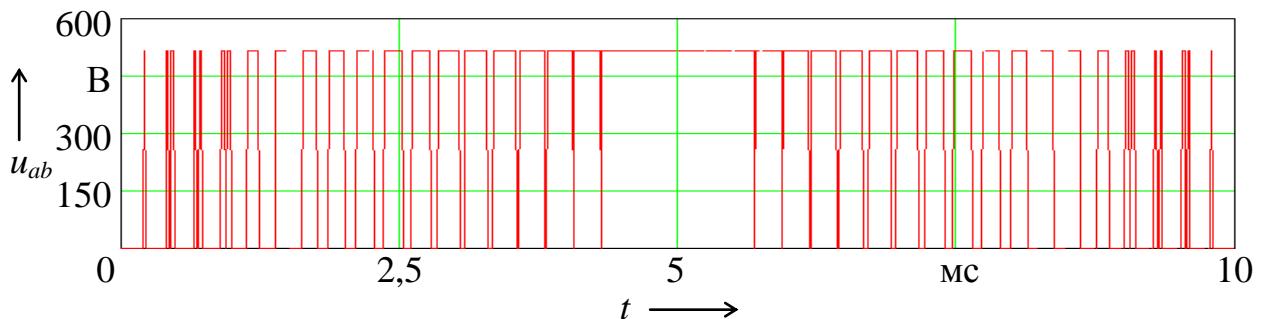


Рис. 2.5. Расчетное линейное напряжение  
на выходе двухзвенного преобразователя частоты

Осциллограмма половины периода линейного напряжения на выходе двухзвенного преобразователя частоты, полученная на экспериментальном стенде, приведена на рис. 2.6.

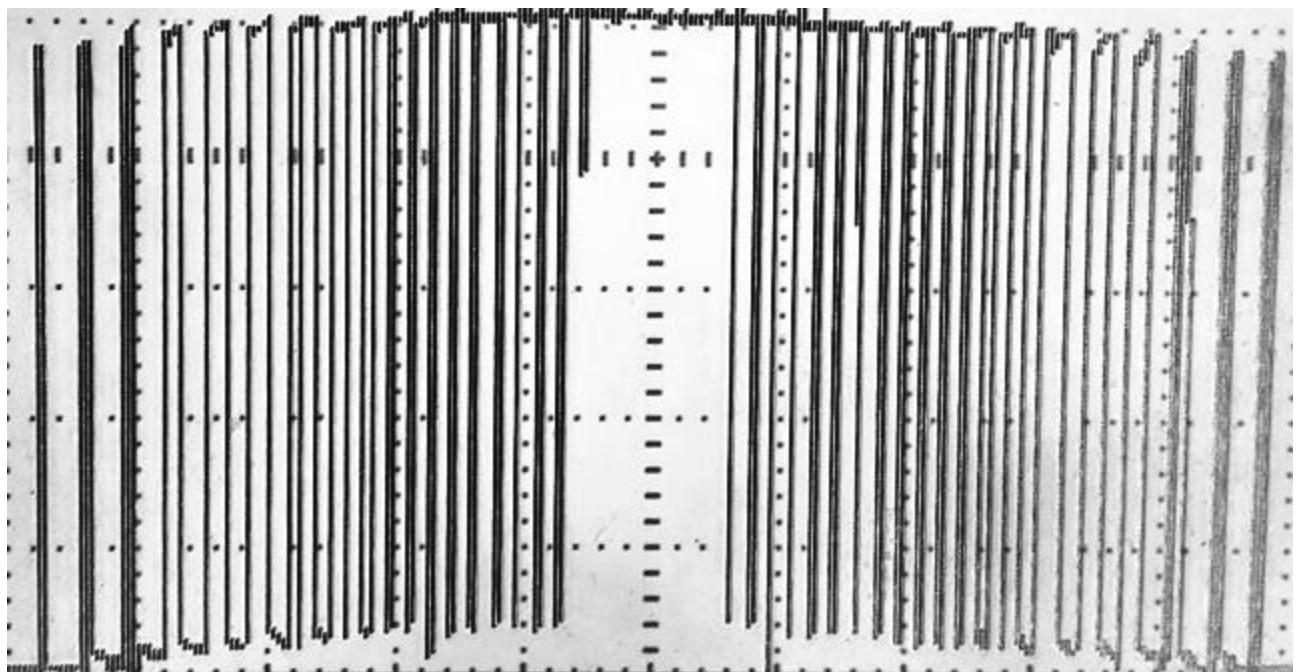


Рис. 2.6. Осциллограмма линейного напряжения  
на выходе двухзвенного преобразователя частоты  
(масштаб времени – 1 мс/дел, масштаб напряжения – 100 В/дел)

Приведенная осциллограмма, полученная на экспериментальном стенде, идентична расчетной временной диаграмме, приведенной на рис. 2.5, что подтверждает адекватность расчетных выражений, приведенных выше.

Напряжения, приведенные на рис. 2.4. и 2.5 рассчитаны при отсутствии пульсаций напряжения в звене постоянного тока. При их наличии и форме, приведенной на рис. 2.2, графики фазного и линейного напряжений на выходе ПЧ принимают вид, приведенный на рис. 2.7 и 2.8.

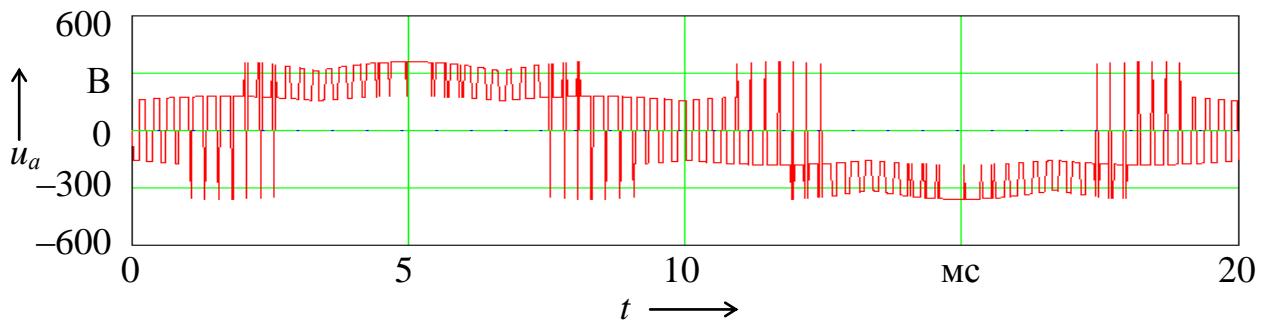


Рис. 2.7. Расчетное фазное напряжение  
на выходе двухзвенного преобразователя частоты

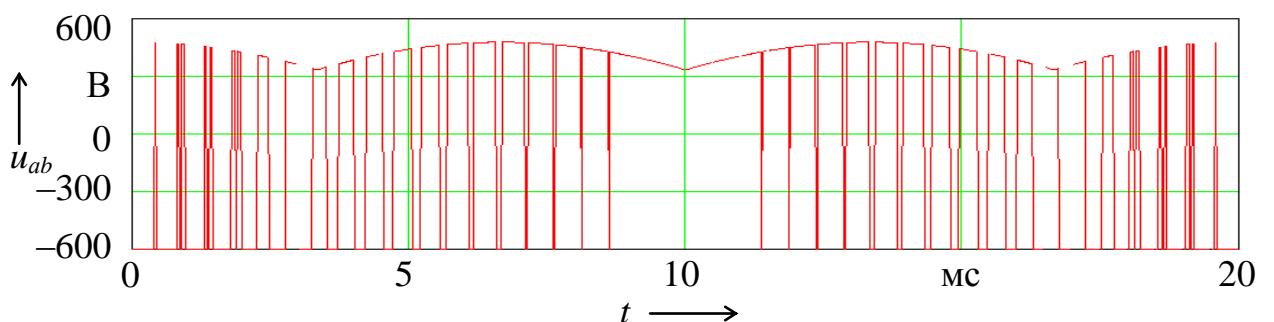


Рис. 2.8. Расчетное линейное напряжение  
на выходе двухзвенного преобразователя частоты

Физические процессы, описываемые уравнениями (2.4) – (2.10), соответствуют работе следующей схемы, составленной в программе *Multisim*, предназначеннай для имитационного моделирования электрических и электронных схем, приведенной на рис. 2.9 [195].

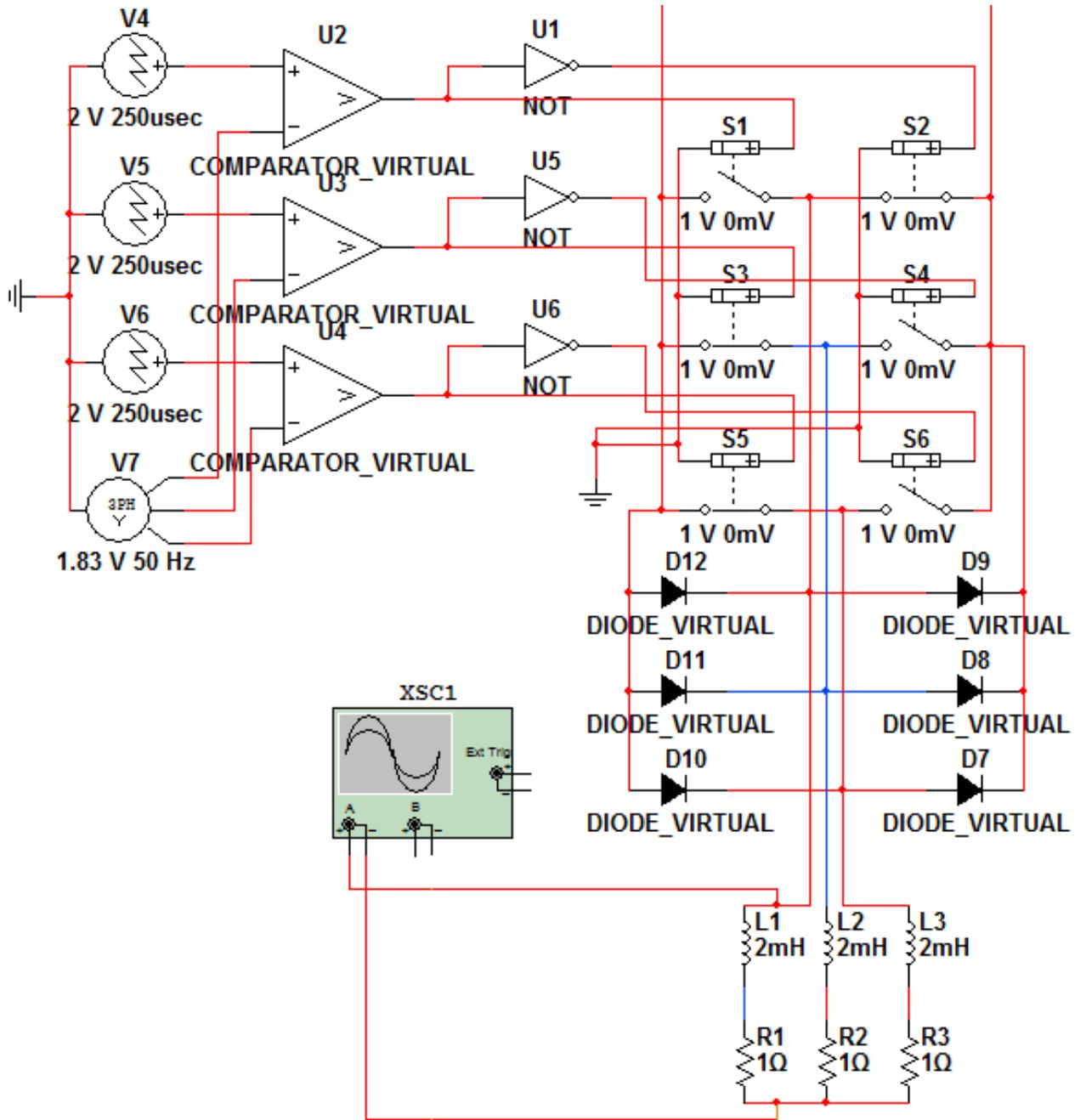


Рис. 2.9. Имитационная модель составленная в программе *Multisim* для управляемого выпрямителя-инвертора, работающего на активно-индуктивную нагрузку,

Данная схема имеет источники пилообразного напряжения ( $V4 - V6$ ), которое может быть рассчитано по (2.4). Источник  $V7$  формирует сигналы задающего синусоидального напряжения по трем фазам в соответствии по (2.5) – (2.7).

Диоды ( $D7 – D12$ ), управляемые ключи (идеальные транзисторы) ( $S1 – S6$ ), компараторы ( $U2 – U4$ ) и инверторы ( $U1, U5, U6$ ) формируют на выходе преобразователя частоты напряжение по формулам (2.8) – (2.10).

Осциллограмма напряжения фазы  $a$ , полученная путем имитационного моделирования в программе *Multisim*, приведена на рис. 2.10.

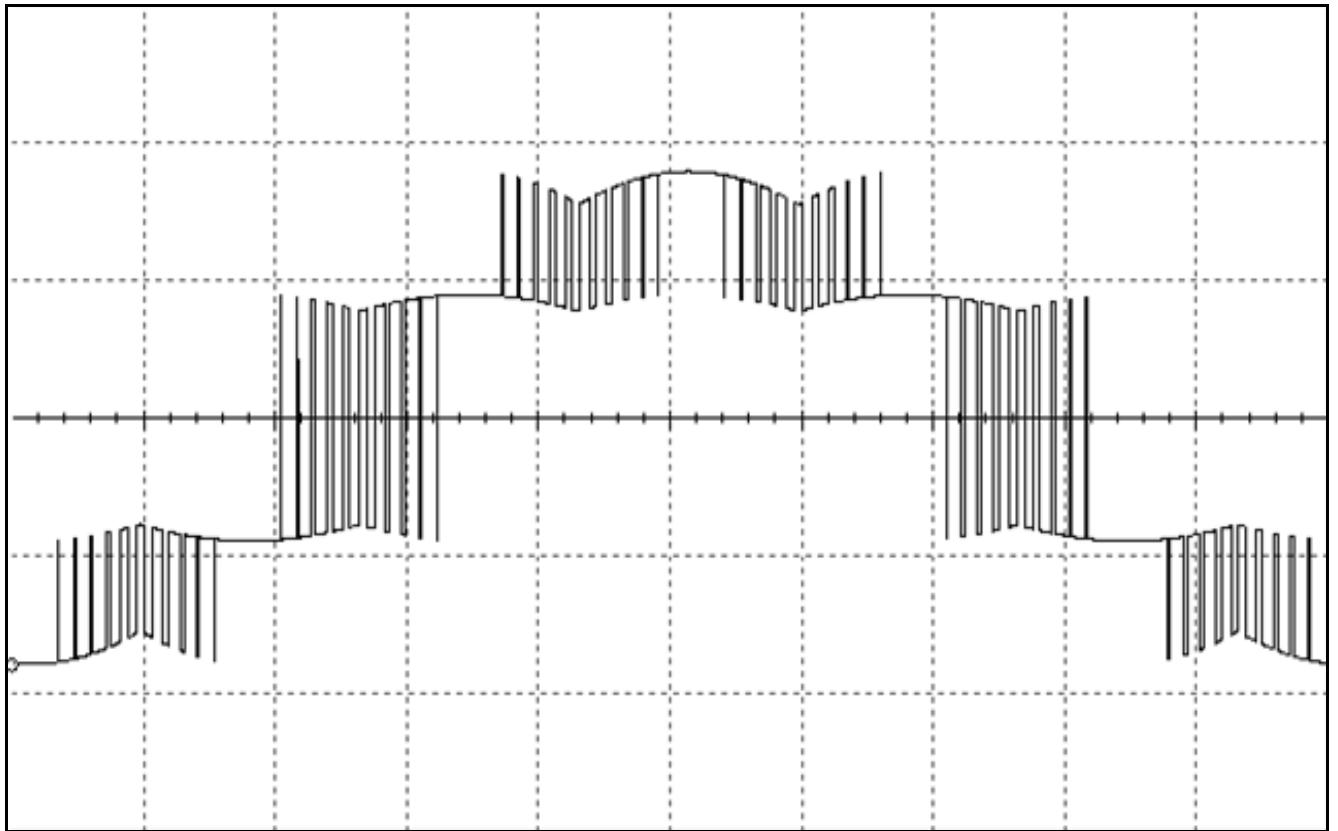


Рис. 2.10. Фазное напряжение ПЧ, полученное путем имитационного моделирования в программе *Multisim* (масштабы: напряжения – 200 В/дел, времени – 2 мс/дел)

Данное напряжение с выхода ПЧ (см. рис. 2.9) поступает на вход осциллографа XSC1. Анализа гармонического состава фазного напряжения на выходе ПЧ осуществлено путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) с программе *Mathcad* с помощью встроенной функции *fft*. Данная функция позволяет выполнять БПФ для сигналов, заданных в виде одномерной матрицы, состоящей из действительных чисел [84, 108].

Гармонический состав напряжения фазы  $a$  (см. рис. 2.10), представлен на рис. 2.11.

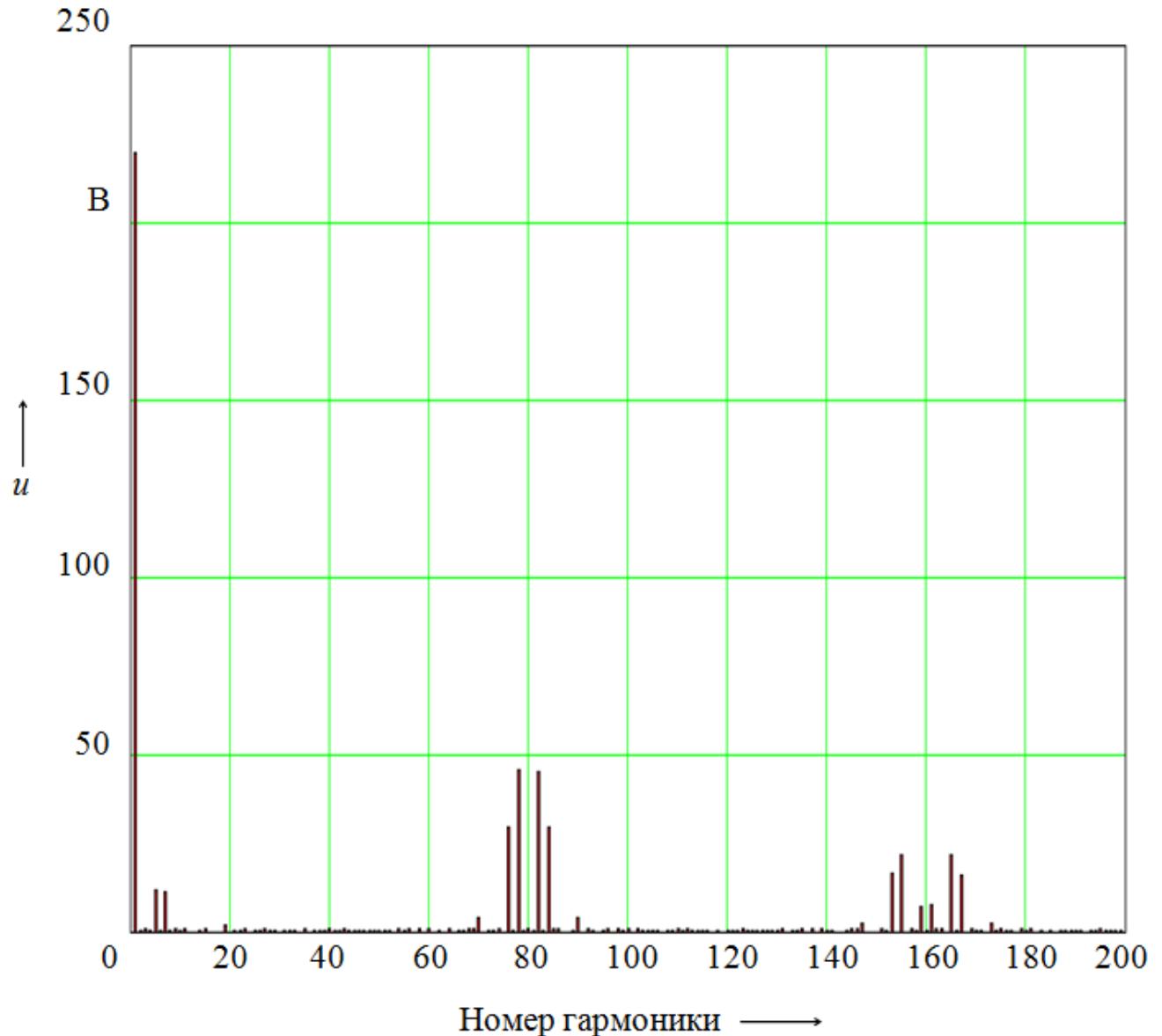


Рис. 2.11. Спектр сигнала напряжения, полученного на выходе ПЧ путем имитационного моделирования в программе *Multisim* ( $f_{\pi} = 4$  кГц)

Выполним анализ гармонического состава, приведенного на рис. 2.11. Для этого сведем значения наиболее высоких амплитуд гармоник в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты расчета действующих значений гармоник напряжения фазы  $A$   
(частота основной гармоники – 50 Гц)

№ гармоники	Особенности вычисления номера гармоники	Действующее значение гармоники, %
1	–	100,00
5	–	5,54
7	–	5,18
76	$f_{\text{п}}/f_3 - 4$	13,59
78	$f_{\text{п}}/f_3 - 2$	20,73
82	$f_{\text{п}}/f_3 + 2$	20,63
84	$f_{\text{п}}/f_3 + 4$	13,55
153	$2f_{\text{п}}/f_3 - 7$	7,50
155	$2f_{\text{п}}/f_3 - 5$	9,59
159	$2f_{\text{п}}/f_3 - 1$	3,41
161	$2f_{\text{п}}/f_3 + 1$	3,50
165	$2f_{\text{п}}/f_3 + 5$	9,91
167	$2f_{\text{п}}/f_3 + 7$	7,36

По двум остальным фазам распределение значений амплитуд гармоник аналогично.

Анализ результатов расчета, приведенных в табл. 2.1 показывает, что номера гармоник  $k_{\text{г}}$  напряжения на выходе ПЧ, имеющих наиболее высокие значения, при частоте основной гармоники, равной 50 Гц и частоте опорного пилообразного сигнала частотой 4000 Гц, близки к значениям, кратным 80. Таким образом можно записать:

$$k_{\text{г}} \approx \frac{f_{\text{п}}}{f_3}, \quad (2.11)$$

где  $f_3$  – частота задающего сигнала, Гц;

$f_{\text{п}}$  – частота опорного сигнала, Гц.

Таким образом, принципиально для упрощения математического моделирования испытательного комплекса с учетом высших гармоник напряжения, подаваемого на АМ, может быть предложена математическая модель напряжения на выходе ПЧ в виде следующих зависимостей:

$$u_a(t) = U_{\max} \sin(2\pi f_3 t) + U_{k \max} \sin(2\pi f_3 t k_r) + \dots ; \quad (2.12)$$

$$u_b(t) = U_{\max} \sin(2\pi f_3 t - 2\pi/3) + U_{k \max} \sin(2\pi f_3 t k_r - 2\pi/3) + \dots ; \quad (2.13)$$

$$u_c(t) = U_{\max} \sin(2\pi f_3 t - 4\pi/3) + U_{k \max} \sin(2\pi f_3 t k_r - 4\pi/3) + \dots , \quad (2.14)$$

где  $U_{\max}$  – амплитуда первой гармоники напряжения на выходе ПЧ;

$U_{k \max}$  – амплитуда  $k_r$ -й гармоники напряжения на выходе ПЧ.

Однако данное упрощение математической модели ПЧ приводит к дополнительным сложностям: не ясно как определить амплитуды напряжений в выражениях (2.12) – (2.14), а также не изучено какую погрешность данное упрощение вносит в математическую модель.

Следовательно, математической моделью ПЧ, в полной мере отражающей реальный принцип формирования его выходного напряжения, является совокупность выражений (2.2), (2.4) – (2.10).

## **2.2. Особенности математического моделирования асинхронного двигателя**

Как известно, для создания кругового вращающегося магнитного поля в электрической машине необходимо, чтобы она имела  $m$ -фазную обмотку и  $m$  осей симметрии, сдвинутых друг относительно друга на угол  $2\pi/m$ , а также, чтобы ее обмотка статора питалась симметричным синусоидальным  $m$ -фазным напряжением [22]. Зачастую для сведения к минимуму количества дифференциальных уравнений, составляющих математическую модель электрической машины, с целью упрощения расчетов такую  $m$ -фазную машину приводят к двухфазной.

Однако при математическом моделировании трехфазной асинхронной машины при несинусоидальном напряжении, подаваемом на ее обмотку статора, приводить ее к двухфазной неправомерно [72].

Известны различные варианты записи математической модели трехфазной асинхронной машины, отличающиеся друг от друга тем, какая величина является неизвестной: токи фаз статора или соответствующие потокосцепления [47, 72, 73, 186].

При разработке ЭТК для испытаний ЭМ необходимо иметь расчет токов во всех ветвях схемы.

Таким образом, для моделирования асинхронной машины в данном случае более обосновано использование математической модели с неизвестными токами обмоток статора [186]. Математическая модель асинхронного двигателя такого типа имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{1a}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_1} (u_{1a} - i_{1a} R_1 + k_r e_a''); \\ \frac{di_{1b}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_1} (u_{1b} - i_{1b} R_1 + k_r e_b''); \\ \frac{di_{1c}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_1} (u_{1c} - i_{1c} R_1 + k_r e_c''); \\ \frac{di'_{2a}}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_2} (k_s (u_{1a} - i_{1a} R_1) + e_a''); \\ \frac{di'_{2b}}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_2} (k_s (u_{1b} - i_{1b} R_1) + e_b''); \\ \frac{di'_{2c}}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_2} (k_s (u_{1c} - i_{1c} R_1) + e_c''); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - |M_c| \operatorname{sign}(\omega)), \end{array} \right. \quad (2.15)$$

где  $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}$  – токи соответствующих фаз статора;

$u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}$  – напряжения соответствующих фаз статора;

$R_1$  – активное сопротивление фазы статора;

$J$  – момент инерции двигателя;

$M_c$  – момент сопротивления на валу;

$\sigma$  – коэффициент, учитывающий индуктивности фазных обмоток статора и ротора:

$$\sigma = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 L_2}, \quad (2.16)$$

где  $L_1$  – индуктивность фазы обмотки статора:

$$L_1 = L_{12} + L_{1\sigma}, \quad (2.17)$$

где  $L_{1\sigma}$  – индуктивность рассеяния фазы обмотки статора;

$L_{12}$  – наибольшее значение взаимной индуктивности между фазами обмотки:

$$L_{12} = \frac{3}{2} L_m, \quad (2.18)$$

где  $L_m$  – максимальное значение взаимной индуктивности между фазами статора и ротора;

$L_2$  – индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L_2 = L_{12} + L_{2\sigma}, \quad (2.19)$$

где  $L_{2\sigma}$  – индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора;

–  $k_r, k_s$  – коэффициенты магнитной связи:

$$k_r = \frac{L_{12}}{L_2}; \quad (2.20)$$

$$k_s = \frac{L_{12}}{L_2}; \quad (2.21)$$

–  $e''_a, e''_b, e''_c$  – ЭДС, приведенные к статору, индукируемые потокосцеплением ротора:

$$e''_a = i'_{2a} R_2 + \omega_{\text{зл}} (L_{12} i_{1cb} + L_2 i_{2cb}); \quad (2.22)$$

$$e''_b = i'_{2b} R_2 + \omega_{\text{зл}} (L_{12} i_{1ac} + L_2 i_{2ac}); \quad (2.23)$$

$$e''_c = i'_{2c} R_2 + \omega_{\text{зл}} (L_{12} i_{1ba} + L_2 i_{2ba}); \quad (2.24)$$

где  $i'_{2a}, i'_{2b}, i'_{2c}$  – приведенные к статору токи ротора по ортогональным осям фаз;

$R_2$  – активное сопротивление ротора;

–  $i_{1cb}, i_{1ac}, i_{1ba}$  – токи по осям, ортогональным фазам статора:

$$i_{1cb} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{1b} - i_{1c}); \quad (2.25)$$

$$i_{1ac} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{1c} - i_{1a}); \quad (2.26)$$

$$i_{1ba} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{1a} - i_{1b}); \quad (2.27)$$

–  $i_{2cb}$ ,  $i_{2ac}$ ,  $i_{2ba}$  – токи по осям, ортогональным фазам ротора:

$$i_{2cb} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{2b} - i_{2c}); \quad (2.28)$$

$$i_{2ac} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{2c} - i_{2a}); \quad (2.29)$$

$$i_{2ba} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{2a} - i_{2b}); \quad (2.30)$$

–  $\omega$  – скорость вращения ротора:

$$\omega = \omega_{\text{эл}} / p, \quad (2.31)$$

где  $p$  – число пар полюсов;

$\omega_{\text{эл}}$  – угловая скорость вращения магнитного поля;

–  $M$  – электромагнитный момент двигателя:

$$M = -pL_{12}(i_{1a}i_{2cb} + i_{1b}i_{2ac} + i_{1c}i_{2ba}). \quad (2.32)$$

### 2.3. Математическая модель системы из двух асинхронных двигателей с механически связанными валами

Математическая модель, описывающая работу двух асинхронных машин в режиме взаимной нагрузки должна учитывать электромагнитные процессы в каждой машине и механическую связь их валов.

Математическая модель пары асинхронных машин с механически связанными валами представляет собой следующую систему уравнений [153]:

$$\begin{aligned}
\frac{d\mathbf{i}_{1a}}{dt} &= \frac{1}{L_{11}\sigma_1} \left[ u\mathbf{i}_{1a} - i\mathbf{i}_{1a}R_{11} + k_{1r} \left[ i\mathbf{i}'_{2a}R_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{12}(i\mathbf{i}_{1b} - i\mathbf{i}_{1c}) + L_{12}(i\mathbf{i}'_{2b} - i\mathbf{i}'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathbf{i}_{1b}}{dt} &= \frac{1}{L_{11}\sigma_1} \left[ u\mathbf{i}_{1b} - i\mathbf{i}_{1b}R_{11} + k_{1r} \left[ i\mathbf{i}'_{2b}R_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{12}(i\mathbf{i}_{1c} - i\mathbf{i}_{1a}) + L_{12}(i\mathbf{i}'_{2c} - i\mathbf{i}'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathbf{i}_{1c}}{dt} &= \frac{1}{L_{11}\sigma_1} \left[ u\mathbf{i}_{1c} - i\mathbf{i}_{1c}R_{11} + k_{1r} \left[ i\mathbf{i}'_{2c}R_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{12}(i\mathbf{i}_{1a} - i\mathbf{i}_{1b}) + L_{12}(i\mathbf{i}'_{2a} - i\mathbf{i}'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathbf{i}'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L_{12}\sigma_1} \left[ k_{1z}(u\mathbf{i}_{1a} - i\mathbf{i}_{1a}R_{11}) + \left[ i\mathbf{i}'_{2a}R_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{12}(i\mathbf{i}_{1b} - i\mathbf{i}_{1c}) + L_{12}(i\mathbf{i}'_{2b} - i\mathbf{i}'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathbf{i}'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L_{12}\sigma_1} \left[ k_{1z}(u\mathbf{i}_{1b} - i\mathbf{i}_{1b}R_{11}) + \left[ i\mathbf{i}'_{2b}R_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{12}(i\mathbf{i}_{1c} - i\mathbf{i}_{1a}) + L_{12}(i\mathbf{i}'_{2c} - i\mathbf{i}'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathbf{i}'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L_{12}\sigma_1} \left[ k_{1z}(u\mathbf{i}_{1c} - i\mathbf{i}_{1c}R_{11}) + \left[ i\mathbf{i}'_{2c}R_{12} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{12}(i\mathbf{i}_{1a} - i\mathbf{i}_{1b}) + L_{12}(i\mathbf{i}'_{2a} - i\mathbf{i}'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{-p}{J\sqrt{3}} [L_{12}[i\mathbf{i}_{1a}(i\mathbf{i}'_{2b} - i\mathbf{i}'_{2c}) + i\mathbf{i}_{1b}(i\mathbf{i}'_{2c} - i\mathbf{i}'_{2a}) + i\mathbf{i}_{1c}(i\mathbf{i}'_{2a} - i\mathbf{i}'_{2b})] + \dots \\
&\quad \dots + L_{21}[i\mathcal{Q}_{1a}(i\mathcal{Q}'_{2b} - i\mathcal{Q}'_{2c}) + i\mathcal{Q}'_{1b}(i\mathcal{Q}'_{2c} - i\mathcal{Q}'_{2a}) + i\mathcal{Q}_{1c}(i\mathcal{Q}'_{2a} - i\mathcal{Q}'_{2b})]] - \frac{M_{\text{rot}}}{J} \text{sign}(\omega); \\
\frac{d\mathcal{Q}_{1a}}{dt} &= \frac{1}{L_{21}\sigma_2} \left[ u\mathcal{Q}_{1a} - i\mathcal{Q}_{1a}R_{21} + k_{2r} \left[ i\mathcal{Q}'_{2a}R_{22} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{21}(i\mathcal{Q}_{1b} - i\mathcal{Q}_{1c}) + L_{21}(i\mathcal{Q}'_{2b} - i\mathcal{Q}'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathcal{Q}_{1b}}{dt} &= \frac{1}{L_{21}\sigma_2} \left[ u\mathcal{Q}_{1b} - i\mathcal{Q}_{1b}R_{21} + k_{2r} \left[ i\mathcal{Q}'_{2b}R_{22} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{21}(i\mathcal{Q}_{1c} - i\mathcal{Q}_{1a}) + L_{21}(i\mathcal{Q}'_{2c} - i\mathcal{Q}'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathcal{Q}_{1c}}{dt} &= \frac{1}{L_{21}\sigma_2} \left[ u\mathcal{Q}_{1c} - i\mathcal{Q}_{1c}R_{21} + k_{2r} \left[ i\mathcal{Q}'_{2c}R_{22} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{21}(i\mathcal{Q}_{1a} - i\mathcal{Q}_{1b}) + L_{21}(i\mathcal{Q}'_{2a} - i\mathcal{Q}'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathcal{Q}'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L_{22}\sigma_2} \left[ k_{2z}(u\mathcal{Q}_{1a} - i\mathcal{Q}_{1a}R_{21}) + \left[ i\mathcal{Q}'_{2a}R_{22} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{21}(i\mathcal{Q}_{1b} - i\mathcal{Q}_{1c}) + L_{21}(i\mathcal{Q}'_{2b} - i\mathcal{Q}'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathcal{Q}'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L_{22}\sigma_2} \left[ k_{2z}(u\mathcal{Q}_{1b} - i\mathcal{Q}_{1b}R_{21}) + \left[ i\mathcal{Q}'_{2b}R_{22} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{21}(i\mathcal{Q}_{1c} - i\mathcal{Q}_{1a}) + L_{21}(i\mathcal{Q}'_{2c} - i\mathcal{Q}'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{d\mathcal{Q}'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L_{22}\sigma_2} \left[ k_{2z}(u\mathcal{Q}_{1c} - i\mathcal{Q}_{1c}R_{21}) + \left[ i\mathcal{Q}'_{2c}R_{22} + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L_{21}(i\mathcal{Q}_{1a} - i\mathcal{Q}_{1b}) + L_{21}(i\mathcal{Q}'_{2a} - i\mathcal{Q}'_{2b})) \right] \right]. \tag{2.33}
\end{aligned}$$

Первые три уравнения описывают электромагнитные процессы в обмотке статора первой асинхронной машины, следующие три – в обмотке ротора этой же машины. Последние шесть уравнений описывают электромагнитные процессы соответственно в обмотках ротора и статора второй асинхронной машины. Седьмое уравнение данной системы является уравнением движения двух механически связанных роторов [227, 246].

В представленной системе уравнений (2.33) имена переменных и параметров, оканчивающиеся на большие цифры «1» и «2» относятся соответственно к первой или второй асинхронной машине. В приведенной системе уравнений использованы следующие обозначения: фазные напряжения, подведенные к обмоткам статора первой и второй машин  $u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}, u_{2a}, u_{2b}, u_{2c}$ , активные сопротивления фазных обмоток статора асинхронных машин  $R_{11}$  и  $R_{21}$ , приведенные сопротивления фазных обмоток ротора  $R'_{12}$  и  $R'_{21}$ , количество пар полюсов  $p$ , индуктивности фазных обмоток статора и ротора  $L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}$ , взаимные индуктивности  $L_{12}$  и  $L_{21}$ , коэффициенты  $k_{1r}, k_{1s}, k_{2r}, k_{2s}$ , коэффициенты рассеяния  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , токи статора первой и второй машины  $di_{1a}, di_{1b}, di_{1c}, di_{2a}, di_{2b}, di_{2c}$ , приведенные токи ротора первой и второй машины  $di'_{1a}, di'_{1b}, di'_{1c}, di'_{2a}, di'_{2b}, di'_{2c}$ , угловая скорость вращения ротора  $\omega$ . Седьмое уравнение системы (2.33) дополнительно включает механические параметры: суммарный момент инерции вращающейся системы  $J$ , суммарный момент потерь  $M_{\text{пот}}$  в двух асинхронных машинах.

Допущения, принятые при математическом моделировании:

- потери в ПЧ при расчете токов в ветвях схемы не учитываются;
- характеристика намагничивания сердечников асинхронных машин принята линейной;
- активное сопротивление обмоток не зависит от величины и частоты тока, который по ним протекает;
- не учитываются зависимость активных сопротивлений обмоток от их температуры [75].

Приведенная математическая модель (2.33) для пары асинхронных машин с общим валом позволяет получить следующие результаты:

- расчетным путем оценить энергоэффективность схемы взаимной нагрузки асинхронных машин;
- рассчитать токи в ветвях схемы, которые требуются для определения параметров элементов электротехнического комплекса для испытаний АМ;
- смоделировать пару асинхронных машин с общим валом как в статическом так и в динамическом режиме работы.

Пример расчета частоты вращения и электромагнитного момента с применением системы уравнений (2.33) при пуске пары асинхронных машин типа 5А номинальной мощностью 5,5 кВт приведен на рис. 2.12, 2.13. При решении си-

стемы дифференциальных уравнений (2.33) начальные значения неизвестных (токов и частоты вращения) задавались нулевыми.

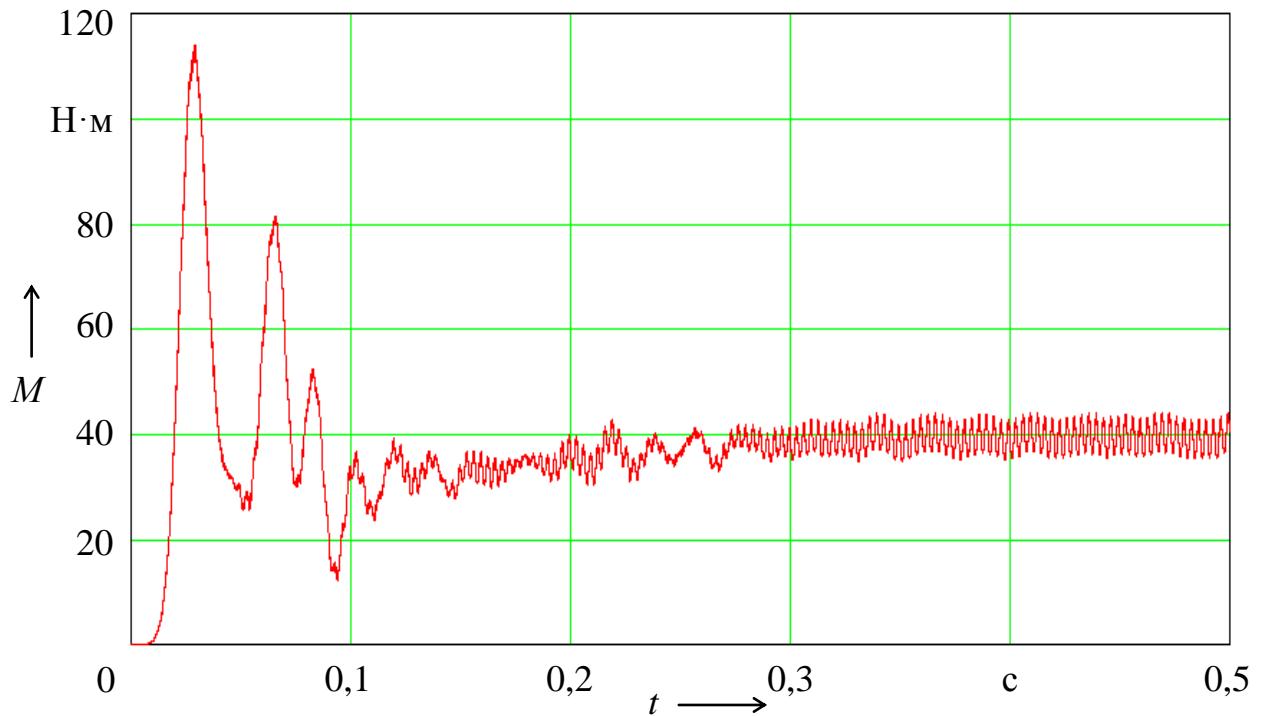


Рис. 2.12. Пример расчета электромагнитного момента асинхронного двигателя под номинальной нагрузкой

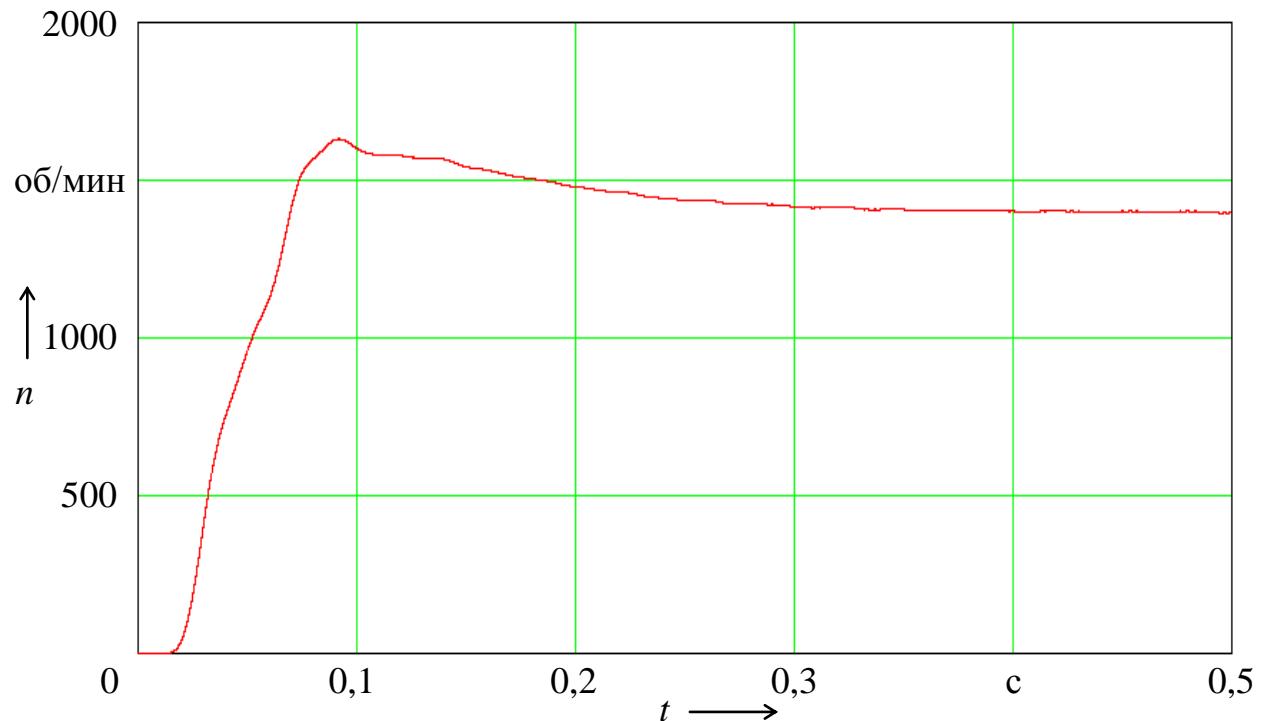


Рис. 2.13. Пример расчета частоты вращения роторов пары асинхронных машин при номинальной нагрузке на валу

Количество расчетных точек при математическом моделировании определялось путем их пошагового удвоения до тех пор, пока результаты средней мощности, потребляемой двигателем за расчетный период, не переставали изменяться на величину более 0,5 %. Указанным способом получено: при частоте ШИМ, равной 4кГц число расчетных точек – 100 тыс. Для снижения погрешности, обусловленной кратностью частоты ШИМ частоте дискретизации расчетного промежутка времени, количество расчетных точек принято равным простому числу 111109, не имеющему делителей. Данное число расчетных точек использовалось и в других вычислениях.

Для примера расчета принято увеличение частот напряжений, подаваемых на обмотки статора первой ( $f_1$ ) и второй машины ( $f_2$ ), в соответствии с кривыми, представленными на рис. 2.14.

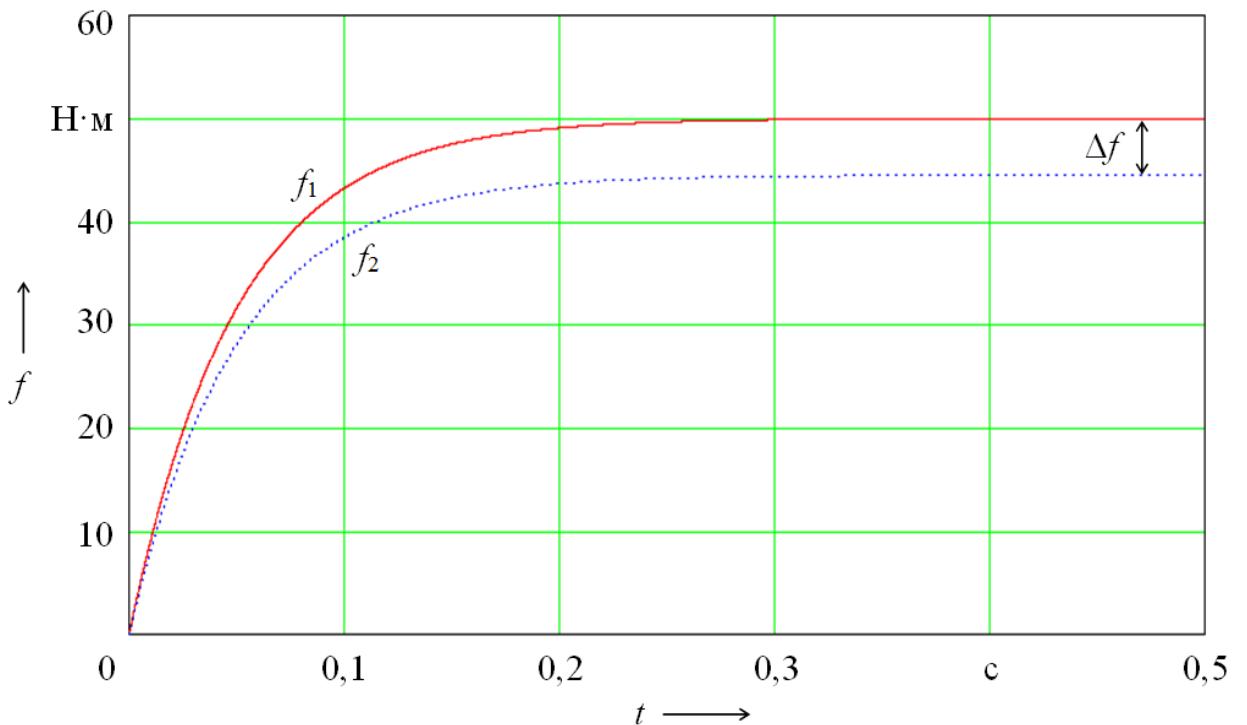


Рис. 2.14. Значения частоты напряжений, подаваемых на обмотки статора асинхронных машин при пуске

Для обеспечения плавного пуска нарастание амплитуд задающих сигналов обоих преобразователей частоты, задается аналогичным экспоненциальным законам.

## **2.4. Учет потерь при математическом моделировании взаимной нагрузки пары асинхронных машин**

Существуют методики, позволяющие определять потери в элементах схем испытания асинхронных машин методом взаимной. Данные методики предполагают выполнение измерений с последующим расчетом. Потери мощности в элементах электротехнического комплекса для испытаний ЭМ методом взаимной нагрузки, полученные расчетным путем, могут быть построены в виде функциональных зависимостей от мощности нагрузки [114].

Полученные таким образом функциональные зависимости потерь от нагрузки позволяют дополнить математическую модель электротехнического комплекса для испытаний асинхронных ЭМ (2.33), в которой отсутствует учет потерь в электронных компонентах силовой части схемы испытаний [153].

Уточненная указанным выше образом математическая модель электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин представлена в виде системы дифференциальных уравнений (2.34).

Система дифференциальных уравнений (2.34) по сравнению с системой (2.33) расширена за счет включения зависимостей потерь в выпрямителе и выпрямителе-инверторе от мощности машины, работающей в схеме в двигательном режиме. Данная модель позволяет более точно рассчитать мощность, потребляемую электротехническим комплексом, предназначенным для испытаний асинхронных машин.

Расчет мощности асинхронных машин, входящих в состав ЭТК, позволяет выполнить предварительную оценку потребляемой мощности. Полученное таким образом значение потребляемой мощности для ЭТК со схемой испытаний с нестандартным ПЧ (рис. 1.22) позволяет найти токи, протекающие по диодам неуправляемого выпрямителя.

Предварительная оценка значения мощности электротехнического комплекса, позволяет в процессе его проектирования определить характеристики коммутационных аппаратов, электроизмерительных и защитных приборов.

В соответствии с выбранной схемой силовой части электротехнического комплекса для испытаний ТЭМ осуществляется сборка измерительной части схемы, определяются потери мощности в элементах схемы, строятся их зависимости от нагрузки, по которым в последующем определяют их значения по мощности, измеренной на соответствующем участке схемы испытаний.

$$\begin{aligned}
\frac{dI_{1a}}{dt} &= \frac{1}{L_1\sigma_1} \left[ uI_{1a} - iI_{1a}Rl_1 + k_1 \left[ iI'_{2a}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI_{1b} - iI_{1c}) + Ll_2(iI'_{2b} - iI'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{dI_{1b}}{dt} &= \frac{1}{L_1\sigma_1} \left[ uI_{1b} - iI_{1b}Rl_1 + k_1 \left[ iI'_{2b}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI_{1c} - iI_{1a}) + Ll_2(iI'_{2c} - iI'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{dI_{1c}}{dt} &= \frac{1}{L_1\sigma_1} \left[ uI_{1c} - iI_{1c}Rl_1 + k_1 \left[ iI'_{2c}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI_{1a} - iI_{1b}) + Ll_2(iI'_{2a} - iI'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{dI'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_1} \left[ k_1(uI_{1a} - iI_{1a}Rl_1) + \left[ iI'_{2a}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI_{1b} - iI_{1c}) + Ll_2(iI'_{2b} - iI'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{dI'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_1} \left[ k_1(uI_{1b} - iI_{1b}Rl_1) + \left[ iI'_{2b}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI_{1c} - iI_{1a}) + Ll_2(iI'_{2c} - iI'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{dI'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_1} \left[ k_1(uI_{1c} - iI_{1c}Rl_1) + \left[ iI'_{2c}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI_{1a} - iI_{1b}) + Ll_2(iI'_{2a} - iI'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{-p}{J\sqrt{3}} [Ll_{12}[iI_{1a}(iI'_{2b} - iI'_{2c}) + iI_{1b}(iI'_{2c} - iI'_{2a}) + iI_{1c}(iI'_{2a} - iI'_{2b})] + \dots \\
&\dots + Ll_{12}[iI'_{2a}(iI'_{2b} - iI'_{2c}) + iI'_{2b}(iI'_{2c} - iI'_{2a}) + iI'_{2c}(iI'_{2a} - iI'_{2b})]] - \frac{M_{\text{нор}}}{J} \text{sign}(\omega); \\
\frac{dI'_{2a}}{dt} &= \frac{1}{L_2\sigma_2} \left[ uI'_{2a} - iI'_{2a}Rl_2 + k_2 \left[ iI'_{2a}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI'_{2b} - iI'_{2c}) + Ll_2(iI'_{2b} - iI'_{2c})) \right] \right]; \quad (2.34) \\
\frac{dI'_{2b}}{dt} &= \frac{1}{L_2\sigma_2} \left[ uI'_{2b} - iI'_{2b}Rl_2 + k_2 \left[ iI'_{2b}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI'_{2c} - iI'_{2a}) + Ll_2(iI'_{2c} - iI'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{dI'_{2c}}{dt} &= \frac{1}{L_2\sigma_2} \left[ uI'_{2c} - iI'_{2c}Rl_2 + k_2 \left[ iI'_{2c}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI'_{2a} - iI'_{2b}) + Ll_2(iI'_{2a} - iI'_{2b})) \right] \right]; \\
\frac{dI'_{2a}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_2} \left[ k_2(uI'_{2a} - iI'_{2a}Rl_2) + \left[ iI'_{2a}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI'_{2b} - iI'_{2c}) + Ll_2(iI'_{2b} - iI'_{2c})) \right] \right]; \\
\frac{dI'_{2b}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_2} \left[ k_2(uI'_{2b} - iI'_{2b}Rl_2) + \left[ iI'_{2b}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI'_{2c} - iI'_{2a}) + Ll_2(iI'_{2c} - iI'_{2a})) \right] \right]; \\
\frac{dI'_{2c}}{dt} &= \frac{-1}{L_2\sigma_2} \left[ k_2(uI'_{2c} - iI'_{2c}Rl_2) + \left[ iI'_{2c}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (Ll_{12}(iI'_{2a} - iI'_{2b}) + Ll_2(iI'_{2a} - iI'_{2b})) \right] \right]; \\
\Delta P_{\text{выпр}} &= f(P_c); \\
\Delta P_{\text{инв}} &= f(P_{AM}); \\
P_c &= \Delta P_{\text{инв1}} + \Delta P_{\text{инв2}} + \Delta P_{\text{выпр1}} + \Delta P_{\text{выпр2}} + P_{AM1} + P_{AM2}
\end{aligned}$$

## 2.5. Выводы по второму разделу

1. Сформирована совокупность математических моделей элементов электротехнического комплекса для испытаний электрических машин, включающая силовые электронные элементы, позволяющая выполнять анализ работы данных элементов в составе силовой части схемы ЭТК, что не рассматривалось в известных исследованиях.

2. Гармонический анализ напряжения на выходе преобразователя частоты, работающего от трехфазной сети с частотой 50 Гц, позволил выявить наличие гармоник с относительно высокой амплитудой, имеющих частоту близкую к отношению частоты задающего напряжения к частоте тока сети.

3. На основе математической модели пары асинхронных машин с жестко связанными валами получены результаты расчета процесса пуска пары асинхронных машин с учетом формы напряжения на выходе преобразователей частоты.

4. Обосновано необходимое количество расчетных точек при математическом моделировании работы пары электрических машин по схеме взаимной нагрузки с учетом формы напряжения на выходе преобразователей частоты.

### **3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ**

Математические модели (2.33), (2.34) пары асинхронных машин с общим валом позволяют рассчитать токи, протекающие по обмоткам машин, однако не дают представления о токах и напряжениях в остальных частях электротехнического комплекса, предназначенного для испытания этих машин. В процессе разработки электротехнического комплекса в целом необходимо иметь возможность рассчитывать электрические параметры во всех его частях, в том числе в электронных компонентах [154]. Математическая модель испытательного электротехнического комплекса должна включать в себя математические выражения, позволяющие рассчитать интересующие токи и напряжения во всех его составных частях.

Рассмотренные выше четыре типа схем испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки имеют как различающиеся, так и общие части. Следовательно, математические модели электротехнических комплексов будут иметь некоторые одинаковые расчетные формулы. В начале процесса разработки электротехнического комплекса необходимо иметь возможность определиться с выбором той или иной схемы, чему должен предшествовать расчет с обоснованием данного выбора по некоторому критерию.

Далее в тексте представлен подход к математическому моделированию электротехнических комплексов для испытаний асинхронных машин, позволяющий при их известных параметрах на первом этапе расчетным путем оценить энергоэффективность различных вариантов схем испытания с целью обоснования выбора того или иного варианта схемы и далее сформировать систему уравнений, описывающих соответствующий электротехнический комплекс.

Приведены математические модели электротехнических комплексов, полученные в общем виде. Первая из них приведена наиболее полно, для последующих приведены только отличия. При описании общих частей математических моделей даны ссылки на формулы, приведенные ранее. Выполнены и проиллюстрированы временными диаграммами результаты математического моделирования работы испытуемого двигателя в установившемся режиме с номинальной нагрузкой. Данные расчеты в п. 3.2 (кроме п.п. 3.2.5, где рассмотрены четырехфазные тяговые двигатели электровоза 2ЭС10), выполнены для асинхронных двигателей типа 5А [66]. Параметры схемы замещения машин найдены по методике, приведенной в [186].

### **3.1. Разработка показателей энергоэффективности электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки**

Разработка современных технических систем не возможна без учета их энергоэффективности, отражающей соотношение выполненной работы к затраченной на нее энергии. Если полезную работу установки или устройства можно измерить в единицах энергии (Джоулях) энергоэффективность можно считать тождественной коэффициенту полезного действия, измеряемому в относительных единицах или процентах. В других случаях, например, когда результатом работы установки является, некоторая продукция, энергоэффективность можно охарактеризовать количеством энергии, затраченной на единицу выпущенной продукции. Однако недостатком такой характеристики является наличие размерности, что не позволяет адекватно сравнить энергоэффективность установок с различной выпускаемой продукцией или однотипной продукцией, но с различными параметрами. Именно таким случаем является процесс проведения испытаний электрических машин. Электротехнические комплексы с рассмотренными в предыдущих разделах вариантами схем в качестве полезной работы на выходе имеют выполненные испытания электрических машин, измеряемые в единицах (штуках) проведенных испытаний. Ниже приведено сопоставление показателей энергоэффективности различных схем испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки путем анализа состава их оборудования и суммарных потерь в каждой из рассмотренных ранее схем. Кроме того предложены количественные показатели энергоэффективности схем испытания и осуществлен примерный расчет предложенных показателей энергоэффективности различных схем, предназначенных для испытания асинхронных машин малой, средней и большой мощности.

#### ***3.1.1. Сравнение энергоэффективности различных схем испытаний, исходя из состава их оборудования***

Рассмотрим схему испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки, изображенную на рис. 1.18, в составе которой имеется один преобразователь частоты (ПЧ), состоящий из двух управляемых выпрямитель-инверторов [115]. Данная схема позволяет осуществить обмен электрической энергией, выработанной генератором через сеть.

Мощность, потребляемая данной схемой при номинальном режиме работы испытуемого АД, может быть найдена из следующего выражения:

$$P_c = P_h - P_h \eta_h \eta_g + 2\Delta P_{inv}(P_g), \quad (3.1)$$

где  $P_h$  – номинальная мощность испытуемого АД;

$\eta_h$  – номинальный КПД испытуемого АД;

$\eta_g$  – КПД нагрузочного генератора при номинальной нагрузке испытуемого асинхронного двигателя;

$P_h \eta_h \eta_g$  – мощность, вырабатываемая нагрузочным генератором;

$\Delta P_{inv}(P_g)$  – зависимости средних потерь в выпрямителях-инверторах от проходящей по ним мощности  $P_g$ , вырабатываемой нагрузочным генератором, при номинальной нагрузке испытуемого асинхронного двигателя.

Схема испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки, изображенная на рис. 1.21, имеет в своем составе два преобразователя частоты [113]. Данная схема позволяет осуществить обмен выработанной генератором электрической энергией через звенья постоянного тока по шине постоянного тока (ШПТ).

Для представленной данной схемы будет справедливо следующее выражение для расчета электрической мощности:

$$P_c = P_h - P_h \eta_h \eta_g + \Delta P_{inv}(P_h) + \Delta P_{inv}(P_g) + 2\Delta P_{ вып} \left( \frac{P_c}{2} \right), \quad (3.2)$$

где  $\Delta P_{ вып} \left( \frac{P_c}{2} \right)$  – потери в выпрямителе, при прохождении по нему половины мощности, потребляемой схемой испытаний из сети;

$\Delta P_{inv}(P_h)$  – потери в управляемом инверторе от прохождения по нему номинальной мощности испытуемого АД.

Рассмотрим схему испытания АМ методом взаимной нагрузки, изображенную на рис. 1.22, в составе которой имеется один выпрямитель и два управляемых инвертора [116]. Данная схема позволяет осуществить обмен электрической энергией, выработанной генератором через звено постоянного тока.

В соответствии с данной схемой (см. рис. 1.22) может быть записано выражение для расчета электрической мощности, потребляемой из сети в следующем виде:

$$P_c = P_h - P_h \eta_h \eta_g + \Delta P_{ вып}(P_c) + \Delta P_{inv}(P_h) + \Delta P_{inv}(P_g), \quad (3.3)$$

где  $\Delta P_{\text{вып}}(P_c)$  – потери в выпрямителе от прохождения по нему всей мощности, потребляемой схемой.

Схема испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки, в составе которой имеется один преобразователь частоты для питания испытуемого асинхронного двигателя и генератор постоянного тока (ГПТ) для создания момента нагрузки на валу [122], изображена на рис. 1.24. Данная схема позволяет осуществить обмен электрической энергией, выработанной ГПТ через звено постоянного тока.

Мощность, потребляемая схемой данного типа из сети, может быть найдена по выражению:

$$P_c = P_h - P_h \eta_h \eta_{\text{ГПТ}} + \Delta P_{\text{иНВ}}(P_h) + \Delta P_{\text{вып}}(P_c) + \Delta P_d(P_{\text{ГПТ}}), \quad (3.4)$$

где  $\eta_{\text{ГПТ}}$  – КПД нагрузочного генератора постоянного тока при номинальной нагрузке испытуемого асинхронного двигателя;

$\Delta P_{\text{вып}}(P_c)$  – потери в неуправляемом выпрямителе на входе схемы от прохождения по нему мощности, потребляемой из сети;

$\Delta P_d(P_{\text{ГПТ}})$  – потери в диоде в цепи обмотки якоря от прохождения по нему мощности, вырабатываемой нагрузочным генератором постоянного тока.

Рассмотрим также для сравнения схему испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки, в составе которой имеется один ПЧ для питания испытуемого АД [13], изображенную на рис. 1.17. Данная схема позволяет осуществить обмен электрической энергией, выработанной генератором, по трехфазной сети.

Мощность, потребляемая данной схемой из сети, может быть определена по следующему выражению:

$$P_c = P_h - P_h \eta_h \eta_\Gamma + \Delta P_{\text{вып}}(P_h) + \Delta P_{\text{иНВ}}(P_h). \quad (3.5)$$

Следует отметить, что приведенная на рис. 1.17 схема позволяет испытывать асинхронного двигателя только при частоте напряжения, подаваемого на его обмотку статора, строго определенного значения, которое выше 50 Гц. Совпадение номинального значения частоты напряжения питания испытуемого асинхронного двигателя  $f_h$  с частотой напряжения на выходе преобразователя частоты  $f_{\text{ПЧ} h}$ , необходимой для обеспечения его номинальной нагрузки, имеет малую вероятность.

Большая часть формул для расчета мощности, потребляемой схемой испытаний, содержит следующую общую часть:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{H}} - P_{\text{H}} \eta_{\text{H}} \eta_{\Gamma} + 2\Delta P_{\text{инв}}(P_{\Gamma}). \quad (3.6)$$

Для упрощения анализа уравнений примем допущение равенства потерь в инверторе при прохождении по нему мощности  $P_{\text{H}}$  и  $P_{\Gamma}$ :

$$\Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{H}}) = \Delta P_{\text{инв}}(P_{\Gamma}). \quad (3.7)$$

Сведем в таблицу 3.1 обобщенную информацию по основным схемам испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки и разность  $(P_{\text{c}} - P_{\text{общ}})$  с учетом принятого в (3.7) допущения [148].

Таблица 3.1

Эксплуатационные особенности схем испытания асинхронных машин

Номер рисунка	Тип схемы	Источник питания испытуемого двигателя в схеме	Значение разности $(P_{\text{c}} - P_{\text{общ}})$
1.18	1	Управляемый выпрямитель-инвертор	0
1.21	2	Сеть с синусоидальным напряжением частотой 50 Гц	$2\Delta P_{\text{вып}}\left(\frac{P_{\text{c}}}{2}\right)$
1.22	3	Преобразователь частоты	$\Delta P_{\text{вып}}(P_{\text{c}})$
1.24	4	Управляемый выпрямитель-инвертор	$\Delta P_{\text{вып}}(P_{\text{c}}) - \Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{H}}) + \dots$ $\dots + \Delta P_{\text{д}}(P_{\text{ГПТ}}) + \dots$ $\dots + P_{\text{H}} \eta_{\text{H}} (\eta_{\Gamma} - \eta_{\text{ГПТ}})$
1.17	1	Преобразователь частоты	$\Delta P_{\text{вып}}(P_{\text{H}}) - \Delta P_{\text{инв}}(P_{\text{H}})$

Анализ разности мощностей  $(P_{\text{c}} - P_{\text{общ}})$ , полученной в пяти рассмотренных схемах, позволяет сделать следующие выводы.

Ввиду того, что потери в управляемом выпрямителе-инверторе как правило несколько больше, чем потери в выпрямителе такой же мощности, схема пер-

вого типа, приведенная на рис. 1.17 имеет меньшие потери, по сравнению со схемой первого типа, приведенной на рис. 1.18.

Схемы с 2 и 3-го типа имеют приблизительно равные потери, несколько большие, чем схемы 1-го типа.

В схеме 4-го типа дополнительно присутствуют относительно небольшие потери в диоде, включенном в цепь якоря нагрузочного генератора постоянного тока. При этом данная схема имеет на один управляемый инвертор меньше, чем схемы 2-го и 3-го типа и, следовательно, будет иметь потери близкие к схемам данных типов.

В выражении для  $(P_c - P_{\text{общ}})$  схемы 4-го типа физический смысл значения  $\eta_g$  – это КПД нагрузочной асинхронной машины, соответствующей мощности, работающей в генераторном режиме при номинальной нагрузке испытуемого асинхронного двигателя; такая асинхронная машина может быть применена в схемах остальных типов.

Основной отличительной чертой схем 4-го типа является то, что для определенного типа испытуемого двигателя может быть подобран такой нагрузочный ГПТ, при котором потери в схеме будут меньше, чем в схемах остальных типов, за счет отрицательного значения составляющей  $P_h \eta_h (\eta_g - \eta_{\text{ГПТ}})$ .

Однако следует учитывать, что при испытаниях асинхронных двигателей с другими параметрами, но с тем же нагрузочным ГПТ, суммарные потери установки будут расти за счет менее оптимального режима работы нагрузочного генератора и, как следствие, снижения его КПД [21, 74].

### *3.1.2. Разработка и расчет коэффициентов экономичности и затрат схем испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки*

Процесс проектирования электротехнического комплекса неразрывно связан с выполнением оценки экономической эффективности его внедрения, которая в большой степени определяется его энергетической эффективностью. Показатель энергетической эффективности, пригодный для применения проектировщиком, должен иметь понятный физический смысл и быть пригодным для численной оценки преимущества внедрения энергоэффективного оборудования по сравнению с аналогичными образцами техники.

Введем понятие коэффициента затрат испытательного комплекса, значение которого отражает долю электроэнергии, потребляемой из сети, по отношению к электроэнергии, потребляемой испытуемым двигателем:

$$K_{\text{затр}} = \frac{P_c}{P_1}, \quad (3.8)$$

где  $P_c$  – мощность, потребляемая испытательным комплексом из сети;

$P_1$  – мощность, потребляемая испытуемым двигателем.

Физический смысл коэффициента затрат – отношение электроэнергии, необходимой для испытания АД методом взаимной нагрузки, к электроэнергии, необходимой для испытания АД методом, не использующим возврата мощности, генерируемой нагрузочной машиной, для питания испытуемого двигателя. Чем ближе коэффициент затрат к значению  $K_{\text{затр}} = 1$ , тем меньшую энергетическую эффективность будет иметь испытательный комплекс, работающий по методу взаимной нагрузки.

Введем также понятие коэффициента экономичности испытательного комплекса, работающего по методу взаимной нагрузки (далее – коэффициент экономичности  $K_e$ ), позволяющего оценить разность между затрачиваемой на испытания электроэнергии с применением метода взаимной нагрузки и без него:

$$K_e = \frac{P_1 - P_c}{P_1}. \quad (3.9)$$

Данный параметр связан с величиной коэффициента затрат выражением:

$$K_e = 1 - K_{\text{затр}}. \quad (3.10)$$

Чем ближе коэффициент экономичности к значению  $K_e = 1$ , тем большей энергетической эффективностью будет обладать испытательный комплекс, работающий по методу взаимной нагрузки. Физический смысл коэффициента экономичности – это доля сэкономленной электроэнергии за счет применения метода взаимной нагрузки по сравнению с испытаниями, при которых нагрузочный генератор передает вырабатываемую энергию на реостат.

Для определения введенных коэффициентов необходимо определить состав мощности, потребляемой при испытаниях из сети.

Пара электрических машин, работающих по методу взаимной нагрузки, потребляет из электрической сети мощность, равную их суммарным потерям. Следовательно, электротехнический комплекс для испытания электрических машин по методу взаимной нагрузки будет потреблять из сети мощность, равную потерям во всех машинах и аппаратах, входящих в его состав [153]. При этом следует учитывать, что различные схемы взаимной нагрузки имеют различный состав оборудования. Рассмотрим две аналогичных по принципу действия схемы испытаний АМ методом взаимной нагрузки, приведенные на рис. 3.1 и 3.2.

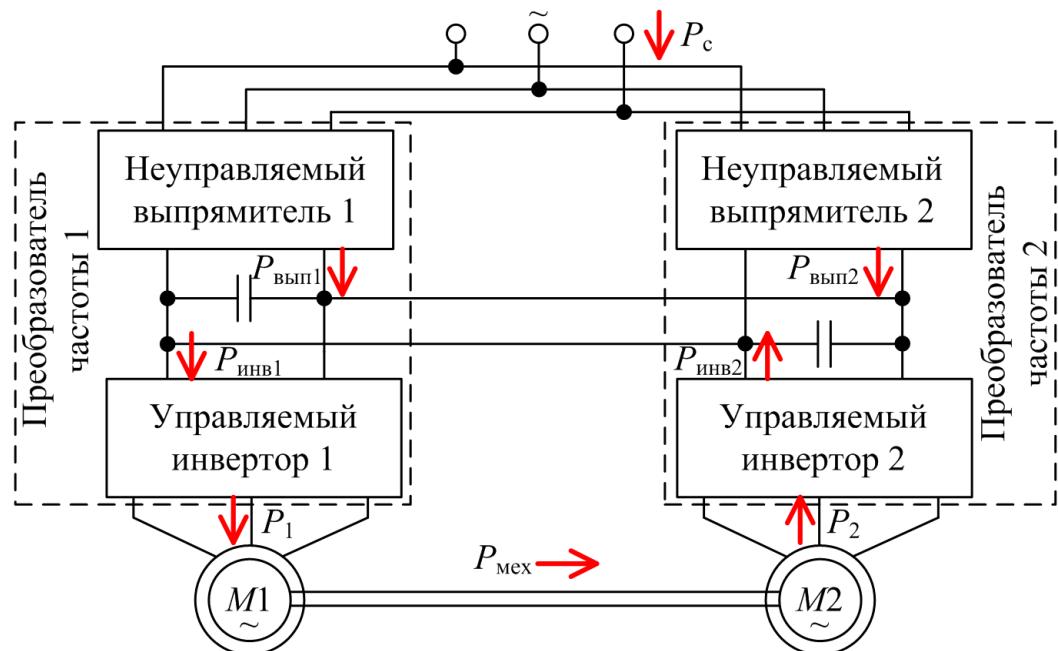


Рис. 3.1. Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с двумя параллельно включенными неуправляемыми выпрямителями

Запишем выражение для мощности, потребляемой из сети испытательным комплексом, составленным по любой из двух схем, приведенных на рис. 3.1 и 3.2 [113, 116]:

$$P_c = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_{\text{инв}1} + \Delta P_{\text{инв}2} + \Delta P_{\text{вып}}, \quad (3.11)$$

где  $\Delta P_1$  – потери мощности в испытуемом двигателе;

$\Delta P_2$  – потери мощности в нагрузочной машине;

$\Delta P_{\text{инв}1}$  – потери мощности в инверторе, подключенному к испытуемому двигателю;

$\Delta P_{\text{инв}2}$  – потери мощности в инверторе, подключенному к нагрузочной машине;

$\Delta P_{\text{вып}}$  – полные потери мощности в двух параллельно включенных выпрямителях при схеме по рис. 3.1 или в одном выпрямителе при схеме по рис. 3.2.

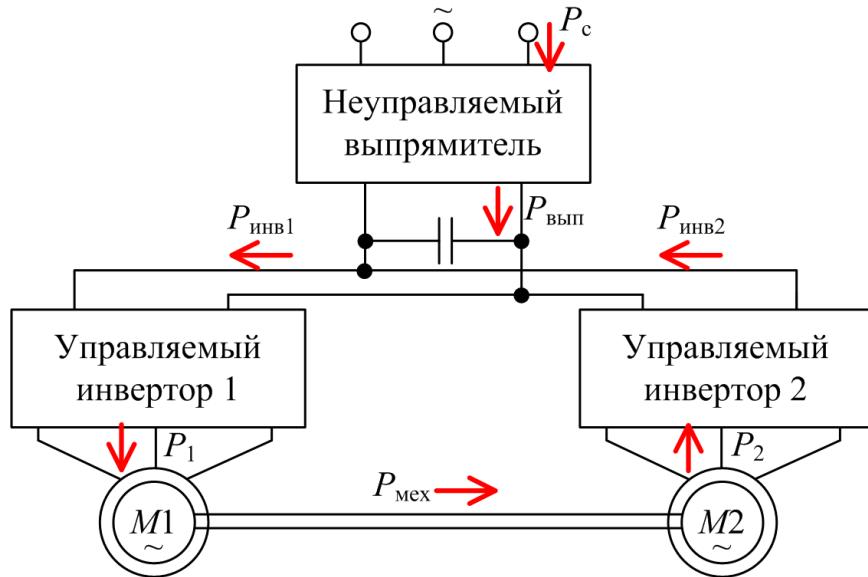


Рис. 3.2. Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с одним неуправляемым выпрямителем

На схемах, приведенных на рис. 3.1 и 3.2 обозначены мощности и направления их передачи по элементам схем.

Суммарные потери мощности в двух машинах, могут быть найдены в виде разности мощностей, потребляемой двигателем и вырабатываемой нагрузочной машиной:

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = P_1 - P_2, \quad (3.12)$$

где  $P_2$  – мощность, вырабатываемая нагрузочной машиной.

Мощность, вырабатываемая нагрузочной машиной

$$P_2 = P_{\text{мех}} \eta_2 = P_1 \eta_1 \eta_2, \quad (3.13)$$

где  $P_{\text{мех}}$  – механическая мощность, передаваемая по валу;

$\eta_1$  – коэффициент полезного действия испытуемого двигателя;

$\eta_2$  – коэффициент полезного действия нагрузочной машины.

После подстановок коэффициент затрат может быть записан в виде:

$$K_{\text{затр}} = \frac{P_1 - P_1\eta_1\eta_2 + \Delta P_{\text{инв1}} + \Delta P_{\text{инв2}} + \Delta P_{\text{вып}}}{P_1} = \dots \\ \dots = 1 - \eta_1\eta_2 + \frac{\Delta P_{\text{инв1}}}{P_1} + \frac{\Delta P_{\text{инв2}}}{P_1} + \frac{\Delta P_{\text{вып}}}{P_1}. \quad (3.14)$$

Коэффициент полезного действия инвертора, питающего испытуемый двигатель в рассматриваемых схемах:

$$\eta_{\text{инв1}} = \frac{P_1}{P_1 + \Delta P_{\text{инв1}}}, \quad (3.15)$$

отсюда можно записать

$$\frac{\Delta P_{\text{инв1}}}{P_1} = \frac{1}{\eta_{\text{инв1}}} - 1. \quad (3.16)$$

Коэффициент полезного действия инвертора, питающего нагрузочную машину в рассматриваемых схемах:

$$\eta_{\text{инв2}} = \frac{P_2 + \Delta P_{\text{инв2}}}{P_2}, \quad (3.17)$$

тогда справедливо равенство

$$\frac{\Delta P_{\text{инв2}}}{P_1} = \eta_1\eta_2(1 - \eta_{\text{инв2}}). \quad (3.18)$$

Общий коэффициент полезного действия выпрямителей можно найти из выражения:

$$\eta_{\text{вып}} = \frac{P_{\text{вып}}}{P_{\text{вып}} + \Delta P_{\text{вып}}}. \quad (3.19)$$

Тогда потери в выпрямителях могут быть выражены через их суммарную мощность и КПД следующим образом:

$$\Delta P_{\text{вып}} = P_{\text{вып}} \left( \frac{1}{\eta_{\text{вып}}} - 1 \right). \quad (3.20)$$

Суммарная мощность выпрямителей (в случае двух параллельно включенных выпрямителей  $P_{\text{вып}} = P_{\text{вып1}} + P_{\text{вып2}}$ , см. рис. 3.2) может быть определена как разность мощности потребляемой испытательным комплексом из сети и суммарных потерь в выпрямителях:

$$P_{\text{вып}} = P_1 - P_1 \eta_1 \eta_2 + \Delta P_{\text{инв1}} + \Delta P_{\text{инв2}}. \quad (3.21)$$

Подставив (6.21) в (6.20) и разделив на  $P_1$  получим:

$$\frac{\Delta P_{\text{вып}}}{P_1} = \left( \frac{1}{\eta_{\text{инв1}}} - \eta_1 \eta_2 \eta_{\text{инв2}} \right) \left( \frac{1}{\eta_{\text{вып}}} - 1 \right). \quad (3.22)$$

После подстановок (6.16), (6.18) и (6.22) в (6.14) получим:

$$K_{\text{затр}} = \eta_{\text{вып}}^{-1} \left( \eta_{\text{инв1}}^{-1} - \eta_1 \eta_2 \eta_{\text{инв2}} \right). \quad (3.23)$$

Тогда коэффициент экономичности:

$$K_e = 1 - \eta_{\text{вып}}^{-1} \left( \eta_{\text{инв1}}^{-1} - \eta_1 \eta_2 \eta_{\text{инв2}} \right). \quad (3.24)$$

Для схем с нагрузочной асинхронной машиной и одним ПЧ (первого типа) и с нагрузочным генератором постоянного тока (четвертого типа) в предыдущих выражениях будет отсутствовать  $\eta_{\text{инв2}}$ .

Полученные выражения (3.23) и (3.24) для определения коэффициентов затрат и экономичности, позволяют рассчитать их значения исходя из КПД всех устройств, входящих в состав испытательного комплекса.

Для расчета по выражению (3.24) возможных значений коэффициента экономичности для номинального режима нагрузки примем значения КПД электрических машин из справочной литературы [66]. В зависимости от серии (4А, АИР, 5А, 6А), числа пар полюсов и других параметров асинхронные машины при одинаковых значениях номинальной мощности имеют различные значения номинального КПД. Верхняя и нижняя границы диапазона значений номинального КПД серийных асинхронных двигателей, принятые в расчете, представлены на рис. 3.3.

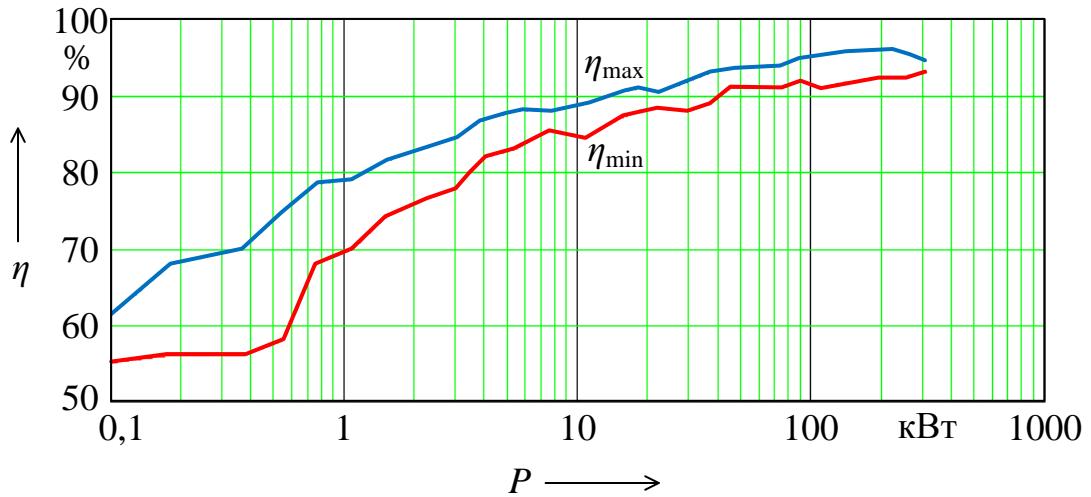


Рис. 3.3. Значения КПД серийных асинхронных двигателей, принятые в расчете коэффициента экономичности схем испытаний

Значения КПД испытуемого двигателя и нагрузочной машины будем полагать равными друг другу (т. е.  $\eta_1 = \eta_2$ ).

Исходя из экспериментальных данных, полученных на испытательной установке для машин номинальной мощностью  $P_1 = 0,75$  кВт, и оценок из общедоступных литературных источников приближенно приняты значения номинальных КПД выпрямителей и инверторов [153]. Принятые для расчета зависимости, приведены на рис. 3.4.

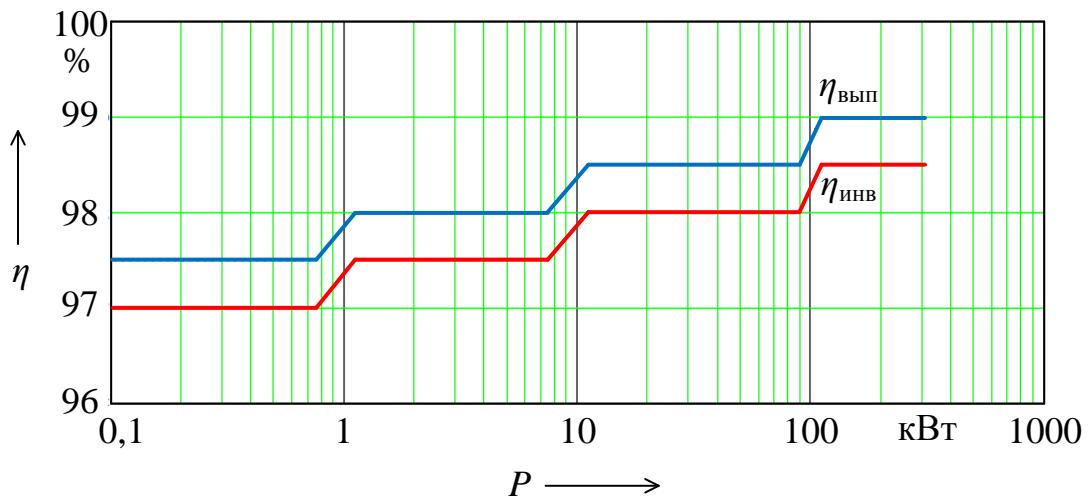


Рис. 3.4. Значения КПД выпрямителей, принятые в расчете коэффициента экономичности схем испытаний

Расчетный диапазон значений коэффициента экономичности ( $K_e$ ) для приведенных диапазонов значений номинальных КПД асинхронных двигателей приведен на рис. 3.5 (красные линии).

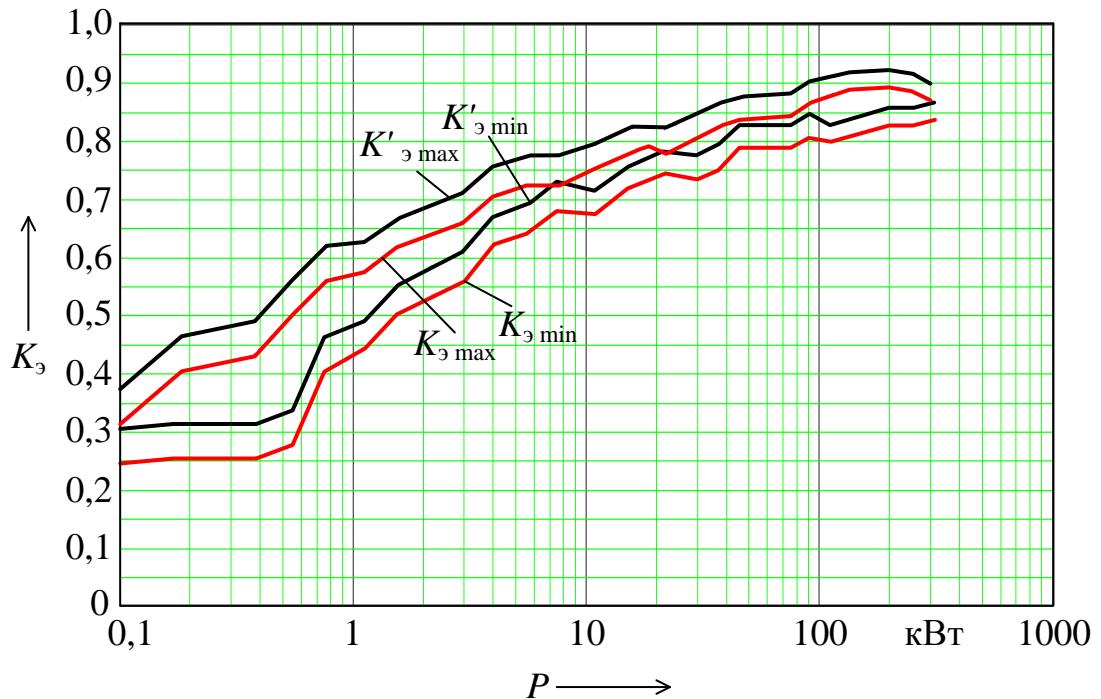


Рис. 3.5. Зависимости коэффициентов экономичности схем испытаний 2 и 3-го типа от номинальной мощности испытуемого двигателя

Для оценки влияния потерь в полупроводниковых преобразователях, входящих в состав испытательного комплекса, произведен расчет диапазона изменения коэффициента экономичности при значениях  $\eta_{\text{инв}1} = \eta_{\text{инв}2} = \eta_{\text{вып}} = 1$ . Полученные диапазоны значений коэффициента экономичности ( $K'_e$ ) приведены на рис. 3.5 (чёрные линии).

Выражение для расчета коэффициента экономичности без учета потерь в элементах преобразователей частоты принимает вид:

$$K'_e = \eta_1 \eta_2. \quad (3.25)$$

Данное выражение для расчета коэффициента экономичности является достаточно удобным для быстрой предварительной оценки энергетической эффективности испытательного комплекса.

Как показывает анализ полученных результатов расчета коэффициент экономичности схем испытаний возрастает с ростом номинальной мощности испытуемых машин по закону близкому к экспоненциальному с асимптотой в диапазоне от 0,9 до 1,0.

### *3.1.3. Сравнение энергоэффективности схем испытаний с асинхронной нагрузочной машиной и нагрузочным генератором постоянного тока*

Конкуренция схем испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки второго, третьего четвертого типа (см. разд. 1) обуславливает необходимость более подробного анализа различий параметров данных схем.

Схемы испытаний второго и третьего типов очень близки по составу оборудования – в том числе из-за того, что имеют в качестве нагрузочной асинхронную машину. Происходящие в этих схемах физические процессы во многом идентичны, что приводит к примерному равенству значений мощности, потребляемой ими из сети.

В связи с этим приоритет при выборе между схемами второго и третьего типа следует отдавать той, которая будет иметь меньшую стоимость и/или время внедрения, в зависимости от того, какой из факторов в конкретном случае является ограничивающим.

Выбор между типами схем, имеющими в качестве нагрузочной машины асинхронную или постоянного тока, следует осуществлять с учетом сравнения численных показателей их энергетической эффективности.

Для расчета возможных значений коэффициента затрат  $K_{\text{затр}}$  для номинального режима нагрузки примем значения КПД электрических машин из справочной литературы [66].

Рассмотрим результаты расчета коэффициента затрат схемы с нагрузочным асинхронным генератором (АГ) и схемы с нагрузочным генератором постоянного тока (ГПТ), приведенные на рис. 3.6.

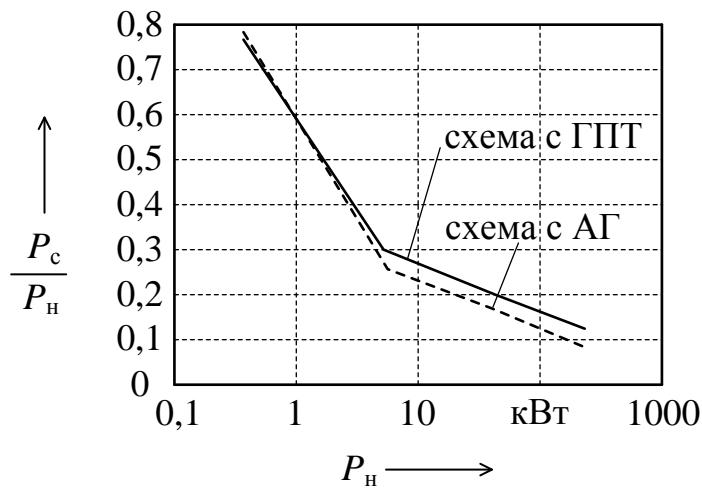


Рис. 3.6. Зависимости коэффициентов затрат схем испытаний с нагрузочным асинхронным генератором и генератором постоянного тока от номинальной мощности испытуемого двигателя

Анализ результатов данного расчета показывает, что при прочих равных условиях с ростом номинальной мощности испытуемого двигателя схема с нагрузочным АГ имеет относительно меньшее потребление мощности, чем схема с ГПТ.

Более наглядное сравнение энергетической эффективности схем дает рис. 3.7, на котором представлено во сколько раз суммарные потери в паре машин (испытуемая и нагрузочная) в схеме с нагрузочным генератором постоянного тока выше, чем те же потери в схеме с нагрузочным асинхронным генератором.

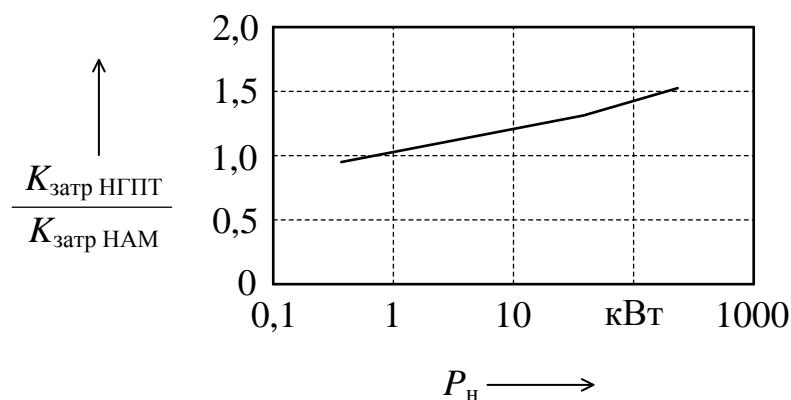


Рис. 3.7. Отношение коэффициентов затрат в электрических машинах схемы с нагрузочным генератором постоянного тока к потерям схемы с нагрузочной асинхронной машиной

Проведенный сравнительный анализ влияния на сеть комплексов испытаний асинхронных машин, применяющих метод взаимной нагрузки позволяет сделать следующие выводы. Испытательные комплексы с нагрузочным асинхронным генератором (схемы второго и третьего типов, см. разд. 1) при средних и больших номинальных мощностях испытуемых двигателей имеют меньшие потери в схеме, потребляют из сети меньшую мощность и, следовательно, обладают более высокой энергетической эффективностью.

### **3.2. Формирование математических моделей электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки**

Коэффициент экономичности позволяет выполнять предварительную оценку мощности, необходимой для питания электротехнического комплекса, исходя из параметров асинхронных машин, которые необходимо будет испытывать на данном оборудовании. Примерные данные о параметрах электронной части схемы испытаний могут быть получены из соответствующей справочной литературы или спецификаций производителей преобразователей. Данная мощность должна быть обеспечена питающей сетью, в установившемся режиме работы электрических машин. Мощность, необходимая в переходных режимах, будет зависеть от плавности регулирования и определять необходимый коэффициент запаса. Таким образом, выражения (3.23) и (3.24) могут быть применены для обоснования использования уже имеющейся на предприятии сети или для разработки и изготовления специальной сети для питания испытательного комплекса. То или иное решение в значительной степени определяет объем необходимых капитальных вложений на внедрение испытательного комплекса.

Выражения (3.23) и (3.24) являются основой для математического моделирования электротехнического комплекса, предназначенного для испытания асинхронных машин.

После принятия решения о типе схемы испытательного комплекса (с учетом исходных капитальных вложений и энергоэффективности) необходимо приступить к определению его основных технических параметров, определяемых токами и напряжениями в отдельных элементах.

*3.2.1. Математическая модель испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с двумя преобразователями частоты*

Изобразим схему соединений испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с двумя преобразователями частоты и указанием токов в ветвях схемы следующим образом, приведенным на рис. 3.8.

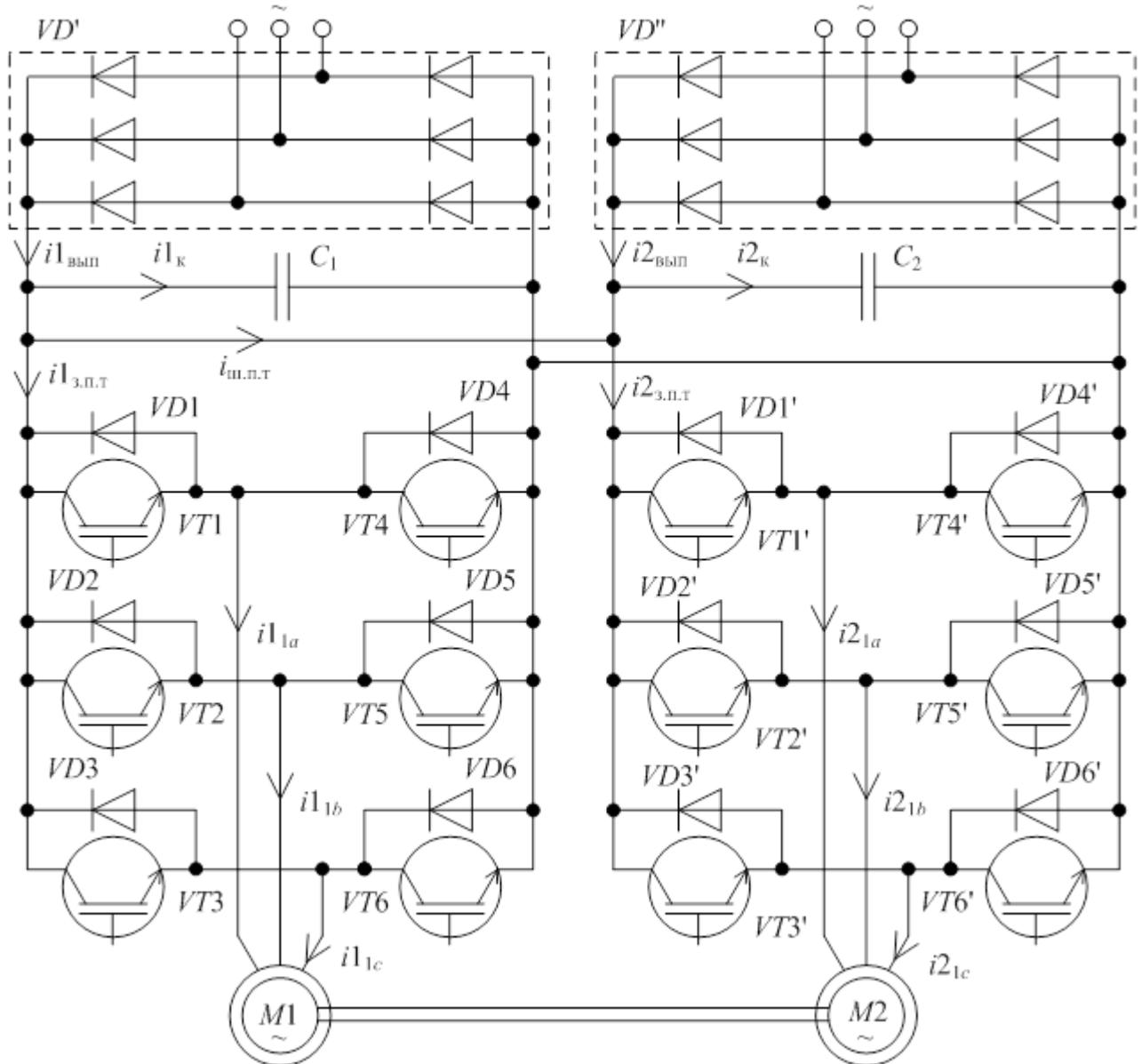


Рис. 3.8. Схема основных соединений испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с двумя преобразователями частоты

В приведенной схеме работа двух асинхронных машин описывается системой уравнений (2.33).

Временные диаграммы расчетных напряжений и токов в фазе «*a*» обмотки статора машины работающей в двигательном режиме, приведены на рис. 3.9, 3.10, в генераторном режиме – рис. 3.11, 3.12.

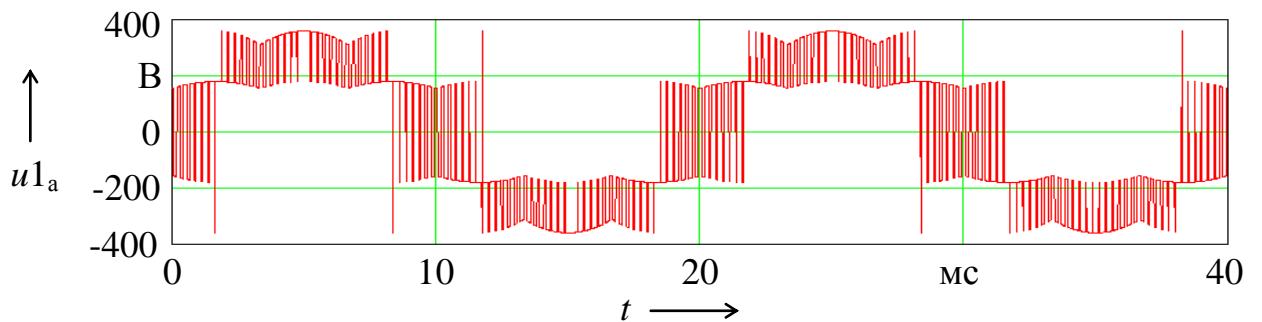


Рис. 3.9. Расчетное напряжение фазы «*a*» испытуемого двигателя

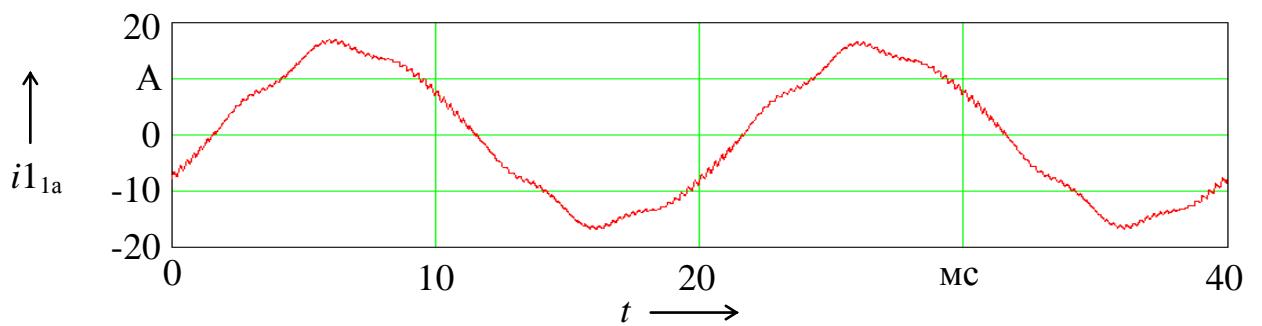


Рис. 3.10. Расчетный ток фазы «*a*» испытуемого двигателя

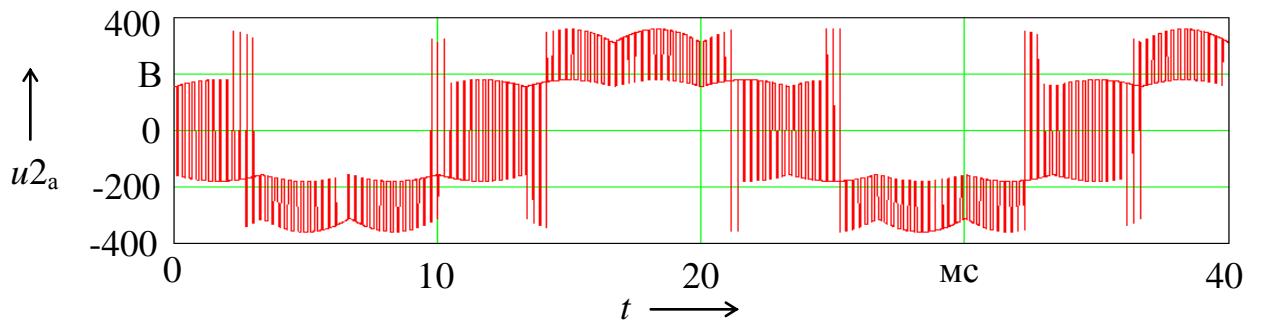


Рис. 3.11. Расчетное напряжение фазы «*a*» нагруженной машины

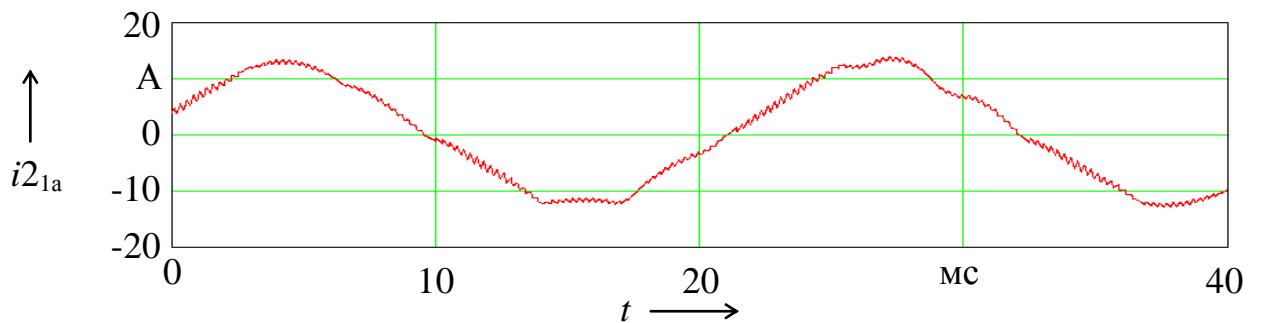


Рис. 3.12. Расчетный ток фазы «*a*» нагруженной машины

Система уравнений (2.33) должна быть дополнена уравнениями, описывающими физические процессы в преобразователе частоты.

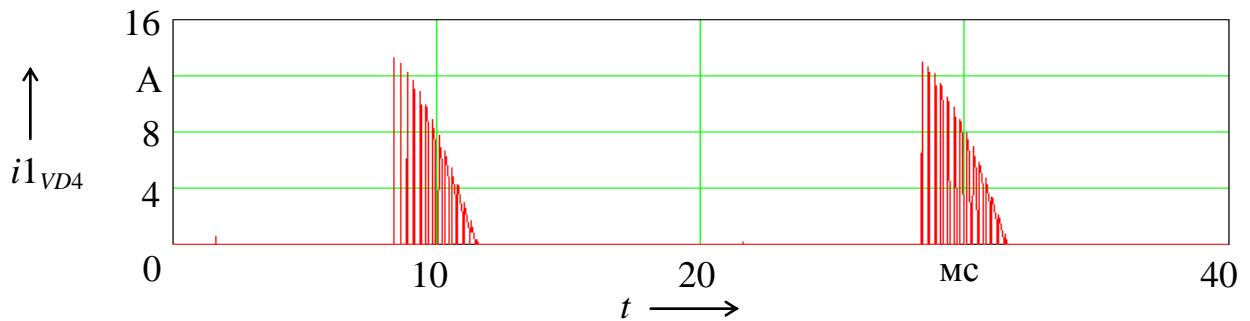
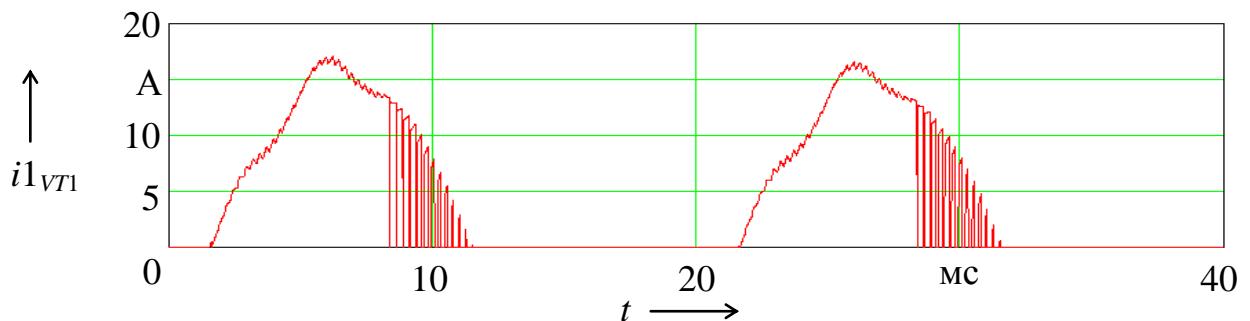
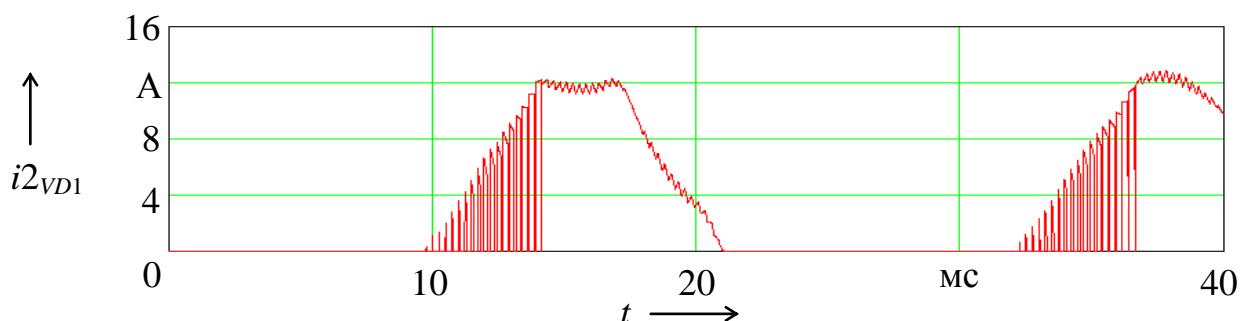
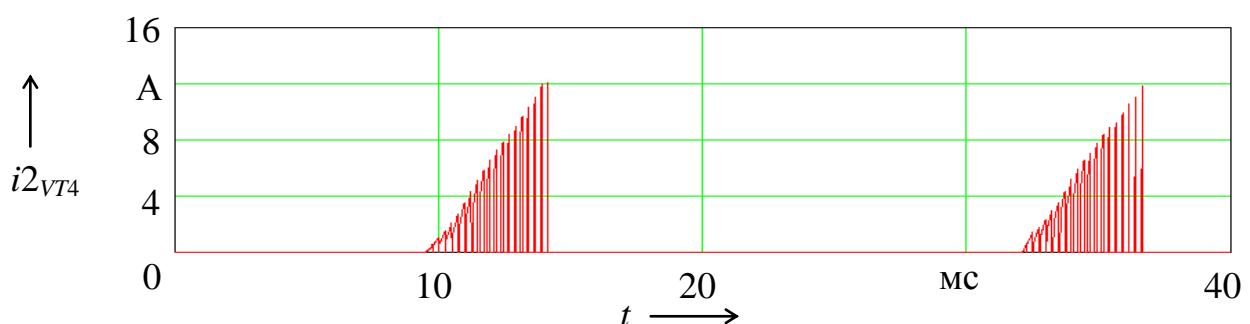
Токи в транзисторах, вентилях и в звене постоянного тока первого преобразователя частоты можно вычислить по уравнениям:

$$\left\{
 \begin{aligned}
 i1_{VT1} &= \begin{cases} i1_{1a}, & \text{если } (u1_{1a} > 0) \cap (i1_{1a} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VT2} &= \begin{cases} i1_{1b}, & \text{если } (u1_{1b} > 0) \cap (i1_{1b} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VT3} &= \begin{cases} i1_{1c}, & \text{если } (u1_{1b} > 0) \cap (i1_{1b} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VT4} &= \begin{cases} i1_{1a}, & \text{если } (u1_{1a} < 0) \cap (i1_{1a} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VT5} &= \begin{cases} i1_{1b}, & \text{если } (u1_{1b} < 0) \cap (i1_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VT6} &= \begin{cases} i1_{1c}, & \text{если } (u1_{1b} < 0) \cap (i1_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VD1} &= \begin{cases} i1_{1a}, & \text{если } (u1_{1a} > 0) \cap (i1_{1a} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VD2} &= \begin{cases} i1_{1b}, & \text{если } (u1_{1b} > 0) \cap (i1_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VD3} &= \begin{cases} i1_{1c}, & \text{если } (u1_{1b} > 0) \cap (i1_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VD4} &= \begin{cases} i1_{1a}, & \text{если } (u1_{1a} < 0) \cap (i1_{1a} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VD5} &= \begin{cases} i1_{1b}, & \text{если } (u1_{1b} < 0) \cap (i1_{1b} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{VD6} &= \begin{cases} i1_{1c}, & \text{если } (u1_{1b} < 0) \cap (i1_{1b} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i1_{\text{з.п.т}} &= i1_{VT1} + i1_{VT2} + i1_{VT3} + i1_{VD1} + i1_{VD2} + i1_{VD3}.
 \end{aligned} \right. \quad (3.26)$$

Токи в транзисторах, вентилях и в звене постоянного тока второго преобразователя частоты определяются аналогично системе (3.26):

$$\begin{cases}
 i2_{VT1} = \begin{cases} i2_{1a}, & \text{если } (u2_{1a} > 0) \cap (i2_{1a} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VT2} = \begin{cases} i2_{1b}, & \text{если } (u2_{1b} > 0) \cap (i2_{1b} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VT3} = \begin{cases} i2_{1c}, & \text{если } (u2_{1c} > 0) \cap (i2_{1c} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VT4} = \begin{cases} i2_{1a}, & \text{если } (u2_{1a} < 0) \cap (i2_{1a} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VT5} = \begin{cases} i2_{1b}, & \text{если } (u2_{1b} < 0) \cap (i2_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VT6} = \begin{cases} i2_{1c}, & \text{если } (u2_{1c} < 0) \cap (i2_{1c} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VD1} = \begin{cases} i2_{1a}, & \text{если } (u2_{1a} > 0) \cap (i2_{1a} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VD2} = \begin{cases} i2_{1b}, & \text{если } (u2_{1b} > 0) \cap (i2_{1b} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VD3} = \begin{cases} i2_{1c}, & \text{если } (u2_{1c} > 0) \cap (i2_{1c} < 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VD4} = \begin{cases} i2_{1a}, & \text{если } (u2_{1a} < 0) \cap (i2_{1a} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VD5} = \begin{cases} i2_{1b}, & \text{если } (u2_{1b} < 0) \cap (i2_{1b} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{VD6} = \begin{cases} i2_{1c}, & \text{если } (u2_{1c} < 0) \cap (i2_{1c} > 0); \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \\
 i2_{\text{з.п.т.}} = i2_{VT1} + i2_{VT2} + i2_{VT3} + i2_{VD1} + i2_{VD2} + i2_{VD3}. \tag{3.27}
 \end{cases}$$

Временные диаграммы расчетных токов в элементах выпрямителей-инверторов преобразователей частоты приведены на рис. 3.13 – 3.16.

Рис. 3.13. Расчетный ток диода  $VD4$  ПЧ1Рис. 3.14. Расчетный ток транзистора  $VT1$  ПЧ1Рис. 3.15. Расчетный ток диода  $VD1$  ПЧ2Рис. 3.16. Расчетный ток транзистора  $VT4$  ПЧ2

Суммарный ток, протекающий по звеньям постоянного тока,

$$i_{3.\text{п.т}} = i1_{3.\text{п.т}} + i2_{3.\text{п.т}}. \quad (3.28)$$

Обозначим суммарную емкость конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2. \quad (3.29)$$

Напряжения на конденсаторах определяются в зависимости от направления и величины тока  $i_{3.\text{п.т}}$  и скорости изменения разности напряжений на конденсаторах  $U_k$  и выходе выпрямителя  $u_{\text{вып}}$ :

$$\begin{cases} U_k = u_{\text{вып}}, \text{ если } i_{3.\text{п.т}} \geq 0; \\ dU_k = -\frac{i_{3.\text{п.т}} dt}{C}, \text{ если } i_{3.\text{п.т}} < 0. \end{cases} \quad (3.30)$$

Суммарный ток, протекающий по цепи обоих конденсаторов,

$$i_k = C \frac{dU_k}{dt}. \quad (3.31)$$

Ввиду того, что конденсаторы в рассматриваемой схеме (см. рис. 3.8) включены параллельно, токи, протекающие по каждому из них, можно считать равными половине суммарного тока, найденного по (3.31).

Суммарный ток, протекающий по выпрямителям,

$$i_{\text{вып}} = i_{3.\text{п.т}} + i_k. \quad (3.32)$$

Ввиду того, что выпрямители, как и конденсаторы, в рассматриваемой схеме (см. рис. 3.8) включены параллельно, токи, протекающие по каждому из них, можно так же считать равными половине суммарного тока, найденного по (3.32).

Ток, протекающий по общей шине постоянного тока, определяется по формуле:

$$i_{\text{ш.п.т}} = \frac{i_{\text{вып}} - i_k}{2} - i1_{3.\text{п.т}}. \quad (3.33)$$

Временные диаграммы расчетного напряжения на конденсаторе, а также суммарного тока конденсаторов, суммарного тока выпрямителей и тока в ШПТ приведены на рис. 3.17 – 3.20.

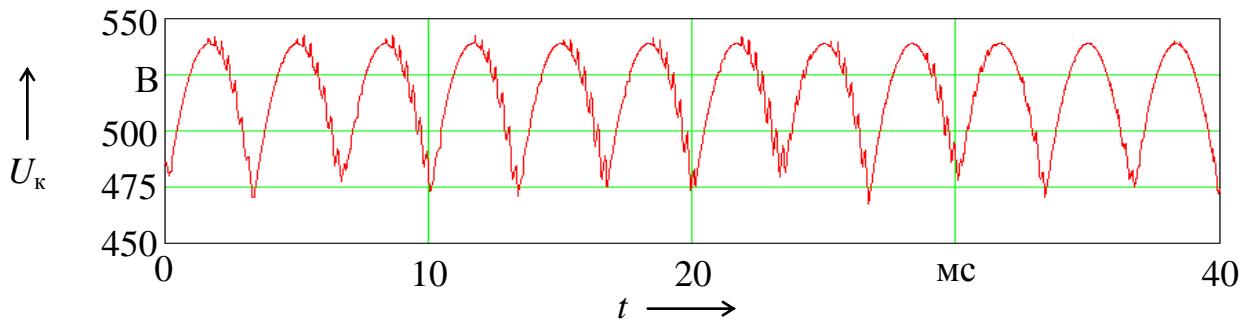


Рис. 3.17. Расчетное напряжение на конденсаторе

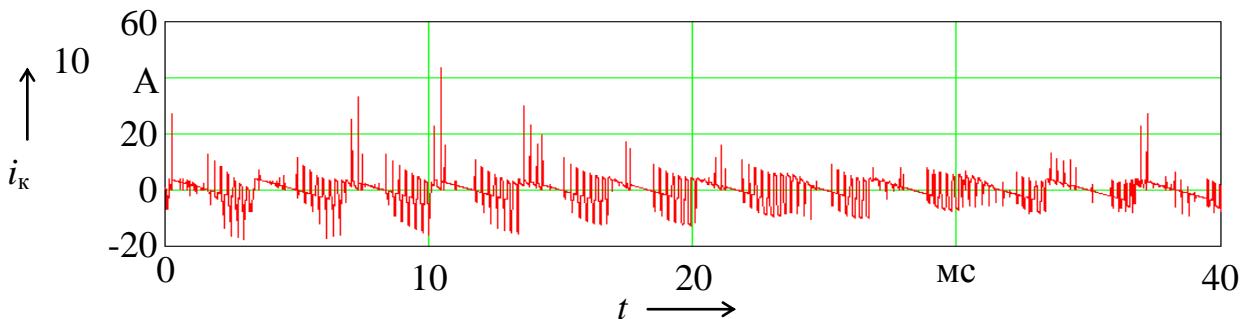


Рис. 3.18. Расчетный суммарный ток конденсаторов

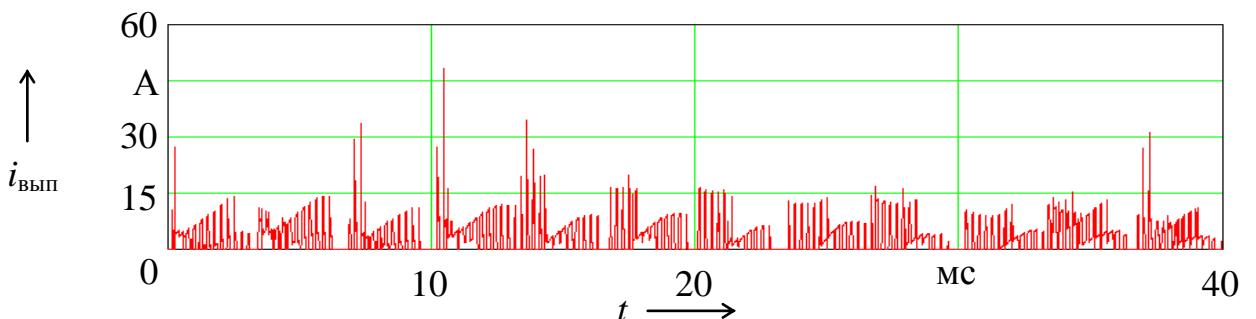


Рис. 3.19. Расчетный суммарный ток выпрямителей

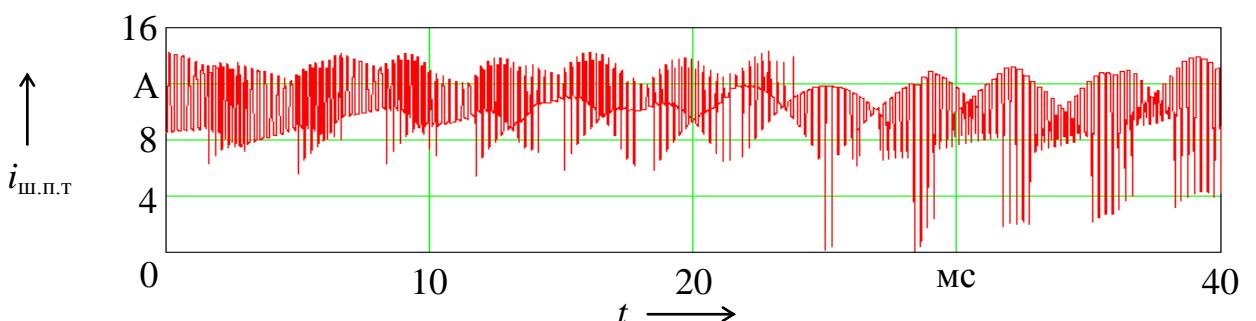


Рис. 3.20. Расчетный ток общей шины постоянного тока

Таким образом, полная математическая модель для приведенной на рис. 3.8 схемы состоит из следующих уравнений: для пары асинхронных машин (2.33), неуправляемого выпрямителя (2.2), пилообразного напряжения в СУ ПЧ (2.4), за-

дающих напряжений в СУ ПЧ (2.5) – (2.7), напряжений на выходе ПЧ, подаваемых на АМ1 (2.8) – (2.10), токов в транзисторах, вентилях выпрямителей-инверторов и в ЗПТ (3.26), (3.27), суммарного тока в ЗПТ (3.28), суммарной емкости (3.29), напряжения на конденсаторах (3.30), суммарного тока, протекающего по конденсаторам (3.31), суммарного тока на выходе выпрямителей (3.32), тока в ШПТ (3.33).

Данная математическая модель может быть расширена при необходимости учета потерь мощности в элементах преобразователя частоты по результатам соответствующих измерений путем замены системы (2.33) на (2.34).

### *3.2.2. Математическая модель испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – генератор постоянного тока»*

Схема соединений испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – генератор постоянного тока» с указанием токов в ветвях схемы имеет вид, приведенный на рис. 3.21 [122]. На приведенной схеме механически соединены валы асинхронного двигателя и нагружочного ГПТ с независимым возбуждением [199].

Математическая модель ГПТ с независимым возбуждением может быть записана в виде следующей системы из двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_a} \left( u_{\text{вып}} - I_a \Sigma R_a - \omega \Phi^* \frac{U_h}{\omega_h} \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\text{гпт}}} \left( I_a \Phi^* \frac{M_h}{I_{ah}} - M_b \right), \end{cases} \quad (3.34)$$

где  $I_a$  – ток якоря;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора;

$\Sigma L_a$ ,  $\Sigma R_a$  – суммарные индуктивность и сопротивление цепи якоря нагружочного генератора постоянного тока (НГПТ);

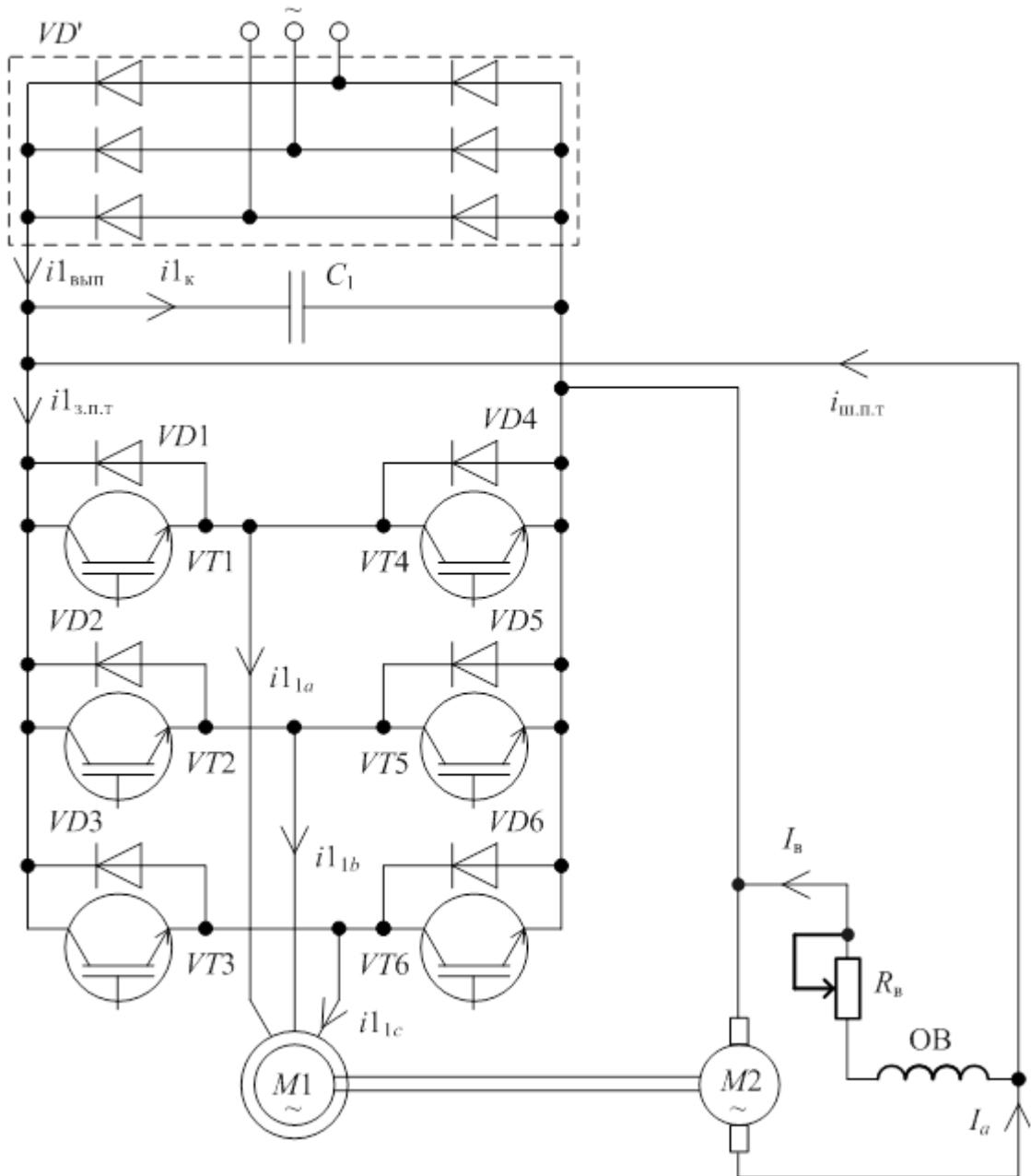


Рис. 3.21. Схема основных соединений испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – генератор постоянного тока»

$J_{\text{гпт}}$  – момент инерции НГПТ;

$U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение НГПТ;

$\omega_{\text{н}}$  – номинальная угловая скорость вращения ротора НГПТ;

$M_{\text{н}}$  – номинальный момент НГПТ;

$I_{a\text{н}}$  – номинальный ток якоря НГПТ;

$\Phi^*$  – отношение значения основного магнитного потока НГПТ к номинальному значению потока;

$M_{\text{в}}$  – внешний вращающий момент (при отрицательном значении становится моментом сопротивления вращению).

При этом для учета насыщения магнитопровода в системе уравнений (3.34) величина  $\Phi^*$  может быть задана в виде зависимости  $\Phi^* = f(I_{\text{в}}^*)$  от тока возбуждения, выраженного волях от его номинального значения.

Дополнив математическую модель асинхронного двигателя, содержащуюся в первых шести уравнениях системы (2.33), системой (3.34) и задавшись зависимостью  $\Phi^* = f(I_{\text{в}}^*)$  и выражением, отражающим механическую связь валов машин, получим следующую математическую модель для системы «асинхронный двигатель – генератор постоянного тока»:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{1a}}{dt} = \frac{1}{L_1\sigma_1} \left[ u_{1a} - iI_{1a}Rl_1 + kI_r \left[ iI'_{2a}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(iI_{1b} - iI_{1c}) + L_{12}(iI'_{2b} - iI'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{dI_{1b}}{dt} = \frac{1}{L_1\sigma_1} \left[ u_{1b} - iI_{1b}Rl_1 + kI_r \left[ iI'_{2b}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(iI_{1c} - iI_{1a}) + L_{12}(iI'_{2c} - iI'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{dI_{1c}}{dt} = \frac{1}{L_1\sigma_1} \left[ u_{1c} - iI_{1c}Rl_1 + kI_r \left[ iI'_{2c}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(iI_{1a} - iI_{1b}) + L_{12}(iI'_{2a} - iI'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{dI'_{2a}}{dt} = \frac{-1}{L_2\sigma_1} \left[ kI_s(u_{1a} - iI_{1a}Rl_1) + \left[ iI'_{2a}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(iI_{1b} - iI_{1c}) + L_{12}(iI'_{2b} - iI'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{dI'_{2b}}{dt} = \frac{-1}{L_2\sigma_1} \left[ kI_s(u_{1b} - iI_{1b}Rl_1) + \left[ iI'_{2b}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(iI_{1c} - iI_{1a}) + L_{12}(iI'_{2c} - iI'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{dI'_{2c}}{dt} = \frac{-1}{L_2\sigma_1} \left[ kI_s(u_{1c} - iI_{1c}Rl_1) + \left[ iI'_{2c}Rl'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}} (L_{12}(iI_{1a} - iI_{1b}) + L_{12}(iI'_{2a} - iI'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{-L_{12}p}{(J_{\text{гпт}} + J)\sqrt{3}} [iI_{1a}(iI'_{2b} - iI'_{2c}) + iI_{1b}(iI'_{2c} - iI'_{2a}) + iI_{1c}(iI'_{2a} - iI'_{2b})] + \dots \\ \dots + \frac{-I_a\Phi^*M_{\text{в}}}{I_{\text{ах}}(J_{\text{гпт}} + J)} - \frac{M_{\text{нот}}}{(J_{\text{гпт}} + J)} \text{sign}(\omega); \\ \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{\Sigma I_a} \left( -u_{\text{вып}} - I_a \sum R_a + \omega \Phi^* \frac{U_{\text{в}}}{\omega_{\text{нпт}}} \right); \\ \Phi^* = f(I_{\text{в}}^*), \end{array} \right. \quad (3.35)$$

где  $\omega_{\text{нпт}}$  – номинальная угловая частота вращения нагружочного генератора;

$J_{\text{гпт}}$  – момент инерции нагружочного генератора;

$\Phi^* = f(I_{\text{в}}^*)$  – аппроксимация кривой намагничивания нагружочной машины постоянного тока;

$$I_{\text{в}}^* = \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{вн}}} - \text{отношение тока возбуждения к его номинальному значению.}$$

Изменяя в математической модели значение тока возбуждения  $I_{\text{в}}^*$ , получим режим нагрузки испытуемого асинхронного двигателя с различной механической мощностью на выходе.

Токи в транзисторах, вентилях и в звене постоянного тока первого преобразователя частоты могут быть определены исходя из системы уравнений (3.26).

Токи в цепях схемы рассчитываются по формулам:

$$i_{\text{ш.п.т}} = I_a - I_{\text{в}}; \quad (3.36)$$

$$i_{\text{з.п.т}} = i_{\text{л.п.т}} - i_{\text{ш.п.т}}. \quad (3.37)$$

Напряжение на конденсаторе и токи, протекающие по конденсатору и выпрямителю, могут быть определены по выражениям (3.30) – (3.32).

Таким образом, полная математическая модель для приведенной на рис. 3.21 схемы состоит из следующих уравнений: неуправляемого выпрямителя (2.2), пилообразного напряжения в СУ ПЧ (2.4), задающих напряжений в СУ ПЧ (2.5) – (2.7), напряжений на выходе ПЧ, подаваемых на АМ1 (2.8) – (2.10), токов в транзисторах, вентилях выпрямителя-инвертора и в ЗПТ (3.26), напряжения на конденсаторе (3.30), тока, протекающего по конденсатору (3.31), тока на выходе выпрямителя (3.32), механически связанный системы «асинхронный двигатель – генератор постоянного тока» (3.35), тока в ШПТ (3.36), тока в ЗПТ (3.37).

### *3.2.3. Математическая модель испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» четырехфазного исполнения*

Все известные схемы испытаний ТЭМ методом взаимной нагрузки, рассматривают испытания трехфазных асинхронных двигателей. В их описаниях приводятся рисунки с трехфазными схемами, хотя в тексте описаний в формулах данных технических решений отсутствуют указания на количество фаз, и, следовательно, данные схемы можно обобщить и на четырехфазные двигатели. Двигатель электровоза 2ЭС10 имеет четыре фазы и рассчитан на питание от специального преобразователя (четырехфазного инвертора). Испытание подобных двигателей по методу непосредственной нагрузки представляется возможным осуществить с применением только одного из перечисленных технических решений,

приведенного в [122], т.к. остальные схемы предполагают питание двигателей от преобразователей частоты, а не от управляемых инверторов, как отдельных устройств. При этом по сравнению со схемой, приведенной на рисунке в источнике [122], схемы обоих инверторов необходимо дополнить плечами для формирования четвертой фазы. Упрощенный вид испытательного комплекса такого типа представлен на рис. 3.22. Четвертая фаза обозначена латинской буквой «*d*» в соответствии с обозначением, приведенным в Руководстве по эксплуатации электровоза 2ЭС10.

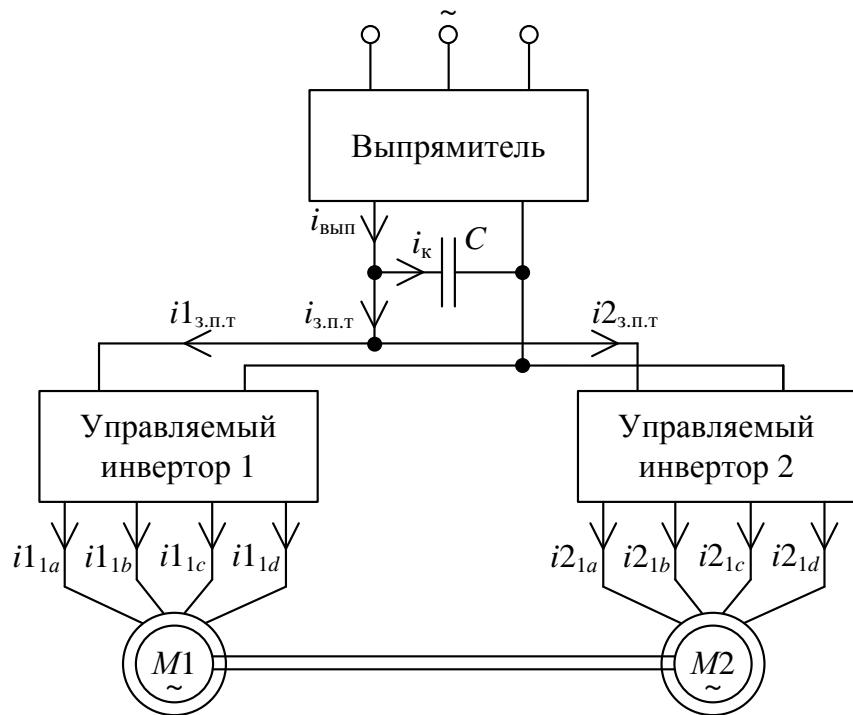


Рис. 3.22. Схема испытаний асинхронных четырехфазных двигателей методом взаимной нагрузки

Электрическая схема первого управляемого инвертора приведена на рис. 3.23 [152].

Второй управляемый инвертор имеет аналогичную схему, но другие обозначения токов ( $i_{2_{\text{зп.т}}}, i_{2_{1a}}, i_{2_{1b}}, i_{2_{1c}}, i_{2_{1d}}$ ), нумерацию транзисторов ( $VT9 - VT16$ ) и диодов ( $VD9 - VD16$ ).

В качестве выпрямителя в рассматриваемой схеме целесообразно применять трехфазный мостовой выпрямитель, работающий по схеме Ларионова, имеющий в выпрямленном напряжении шесть пульсаций за один период напряжения сети. Напряжение на выходе данного выпрямителя может быть записано в виде (2.2).

Управляющий сигнал системы управления транзисторами формируется путем сравнения одного пилообразного и синусоидальных задающих сигналов по каждой из четырех фаз. Задающие напряжения по четырем фазам отличаются от выражений (2.5) – (2.7) по фазам и могут быть записаны в виде системы:

$$\begin{cases} u_{3a}(t) = U_{3\max} \sin(2\pi f_3 t); \\ u_{3b}(t) = U_{3\max} \sin(2\pi f_3 t - \pi/2); \\ u_{3c}(t) = U_{3\max} \sin(2\pi f_3 t - \pi); \\ u_{3d}(t) = U_{3\max} \sin(2\pi f_3 t - 3\pi/4). \end{cases} \quad (3.38)$$

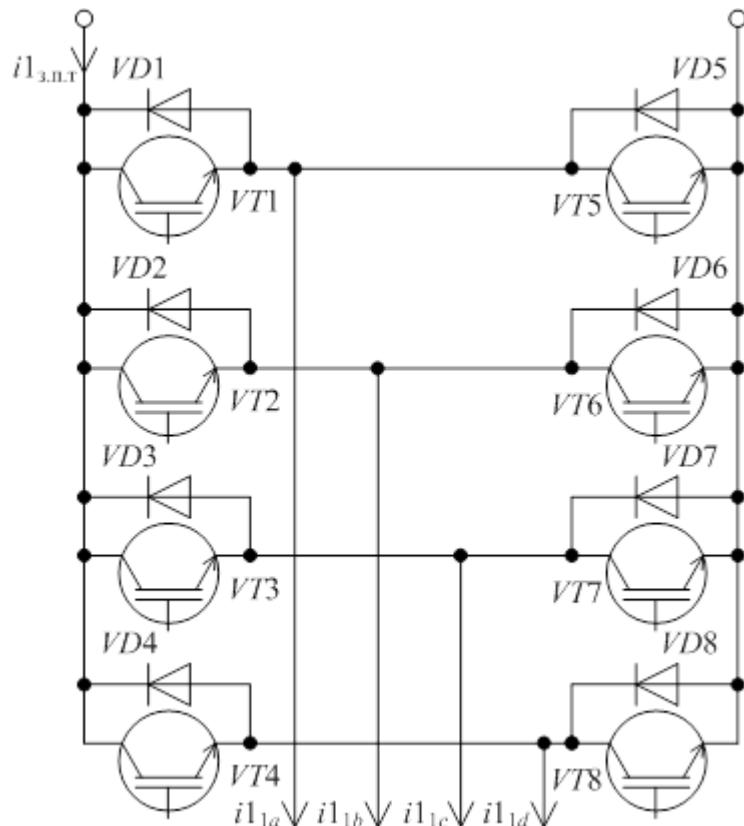


Рис. 3.23. Электрическая схема управляемого четырехфазного выпрямителя-инвертора в составе испытательного комплекса

Пилообразное напряжение в системы управления транзисторами может быть найдено по выражению (2.4).

Напряжение на выходе инверторов по фазе «*a*» определяется исходя из сравнения задающего сигнала по этой фазе и пилообразного напряжения следующим образом:

$$u_{1a}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}u_{\text{вып}}(t), & \text{если } \text{sign}(u_{3a}(t) - u_{\text{пп}}(t)) \geq 0; \\ -\frac{1}{2}u_{\text{вып}}(t), & \text{если } \text{sign}(u_{3a}(t) - u_{\text{пп}}(t)) < 0. \end{cases} \quad (3.39)$$

Напряжения на выходе инвертора по остальным фазам формируются аналогичным образом.

Пример расчета фазного напряжения с номинальной частотой тягового двигателя электровоза 2ЭС6 (60 Гц) на выходе инвертора, приведен на рис. 3.24.

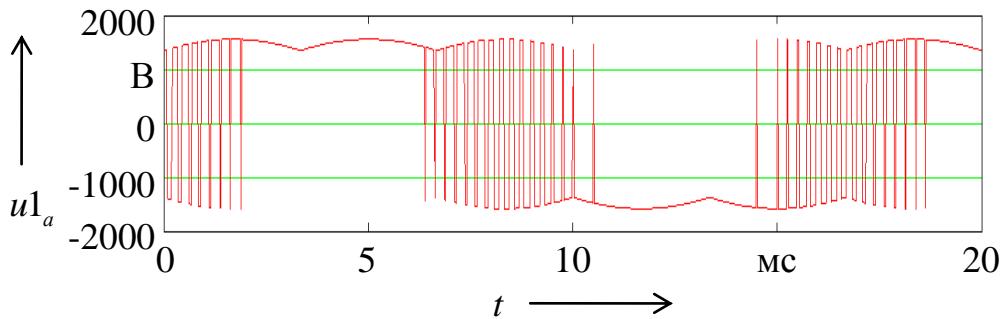


Рис. 3.24. Фазное напряжение на выходе инвертора

Математическая модель работы трехфазных асинхронных двигателей  $M1$  и  $M2$ , валы которых жестко соединены, приведена в п.п. 2.1.3 – выражение (2.33). Для четырехфазных машин данная математическая модель является аналогичной, однако имеет более громоздкий вид.

Приведенные математические модели позволяют найти токи всех фаз обмоток статора обоих двигателей  $M1$  и  $M2$ .

Ток в транзисторе  $VT1$  протекает при положительном напряжении в фазе « $a$ » и положительном направлении тока данной фазы:

$$i_{VT1}(t) = \begin{cases} i_{1a}(t), & \text{если } [\text{sign}(u_{1a}(t)) > 0] \cap (i_{1a}(t) > 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3.40)$$

Ток в транзисторе  $VT5$  протекает при отрицательном напряжении в фазе « $a$ » и отрицательном направлении тока данной фазы:

$$i_{VT5}(t) = \begin{cases} i_{1a}(t), & \text{если } [\text{sign}(u_{1a}(t)) < 0] \cap (i_{1a}(t) < 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3.41)$$

Токи в транзисторах  $VT2 - VT4$  и  $VT6 - VT8$  определяются аналогичным образом.

Для примера на рис. 3.25 приведен расчетный ток транзистора  $VT1$ .

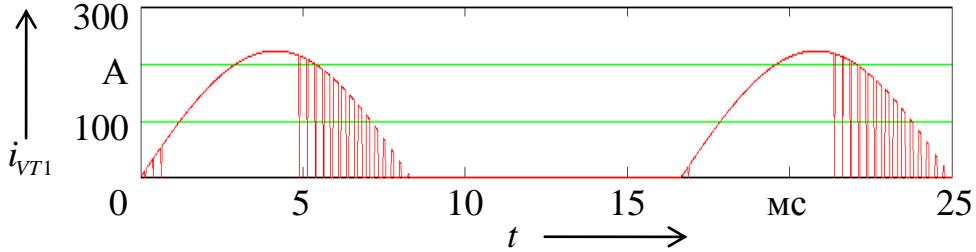


Рис. 3.25. Расчетный ток транзистора  $VT1$

Ток диода  $VD1$  протекает при положительном напряжении в фазе « $a$ » и отрицательном направлении тока данной фазы:

$$i_{VD1}(t) = \begin{cases} i1_{1a}(t), & \text{если } [\text{sign } (u1_a(t)) > 0] \cap (i1_{1a}(t) < 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3.42)$$

Ток диода  $VD5$  протекает при положительном напряжении в фазе « $a$ » и отрицательном направлении тока данной фазы:

$$i_{VD5}(t) = \begin{cases} i1_{1a}(t), & \text{если } [\text{sign } (u1_a(t)) < 0] \cap (i1_{1a}(t) > 0); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3.43)$$

Токи в диодах  $VD2 - VD4$  и  $VD6 - VD8$  определяются аналогичным образом.

Для примера на рис. 3.26 приведен расчетный ток диода  $VD5$ .

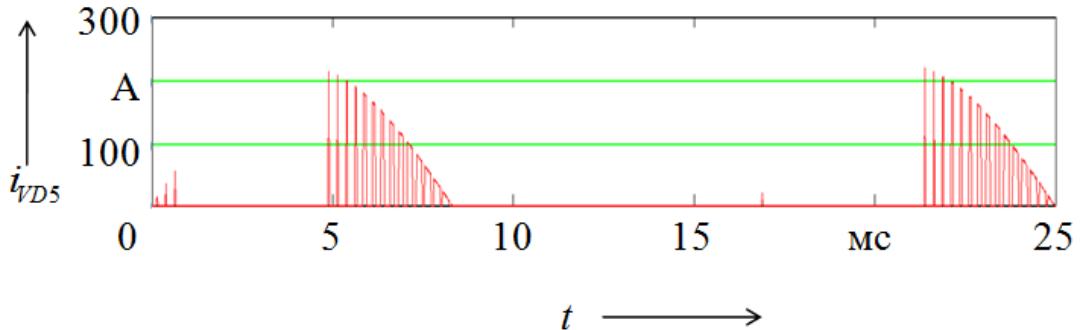


Рис. 3.26. Расчетный ток диода  $VD5$

Токи в транзисторах  $VT9 - VT16$  и диодах  $VD9 - VD16$  второго управляемого инвертора (см. рис. 3.23) могут быть определены аналогично соответствующим токам первого управляемого инвертора.

Ток «левой ветви» звена постоянного тока:

$$\begin{aligned} i1_{\text{з.п.т.}}(t) = & i_{VT1}(t) + i_{VT2}(t) + i_{VT3}(t) + i_{VT4}(t) - \dots \\ & \dots - i_{VD1}(t) - i_{VD2}(t) - i_{VD3}(t) - i_{VD3}(t). \end{aligned} \quad (3.44)$$

Ток «правой ветви» звена постоянного тока:

$$\begin{aligned} i2_{\text{з.п.т.}}(t) = & i_{VT9}(t) + i_{VT10}(t) + i_{VT11}(t) + i_{VT12}(t) - \dots \\ & \dots - i_{VD9}(t) - i_{VD10}(t) - i_{VD11}(t) - i_{VD12}(t). \end{aligned} \quad (3.45)$$

Пример расчета токов по выражению (3.44) приведен на рис. 3.27.

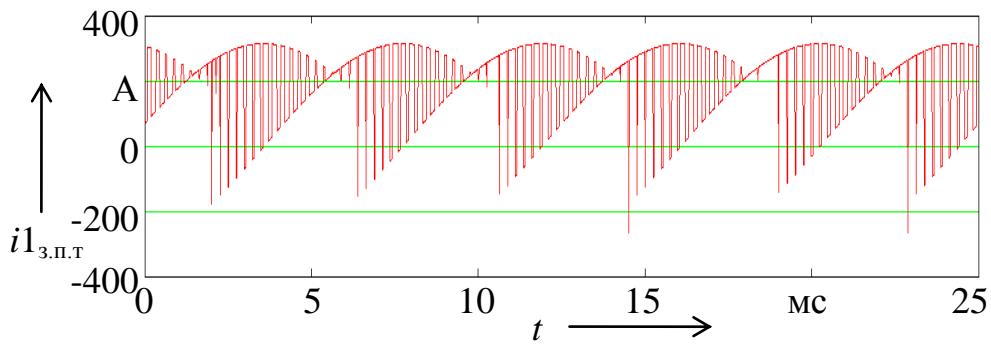


Рис. 3.27. Расчетные токи звена постоянного тока

Пример расчета токов по выражению (3.45) приведен на рис. 3.28.

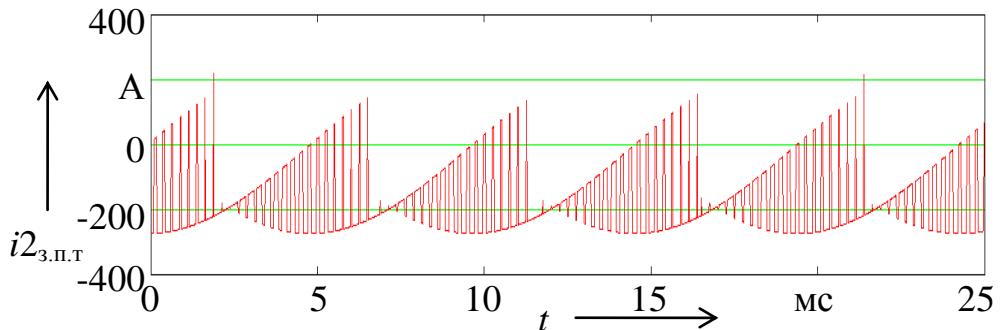


Рис. 3.28. Расчетные токи звена постоянного тока

Суммарный ток обеих ветвей в звене постоянного тока:

$$i_{\text{з.п.т.}}(t) = i1_{\text{з.п.т.}}(t) + i2_{\text{з.п.т.}}(t). \quad (3.46)$$

Напряжение на конденсаторе может быть определено по выражению (3.30), ток конденсатора – по (3.31), ток выпрямителя – по (3.32).

Расчетный ток конденсатора приведен на рис. 3.29.

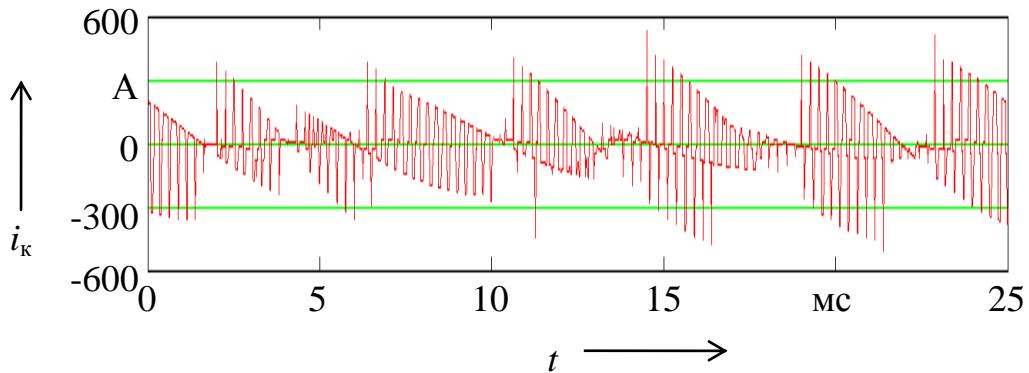


Рис. 3.29. Расчетный ток конденсатора

Расчетный ток выпрямителя приведен на рис. 3.30.

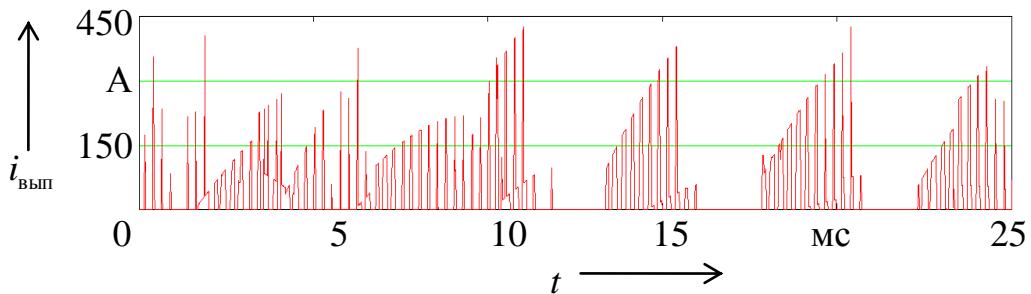


Рис. 3.30. Расчетный ток выпрямителя

### 3.2.4. Математическая модель испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с обменом энергией по сети

Схема соединений испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с обменом энергией по сети с неуправляемым выпрямителем в составе преобразователя частоты имеет вид, приведенный на рис. 3.31 [13, 217].

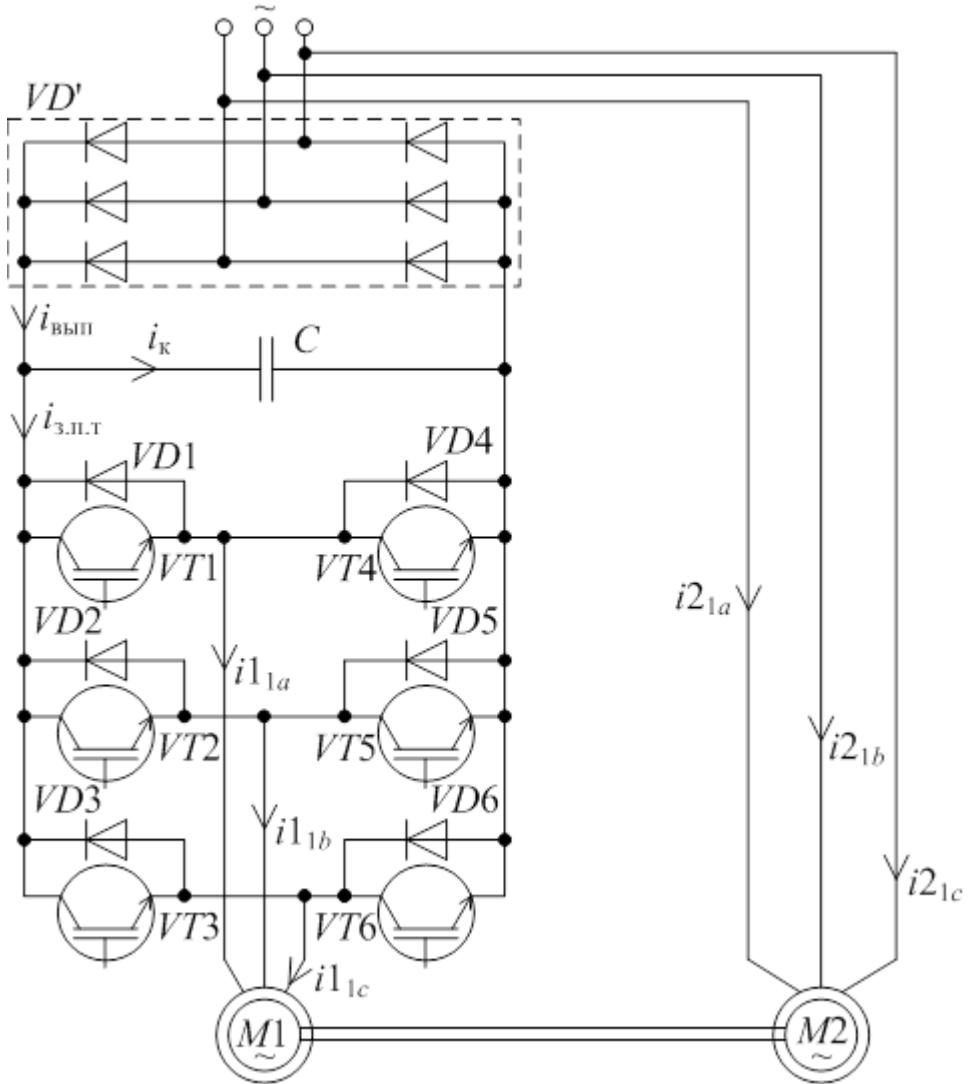


Рис. 3.31. Схема основных соединений испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с неуправляемым выпрямителем в составе преобразователя частоты с обменом энергией по сети

Исходя из данной схемы математическая модель для данного испытательного комплекса состоит из следующих уравнений: для пары асинхронных машин (2.33), неуправляемого выпрямителя (2.2), пилообразного напряжения в СУ ПЧ (2.4), задающих напряжений в СУ ПЧ (2.5) – (2.7), напряжений на выходе ПЧ, подаваемых на АМ1 (2.8) – (2.10), синусоидальных напряжений в фазах сети, подаваемых на АМ2, вида (2.5) – (2.7), токов в транзисторах, вентилях выпрямителя-инвертора и в ЗПТ (3.26), напряжения на конденсаторе (3.30), тока, протекающего по конденсатору, (3.31), и тока на выходе выпрямителя (3.32) [240].

Отличие данной математической модели от приведенной в п.п. 3.2.1 состоит в том, что на вход машины АМ2 подается синусоидальное напряжение вида (2.5) – (2.7), в схеме только один конденсатор (его емкость обозначена  $C$ ) и один выпрямитель (его ток обозначен  $i_{\text{вып}}$ ), отсутствует ШПТ и ток в ней.

Данная схема является более простой по сравнению со схемой, приведенной в п.п. 3.2.1, следовательно она должна иметь более высокую надежность, меньшую стоимость и быть более предпочтительной для применения. Однако данная схема не удовлетворяет требованиям в испытаниям, приведенным в ГОСТах. Так, например, ГОСТ Р 53472-2009 предписывает: «Испытание на нагревание следует проводить методом непосредственной нагрузки при номинальном напряжении». В ГОСТ 25941-83 указано: «При испытаниях машин переменного тока, питаемых от полупроводниковых преобразователей (далее - преобразователей), должны применяться типы преобразователей, с которыми они будут эксплуатироваться». Следовательно, асинхронный двигатель, рассчитанный на питание от преобразователя частоты, может быть испытан из перечисленных схем только по тем, которые приведены в [113, 116, 122], которые позволяют задать именно ту частоту питающего напряжения, которая является номинальной для данного двигателя.

Если двигатель рассчитан на работу от сети с частотой тока 50 Гц, то необходимо использовать схему испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с одним ПЧ, в составе которого имеется два управляемых выпрямителя-инвертора (один – на входе, другой – на выходе ПЧ), с обменом энергией по сети [115]. Данная схема приведена на рис. 3.32.

Математическая модель представленного комплекса испытаний асинхронных машин может быть получена из тех же выражений, которые приведены для предыдущей схемы (см. рис. 3.31) [155].

Временные диаграммы расчетных напряжений и токов в фазе «*a*» обмотки статора машины, работающей в двигательном режиме, приведены на рис. 3.33, 3.34, в генераторном режиме – рис. 3.35, 3.36.

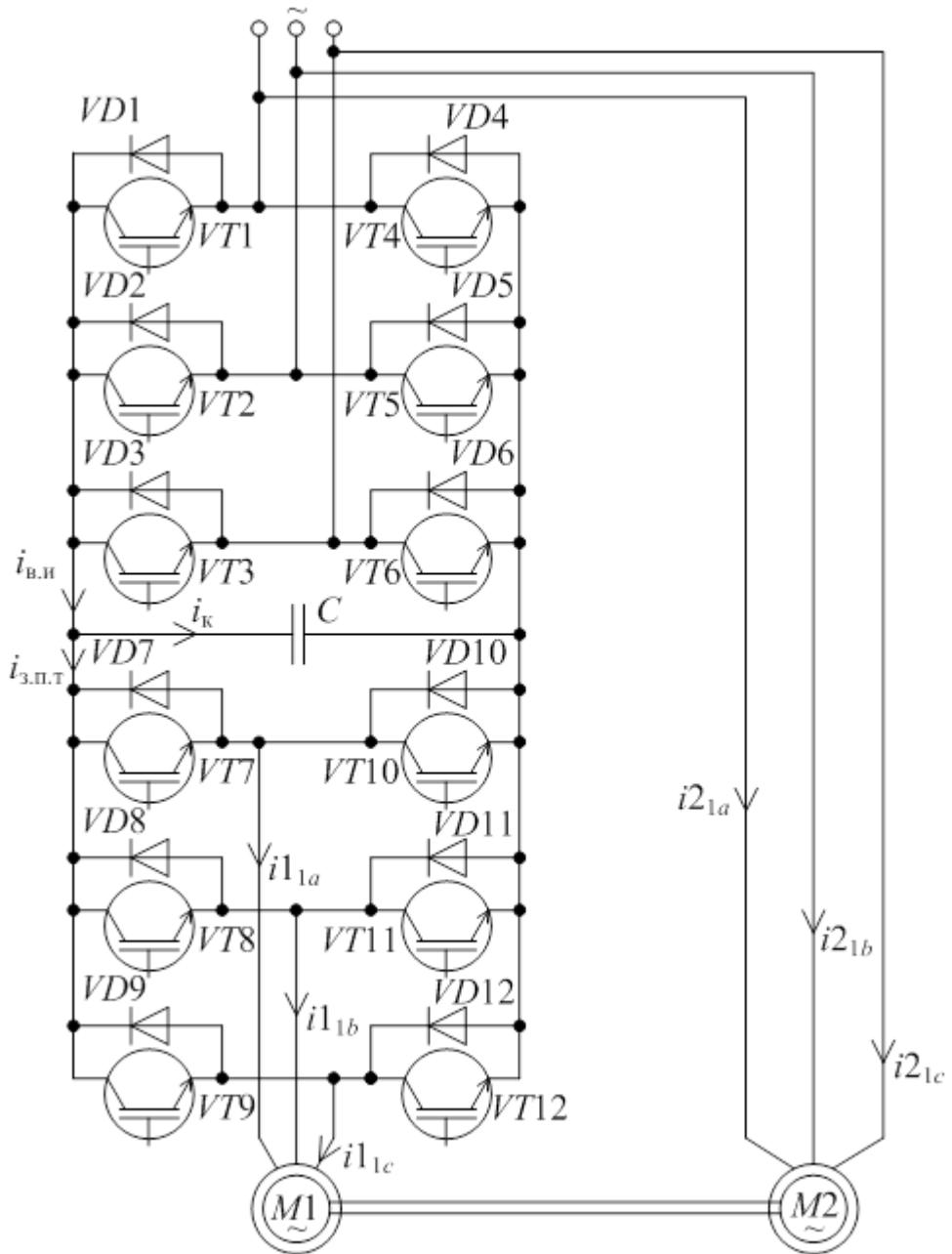


Рис. 3.32. Схема основных соединений испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с одним ПЧ, в составе которого два управляемых выпрямителя-инвертора, с обменом энергией по сети

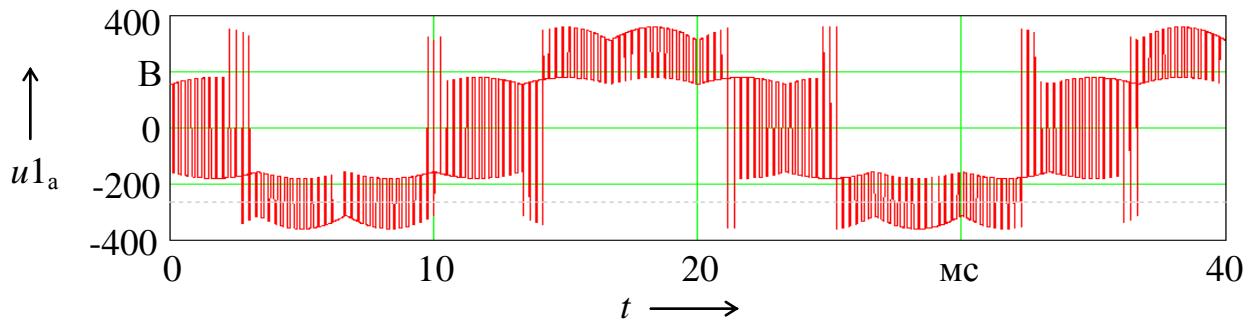


Рис. 3.33. Расчетное напряжение фазы «*a*» нагрузочной машины (*M*1)

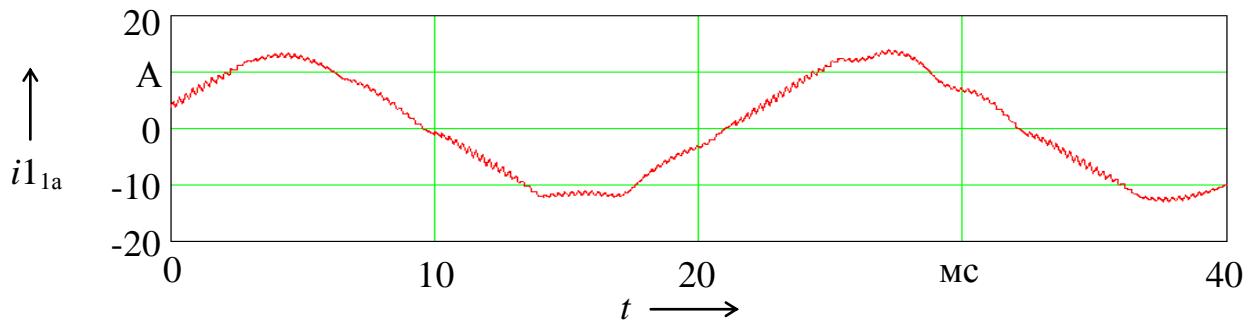


Рис. 3.34. Расчетный ток фазы «*a*» нагрузочной машины (*M*1)

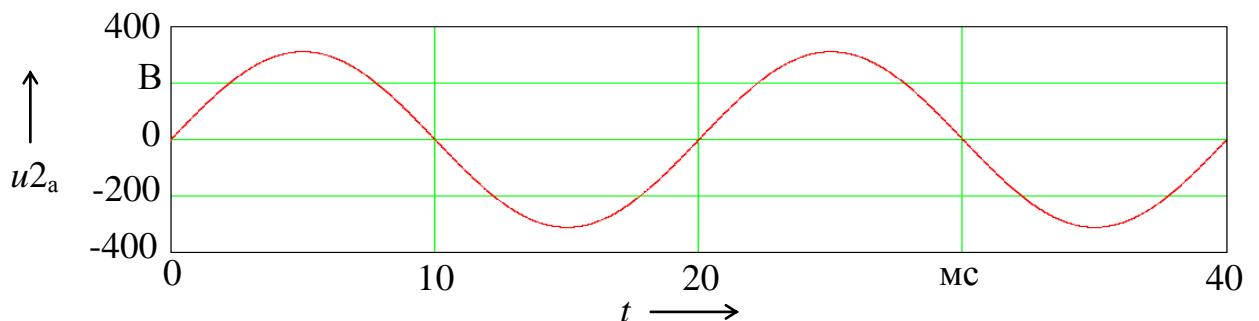


Рис. 3.35. Расчетное напряжение фазы «*a*» испытуемого двигателя (*M*2)

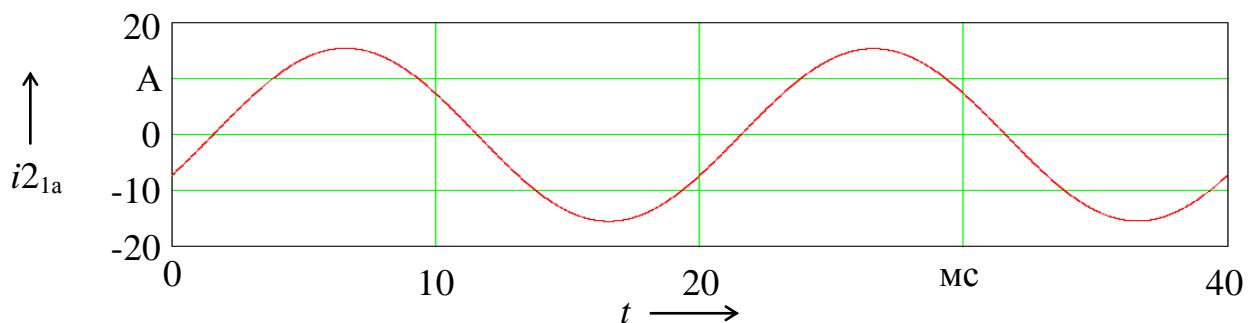


Рис. 3.36. Расчетный ток фазы «*a*» испытуемого двигателя (*M*2)

Временные диаграммы расчетных токов в элементах преобразователя частоты приведены на рис. 3.37 – 3.41.

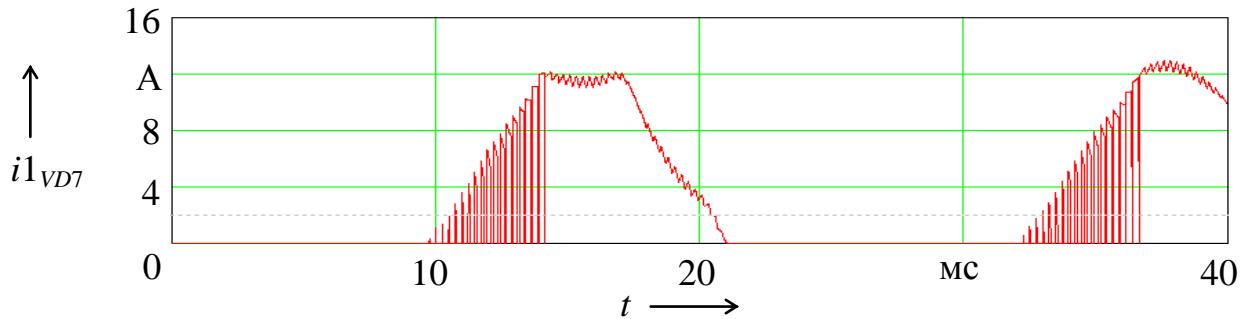


Рис. 3.37. Расчетный ток диода  $VD7$

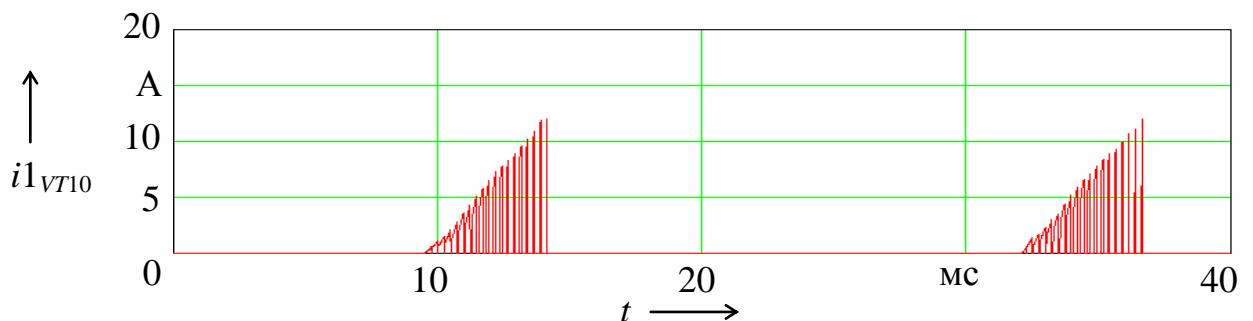


Рис. 3.38. Расчетный ток транзистора  $VT10$

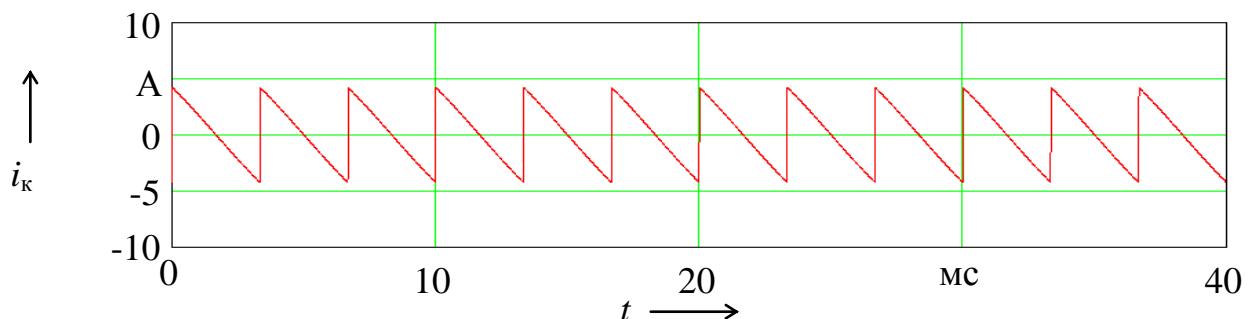


Рис. 3.39. Расчетный ток конденсатора

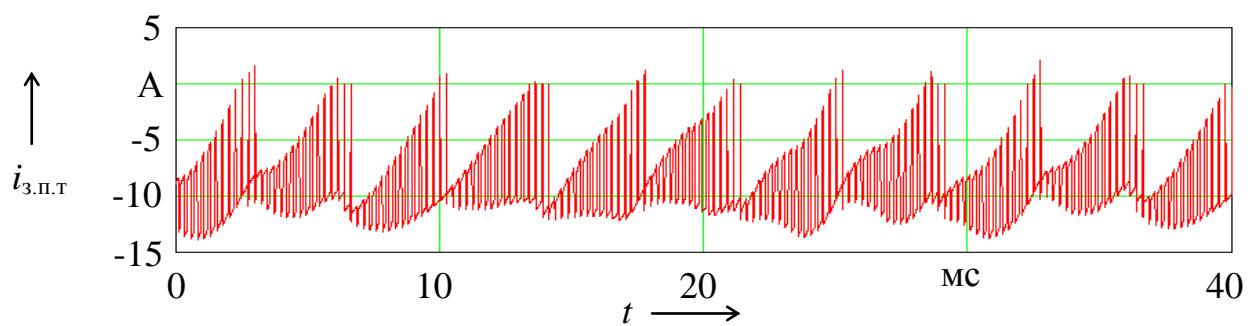


Рис. 3.40. Расчетный ток в звене постоянного тока

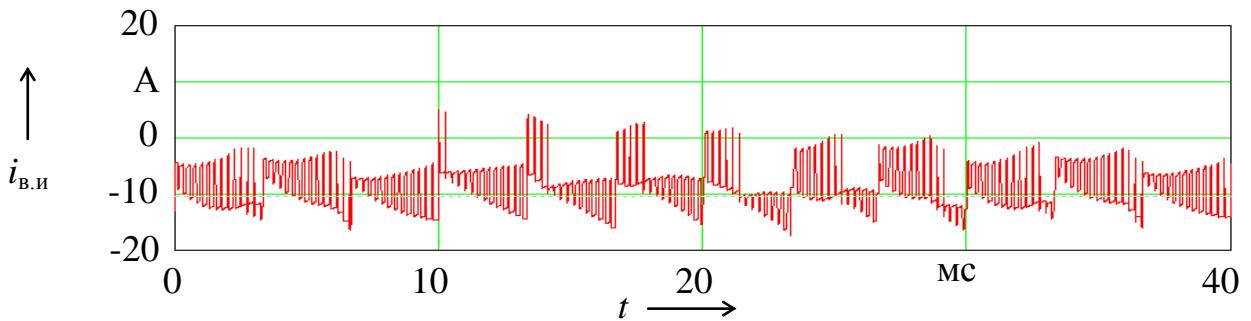


Рис. 3.41. Расчетный ток первого выпрямителя-инвертора

Данный ток (см. рис. 3.41) можно разделить на две составляющие, к одной из которых относятся только положительные значения тока, к другой – только отрицательные. Первая составляющая тока, имеющая только положительные значения, проходит через диоды  $VD1 – VD6$ , другая составляющая – через транзисторы  $VT1 – VT6$ .

### 3.3 Экспериментальные исследования и сопоставление их результатов с результатами математического моделирования

Математическая модель (2.33), имеет ряд допущений: механическая связь валов АДКР считается абсолютно жесткой, не учитываются нелинейность характеристик намагничивания и реальные фронты импульсов напряжения при ШИМ, постоянными принимаются механические потери, индуктивности и активные сопротивления обмоток и др. Уточнение данной математической модели с целью учета названных явлений принципиально возможно, но ведет к значительным трудностям достоверного определения дополнительных входных параметров, что ставит вопрос о целесообразности такого уточнения. Для ответа на данный вопрос необходима оценка возможного отклонения результатов расчёта параметров рассматриваемого электротехнического комплекса, обусловленного наличием принятых допущений, от параметров реального объекта.

С целью выполнения данной оценки проведено математическое моделирование и экспериментальные исследования на стенде с парой асинхронных двигателей типа АИС71В4 со следующими номинальными параметрами: полезная мощность  $P_n = 370$  Вт, КПД  $\eta_n = 65\%$ , коэффициент мощности  $\cos\phi_n = 0,74$ , линейный ток  $1,17$  А, линейное напряжение  $380$  В. Данные двигатели имеют близкие номинальные скорости вращения ротора:  $1370$  об/мин и  $1350$  об/мин. Параметры схемы замещения определены по методике, приведенной в [186]. Данная методика не дает однозначных значений параметров схемы замещения АДКР, т.к.

предполагает их расчет через ряд коэффициентов, выбираемых из достаточно широких диапазонов. Данные коэффициенты в настоящем исследовании определены методом последовательных приближений по критерию минимизации расхождения экспериментальных и расчетных значений токов и мощностей в режиме холостого хода и номинальной нагрузки. В расчете действующее значение первой гармоники линейного напряжения на выходе преобразователей частоты (ПЧ) задано равным 380 В, значение момента инерции принято усредненным из справочных данных для двигателей-аналогов [66]. Принципиальная схема испытаний стенда приведена на рис. 3.42.

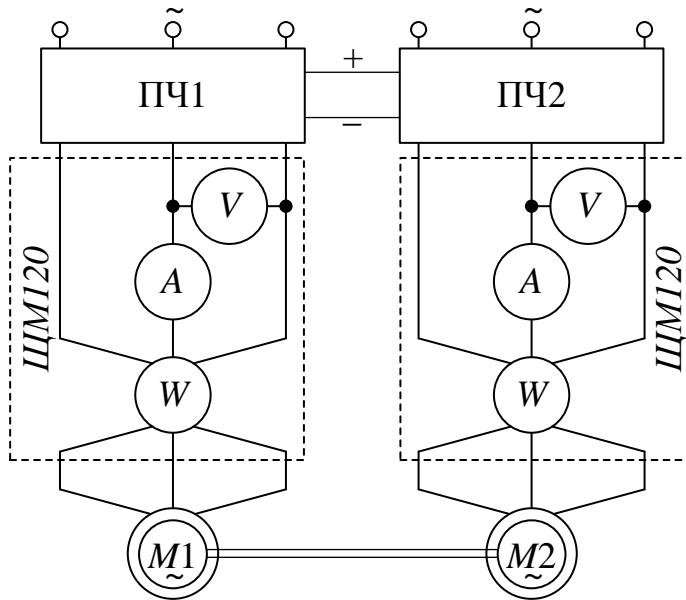


Рис. 3.42 Схема испытаний

Измерение напряжения, тока и мощности выполнены многофункциональным прибором ЩМ120, внесенным в государственный реестр средств измерения РФ. Данный прибор имеет следующие погрешности: при измерении мощности основную приведенную – 0,5 % и дополнительную – 0,5%, при измерении тока и напряжения основную приведенную – 0,2 % и дополнительную – 0,4%. Допустимый коэффициент искажения синусоидальности кривой входного напряжения при измерениях прибором ЩМ120 не должен превышать 20%. Частота напряжения определялась по показаниям индикатора, встроенного в преобразователи частоты (ПЧ1 и ПЧ2) *Emerson Unidrive SP0401* испытательного стенда. Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 3.2 [207].

Таблица 3.2

## Результаты измерений и расчетов

Эксперимент						$\Delta f$ , Гц	Расчет			
$U_1$ , В	$U_2$ , В	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$I_1$ , А	$I_2$ , А		$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$I_1$ , А	$I_2$ , А
391,0	391,0	71	81	0,635	0,784	0	73	83	0,667	0,851
389,2	391,5	178	0	0,653	0,885	1,5	168	0	0,684	0,870
388,5	389,8	262	-60	0,713	0,990	2,5	236	-56	0,713	0,991
386,9	382,7	360	-120	0,815	1,076	3,8	326	-115	0,797	0,989
384,4	375,1	465	-169	0,949	1,175	5,2	425	-172	0,910	1,064
383,1	367,3	567	-205	1,096	1,276	6,6	529	-219	1,052	1,172

Частота напряжения на выходе ПЧ1 задавалась равной 50 Гц, на выходе ПЧ2 – равной  $(50 - \Delta f)$  Гц. Величины напряжения тока и мощности, имеющие число «1» после буквенного обозначения ( $U_1, I_1, P_1$ ), относятся к электрической цепи двигателя  $M_1$  (см. рис. 3.42), те же величины, имеющие число «2» после буквенного обозначения ( $U_2, I_2, P_2$ ), относятся к электрической цепи двигателя  $M_2$ . Далее по тексту принят такой же принцип при обозначении других величин, относящихся к машинам  $M_1$  и  $M_2$ .

Для упрощения анализа степени адекватности математической модели реальному объекту построены сравнительные графики, приведенные на рис. 3.43 и 3.44. Значения мощностей и токов на графиках приведены в относительных единицах, за базис которых приняты соответствующие номинальные величины.

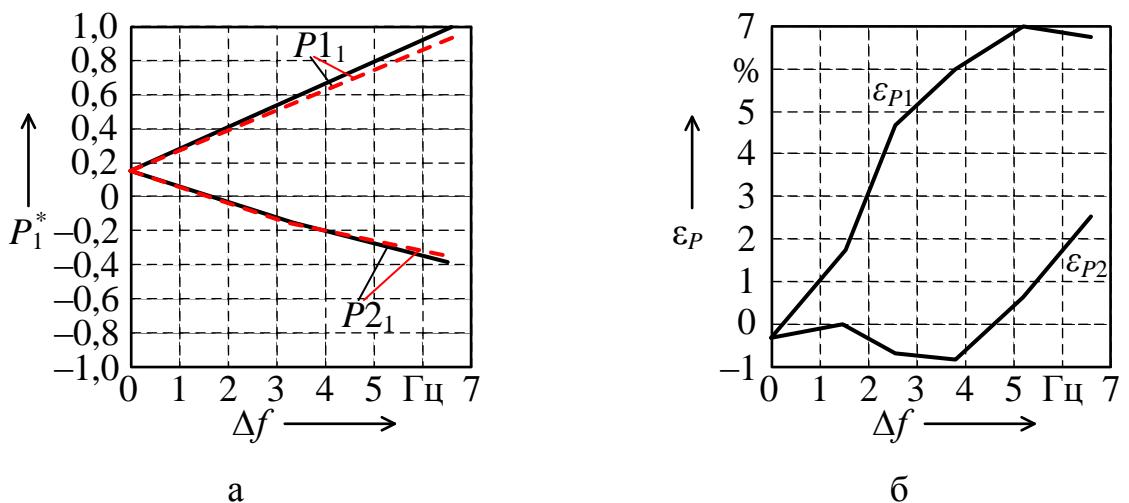


Рис. 3.43. Сопоставление измеренных и расчетных значений мощностей

Как показывает анализ кривых, приведенных на рис. 3.43, а характер изменения мощности потребляемой первой машиной ( $M1$ ), работающей в двигательном режиме, и второй машиной, работающей в генераторном режиме ( $M2$ ), по измерениям и расчетам близко совпадает. На рис. 3.43, а сплошная линия соответствует экспериментальным данным, пунктирная линия – расчетным данным. Относительная разность данных величин, найденная по выражению

$$\varepsilon_P = \frac{P_{\text{измеренная}} - P_{\text{расчетная}}}{P_{\text{измеренная}}}, \quad (3.47)$$

приведена на рис. 3.43, б и не превышает  $\pm 7\%$  для машины  $M1$  и  $\pm 2,5\%$  для машины  $M2$  на всем диапазоне изменения нагрузки, задаваемой разностью частот питающих напряжений  $\Delta f$ . Таким образом, расчетные значения мощности лишь немногого превышают величину абсолютной погрешности измерения мощности прибора ЩМ120 равную 32,909 Вт.

Характер изменения действующего значения линейного тока при изменении нагрузки также совпадает для измеренных и расчетных данных в соответствии с рис. 3.44, а (сплошная линия – для экспериментальных данных, пунктирная линия – для расчетных данных).

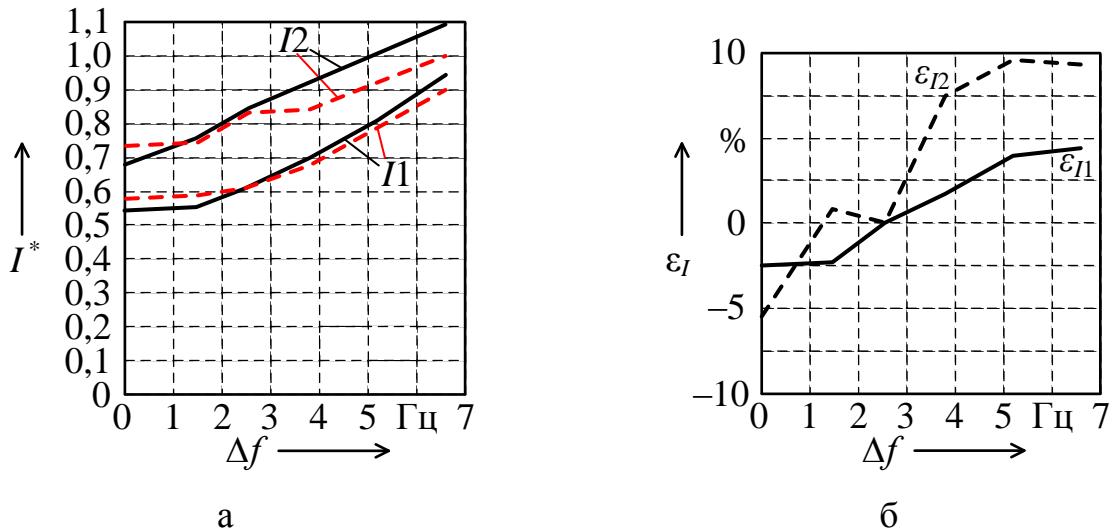


Рис. 3.44. Сопоставление измеренных и расчетных значений токов

Относительная разность измеренных и расчетных токов, найденная по выражению

$$\varepsilon_I = \frac{I_{\text{измеренный}} - I_{\text{расчетный}}}{I_{\text{измеренный}}}, \quad (3.48)$$

приведена на рис. 3.44, б и не превышает  $\pm 5\%$  для машины  $M1$  и  $\pm 10\%$  для машины  $M2$  на всем диапазоне изменения нагрузки.

Сравнение результатов экспериментов и математического моделирования по энергетическим характеристикам приведено на рис. 3.45.

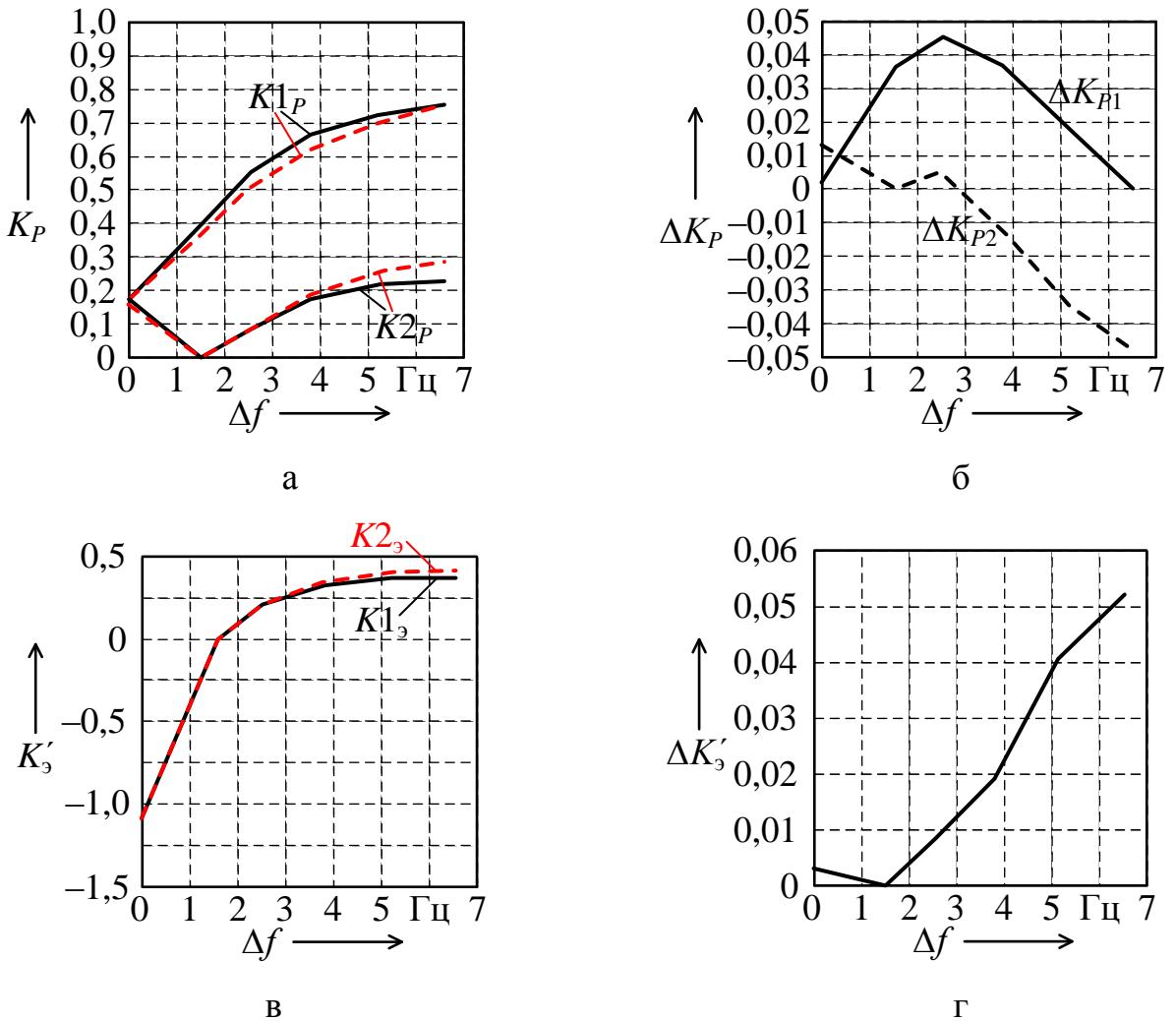


Рис. 3.45. Сопоставление экспериментальных и расчетных энергетических характеристик

Коэффициент мощности  $K_P$ , найденный как отношение активной мощности к полной мощности (с учетом всех гармонических составляющих), при изменении нагрузки приведен на рис. 3.45, а: сплошная линия – для экспериментальных данных, пунктирная линия – для расчетных данных.

Разность экспериментального и расчетного коэффициента мощности (см. рис. 3.45, б) не превышает  $\pm 0,05$  для обеих машин. При нагрузке близкой к номинальной (при  $\Delta f = 6,6$  Гц) для машины, работающей в двигательном режиме  $K1_P$  достигает значения близкого к паспортному  $\cos\phi_h = 0,74$  (см. рис. 3.45, а).

Для оценки энергетической эффективности метода взаимной нагрузки в работе [157] предложен коэффициент

$$K'_s = \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (3.49)$$

который иначе может быть найден по выражению

$$K'_s = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.50)$$

Данный коэффициент показывает, какая доля затрат энергии, необходимой на нагружение испытуемого двигателя, компенсируется энергией, вырабатываемой машиной, работающей в генераторном режиме. Отрицательное значение коэффициента говорит о том, что вторая машина не вырабатывает, а потребляет электрическую энергию, работая в режиме двигателя.

Коэффициент мощности  $K'_s$  при изменении нагрузки приведен на рис. 3.45, в: сплошная линия – для экспериментальных данных, пунктирная линия – для расчетных данных. Как показывает анализ полученных данных коэффициент энергетической эффективности  $K'_s$ , полученный по расчету, отличается от экспериментального не более чем на 0,053 на всем диапазоне нагрузок (см. рис. 3.45, г).

Таким образом, в проведенной работе получены следующие основные результаты. Выполнен анализ соответствия данных, получаемых путем математического моделирования с применением системы уравнений (2.33), данным реального объекта – стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Проведенный анализ для установившихся режимов работы показал, что математическая модель позволяет получить результаты адекватные реальному объекту, пригодные для анализа его параметров при режиме работы от холостого хода до номинальной нагрузки. Математическая модель, выраженная системой уравнений (2.33) с имеющимися в ней допущениями, может быть применена в процессе разработки стендов для испытания асинхронных двигателей, например, при выборе параметров коммутационной и другой аппаратуры, с учетом оценки возможных отклонений реальных значений токов от расчетных.

### **3.4 Разработка программного обеспечения для расчета основных параметров элементов испытательных комплексов**

Разработанные математические модели электротехнических комплексов для испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки в первую оче-

редь представляют научный интерес для исследователей, однако для их практического применения в процессе расчета параметров элементов при проектировании испытательных стендов необходимы прикладные программы с удобным пользовательским интерфейсом [160].

Образец такой программы для ЭВМ «Расчет параметров схемы испытаний АД-АГ» разработан на основе математической модели, состоящей из выражений для испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с двумя преобразователями частоты (см. рис. 3.8).

Разработанная программа написана на языке *Java* и может работать в любой операционной системе (*Windows*, *MacOS*, *Linux*) с установленной программной платформой *Java SE* версии 8 или выше [173].

Данная программа имеет пользовательский интерфейс, реализованный в виде следующих трех вкладок: «Параметры», «Графики» и «Результаты расчета».

На первой вкладке, приведенной на рис. 3.46, вводятся значения следующих параметров:

- асинхронного двигателя (АД), проходящего испытания: номинальная частота питающего напряжения ( $f_n$ ), число пар полюсов ( $p$ ), номинальное скольжение ( $s_n$ ), момент инерции испытуемого двигателя ( $J_d$ ), номинальные потери в роторе ( $\Delta P_{\text{рот}}$ );

- схемы замещения АД: активное сопротивление фазы обмотки статора ( $R_1$ ), индуктивность рассеяния фазы обмотки статора ( $L_{1\sigma}$ ), приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора ( $R'_2$ ), приведенная индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора ( $L'_{2\sigma}$ ), коэффициент взаимной индукции между обмотками ротора и статора ( $L_m$ );

- преобразователей частоты: амплитудное значение пилообразного напряжения ( $U_{\text{пп max}}$ ), амплитудное значение задающего напряжения ( $U_{\text{з max}}$ ), частота пилообразного напряжения, определяющая частоту широтно-импульсной модуляции, производимой преобразователем ( $f_{\text{пп}}$ ), суммарную емкость конденсаторов двух преобразователей частоты ( $C$ );

- вывода на нагрузку: разность частот напряжения на выходах ПЧ при работе схемы под заданной нагрузкой ( $\Delta f$ ), постоянная времени, определяющая длительность переходного режима при задании машинам номинальной нагрузки ( $t_f$ );

- расчета: расчетное время работы машин от момента подачи напряжения ( $t_1$ ), количество расчетных точек ( $N$ ).

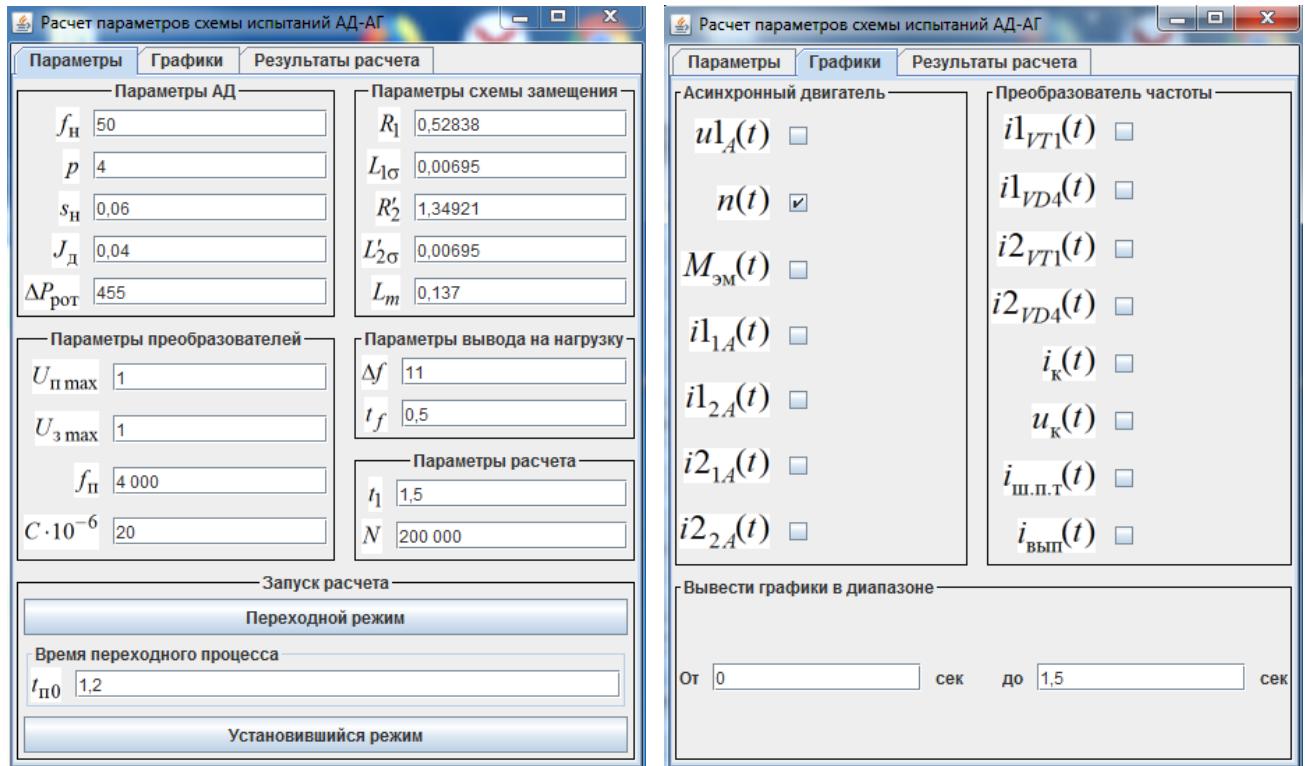


Рис. 3.46. Вкладки «Параметры» и «Графики» программы расчета электротехнических комплексов для испытаний асинхронных машин

Все параметры нагрузочной асинхронной машины при расчете принимаются равными аналогичным параметрам испытуемого АД.

Расчет режима нагрузки выполняется исходя из условия подачи на обмотки статора испытуемого двигателя и нагрузочной асинхронной машины переменных напряжений, формируемых путем широтно-импульсной модуляции, имеющих частоты основной гармоники, изменяющиеся по экспоненциальным законам.

Частота основной гармоники напряжения, подаваемого на испытуемый АД и на нагрузочную асинхронную машину задается экспоненциальными законами в соответствии с кривыми, приведенными на рис. 3.8.

По окончании переходного процесса частота напряжения подаваемого на испытуемый двигатель  $f_1$  принимает значение равное  $f_H$ , а частота напряжения, подаваемого на нагрузочную машину,  $f_2$  – значение равное  $(f_H - \Delta f)$ .

Вкладка «Графики» позволяет выбрать для отображения расчетные кривые, интересующие пользователя программы. Пример расчетных графиков частоты вращения и тока статора по фазе «A» испытуемого двигателя приведен на рис. 3.47.

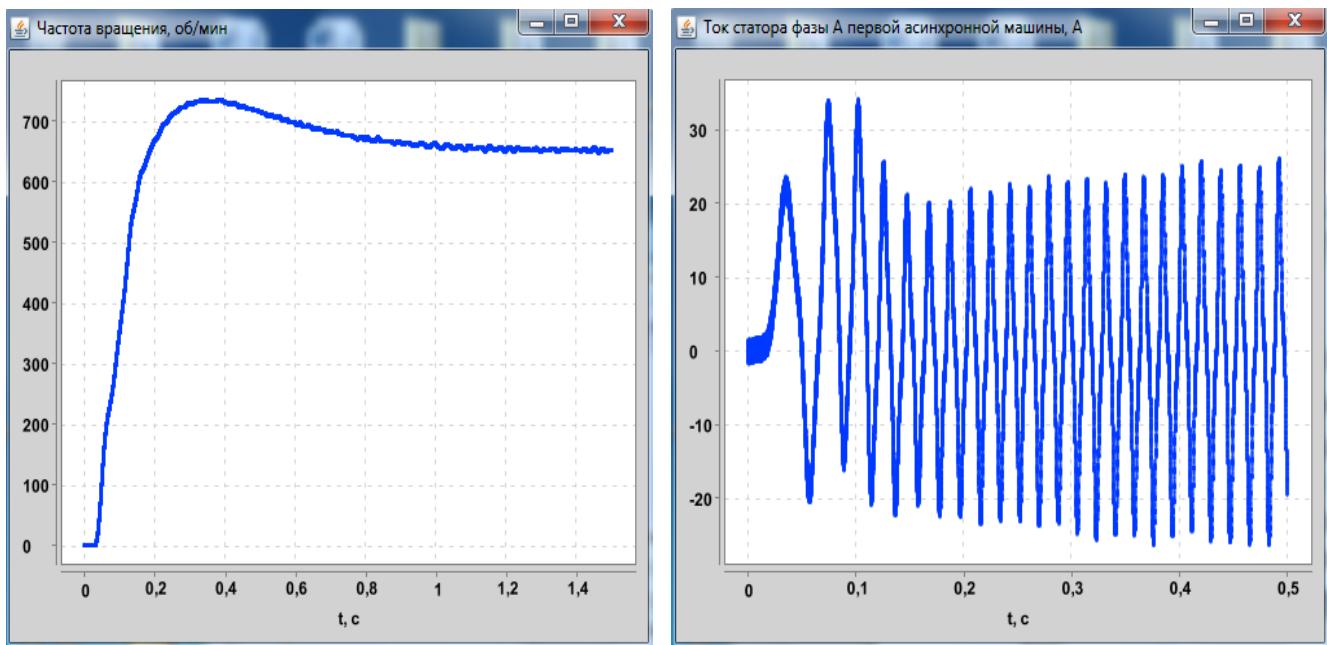


Рис. 3.47. Пример расчетных графиков частоты вращения и тока статора по фазе «А» испытуемого двигателя

Вкладка «Результаты расчета» позволяет просмотреть значения основных расчетных величин, необходимых для проектирования испытательного комплекса. Результатами расчета переходного режима являются: наибольшее значение напряжения на конденсаторе в ЗПТ преобразователей частоты ( $U_{k\ max}$ ), наибольшее значение тока в транзисторах ( $I_{1VT\ max}$ ) и диодах ( $I_{1VD\ max}$ ) первого преобразователя, наибольшее значение тока в транзисторах ( $I_{2VT\ max}$ ) и диодах ( $I_{2VD\ max}$ ) второго преобразователя, наибольшее значение суммарного тока выпрямителей ( $I_{вып\ max}$ ). Результатами расчета установившегося режима являются: среднее значение мощности, потребляемой испытуемым двигателем ( $P_{1cp}$ ), среднее значение электрической мощности, вырабатываемой нагружочной асинхронной машиной ( $P_{2cp}$ ), среднее значение тока в транзисторах ( $I_{1VT\ cp}$ ) и диодах ( $I_{1VD\ cp}$ ) первого преобразователя, среднее значение тока в транзисторах ( $I_{2VT\ cp}$ ) и диодах ( $I_{2VD\ cp}$ ) второго преобразователя, среднее значение тока в шине, соединяющей звенья постоянного тока ПЧ ( $I_{ш.п.т\ cp}$ ), среднее значение суммарного тока выпрямителей ( $I_{вып\ cp}$ ).

Пример отображения расчетных параметров на вкладке «Результаты расчета» приведен на рис. 3.48.

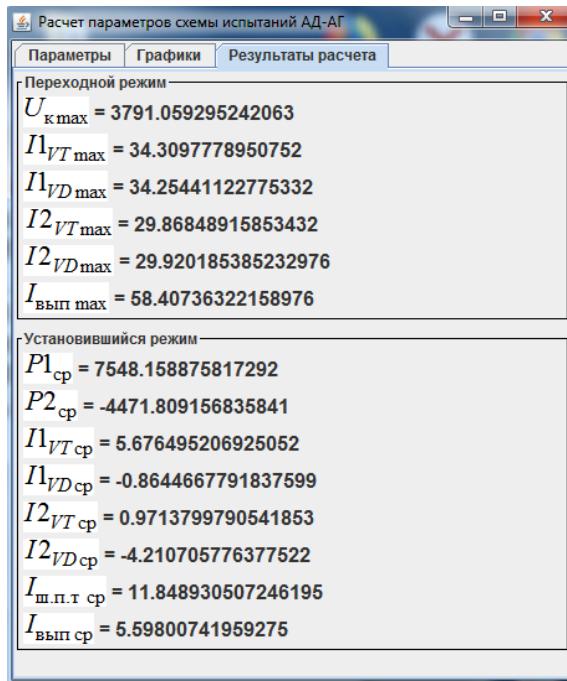


Рис. 3.48. Пример расчета параметров при испытании асинхронного двигателя

Измерение длительности решения ряда тестовых задач в разработанной программе показало скорость решения на порядок более высокую в сравнении со временем вычислений в системе *Mathcad*. Высокая скорость расчетов позволяет выполнить их с высокой частотой дискретизации параметров, быстро изменяющихся во времени, и охватить относительно широкий временной диапазон.

Функциональные возможности разработанной программы позволяют проводить научные исследования физических процессов в схеме испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки с нагрузочной асинхронной машиной и обменом энергией по звену постоянного тока преобразователей. Применение данной программы позволяет осуществить подбор параметров элементов схемы испытаний асинхронного двигателя для осуществления требуемого переходного режима, определяющего процесс вывода испытуемого двигателя на номинальную нагрузку, начиная с отключенного состояния машин.

### 3.5 Выводы по третьему разделу

1. Выполнен анализ состава потерь энергии в схемах испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки. Отмечены особенности источников питания и отличия в составах потерь для всех типов схем взаимной нагрузки.

2. Введены понятия коэффициентов экономичности и затрат для электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний электрических машин

методом взаимной нагрузки, позволяющие оценить энергоэффективность различных схем испытаний. Получены выражения, позволяющие рассчитать данные коэффициенты.

3. Сформированы математические модели электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин, которые могут быть использованы в процессе проектирования ЭТК при заданных параметрах испытуемых электродвигателей и дают возможность на этапе проектирования смоделировать любой рабочий режим.

4. Практическая ценность полученных математических моделей состоит в том, что они могут быть применены в процессе проектирования новых испытательных комплексов для определения средних и предельных показателей интересующих режимов работы, что является основой для выбора параметров оборудования, входящего в состав испытательного комплекса, при известных параметрах испытуемых двигателей.

5. Схемы с нагрузочной асинхронной машиной с номинальной мощностью испытуемого двигателя порядка сотен киловатт имеют до полутора раз меньшие потери, чем схемы с генератором постоянного тока. Для схем испытания асинхронных двигателей мощностью порядка 1 кВт потери в схемах различного типа имеют близкие друг другу значения.

6. Выполненные исследования на экспериментальной установке подтвердили адекватность принятых допущений при математическом моделировании процесса испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки. Относительные погрешности в пределах рабочего диапазона нагрузки при определении коэффициента экономичности, мощности и тока составили соответственно не более 5, 7 и 10 %.

7. На основе разработанной математической модели испытательного комплекса с двумя асинхронными машинами написана программа для ЭВМ «Расчет параметров схемы испытаний АД-АГ» на языке *Java* для работы в любой операционной системе (*Windows*, *MacOS*, *Linux*). Данная программа позволяет упростить получение широкого спектра результатов математического моделирования (в виде конкретных расчетных величин и временных диаграмм) за счет простого пользовательского интерфейса. При необходимости функционал данной программы может быть расширен для моделирования работы других типов схем.

#### 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ И ПРИНЦИПОВ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Современные стенды, обеспечивающие проведение испытаний электрических машин, представляют собой сложные электротехнические комплексы, оснащенные широким набором силового (в том числе коммутационного), измерительного и диагностического оборудования, электронных, микроконтроллерных и микропроцессорных систем, различными средствами управления процессом испытаний и др.

Основными требованиями, предъявляемыми к современным электротехническим комплексам, являются высокая надежность и энергоэффективность. Высоких показателей энергоэффективности можно добиться путем применения схем испытания, использующих метод взаимной нагрузки [113, 115, 116, 122, 128, 129, 137-139]. Повышения надежности испытательных стендов можно добиться путем их автоматизации [70, 98, 106, 188].

В данном разделе приведены варианты технических решений, позволяющие осуществить алгоритмизацию работы четырех типов схем, рассмотренных в п. 1.3, реализующих метод взаимной нагрузки при испытании асинхронных двигателей. Приведенные в данном разделе технические решения относятся только к вариантам схем, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 25941-83, предъявляемым к источнику питания испытуемой машины.

Данные схемы позволяют в соответствии с отмеченными требованиями ГОСТов проводить нагрузочные испытания асинхронных двигателей, применяемых как при питании от источника синусоидального напряжения частотой 50 Гц, так и при питании от управляемого инвертора напряжения или преобразователя частоты.

Приведенные ниже алгоритмы эффективного управления процессом испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки позволяют повысить надежность испытательных стендов за счет исключения человеческого фактора и осуществить последующую разработку программного обеспечения, необходимого для микропроцессорных средств управления процессом испытаний. Широкий набор предложенных схем испытаний потребовал также разработки их классификации и рекомендаций по применению.

Представленные в разделе 2 схемы, предназначенные для определения электрической мощности электрических машин при испытаниях методом взаимной нагрузки, также позволили разработать алгоритмы управления данным процессом.

#### **4.1. Разработка алгоритма управления процессом стендовых испытаний методом взаимной нагрузки с системой асинхронный двигатель – асинхронный генератор с обменом энергией по сети**

Рассмотрим вопрос автоматизации стенда для испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с использованием одного преобразователя частоты. Из двух рассмотренных в п. 1.3 схем данного типа только схема, приведенная на рис. 1.18, позволяет осуществить нагрузочные испытания асинхронных двигателей в соответствии с требованиями ГОСТ 25941-83, предъявляемыми к источнику питания испытуемой машины.

Для обеспечения возможности автоматизации схему, приведенную на рис. 1.18, необходимо дополнить рядом элементов, как показано на рис. 4.1. Для упрощения анализа схемы контакторы 3-6, имевшиеся на рис. 1.18, не приведены на рис. 4.1. В случае технической целесообразности контакторы, осуществляющие изменение функций (испытуемая или нагрузочная) машин, могут быть добавлены на данную схему.

На схеме отмечены следующие элементы, совпадающие со схемой, приведенной на рис. 1.18: сеть 1, преобразователь частоты 2, имеющий звено постоянного тока 2.2, управляемые выпрямители-инверторы 2.1 и 2.3, нагрузочная асинхронная машина 8, испытуемый асинхронный двигатель 10, муфта 9, соединяющая валы испытуемого двигателя и нагрузочной машины. Для осуществления автоматизации схема дополнена задатчиком параметров 3, системой управления 4, вычислителем частоты напряжения 5, датчиком тока 6, датчиком частоты вращения 7, контактором 11.

Процесс нагружения асинхронного двигателя осуществляется следующим образом. Стенд начинает работу при отключенной обмотке статора испытуемого асинхронного двигателя 10 от сети 1 посредством контактора 11. Оператором вводится в задатчик параметров 3 значения следующих номинальных величин асинхронного двигателя 8: тока статора  $I_{1n}$ , частоты питающего напряжения  $f_{1n}$ , частоты вращения  $n_n$ .

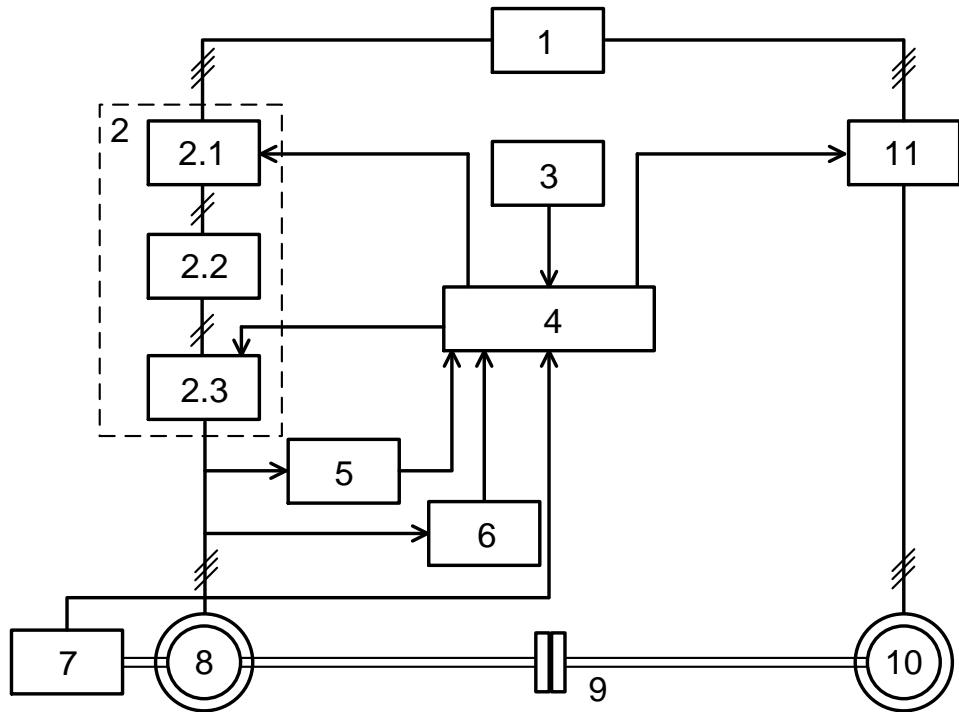


Рис. 4.1. Схема испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом электроэнергии по сети

Далее с выхода второго управляемого выпрямителя-инвертора 2.3 на обмотку статора нагрузочной асинхронной машины 8 подается переменное напряжение, с постепенным увеличением его частоты  $f_1$  от нулевого значения. Скорость увеличения частоты  $f_1$  задается системой управления 4 в соответствии с данными, получаемыми от датчика тока 6 и вычислителя частоты питающего напряжения 5 и введенными в задатчик параметров 3.

Датчик тока 6 позволяет осуществить обратную связь по току статора  $I_1$  нагрузочной асинхронной машины 8, и тем самым позволяет осуществить ее пуск с заданным значением тока  $I_1$ , незначительно превышающим значение  $I_{1H}$ . Значение частоты  $f_1$  контролируется системой управления 4 с помощью вычислителя частоты питающего напряжения 5 и увеличивается до значения частоты  $f_c$  напряжения сети 1, после чего обмотка статора испытуемого асинхронного двигателя 10 подключается к сети посредством контактора 11.

Далее снижается частота переменного напряжения  $f_1$ , подаваемого на нагрузочную асинхронную машину 8, что приводит к увеличению ее нагрузки в режиме генератора и нагрузки испытуемой асинхронной машины 10 в режиме двигателя.

Скорость снижения и конечное значение частоты  $f_1$ , задается системой управления 4 в соответствии с данными, получаемыми от датчиков тока 6 и ча-

стоты вращения 7, вычислителя частоты питающего напряжения 5 и введенными в задатчик параметров 3.

Датчик тока 6 позволяет осуществить обратную связь по току статора  $I_1$  нагрузочной асинхронной машины 8, и тем самым позволяет осуществить процесс ее нагружения с заданным значением тока  $I_1$ , незначительно превышающим значение  $I_{1n}$ .

Система управления 4 фиксирует достижение частотой вращения ротора  $n$  значения  $n_n$  в соответствии с показаниями, регистрируемыми с помощью датчика частоты вращения 7. Выполнение данного условия означает достижение режима работы с номинальной нагрузкой.

Представленное схемное решение защищено патентом РФ на полезную модель (прил. А) [123].

Техническое решение, приведенное на рис. 4.1, позволяет построить подробный алгоритм эффективного управления процессом испытаний, приведенный на рис. 4.2.

В соответствии с данным алгоритмом процесс испытаний осуществляется следующим образом.

Перед запуском машин оператором должны быть введены параметры испытуемого двигателя – номинальные ток  $I_{1n}$  и частота вращения  $n_n$ .

В алгоритме пунктиром выделены две части, в которых происходит управление режимами работы электрических машин: первая позволяет осуществить запуск обеих машин без нагрузки на валу, вторая – задание испытуемому двигателю номинальной нагрузки.

Далее обе машины работают в установившемся режиме в течение времени, установленного для данного типа испытаний, и производятся необходимые измерения диагностических параметров.

В том случае, если на стенде испытываются однотипные машины, номинальные параметры испытуемого двигателя могут быть заданы однократно и при проведении последующих испытаний повторно не вноситься.

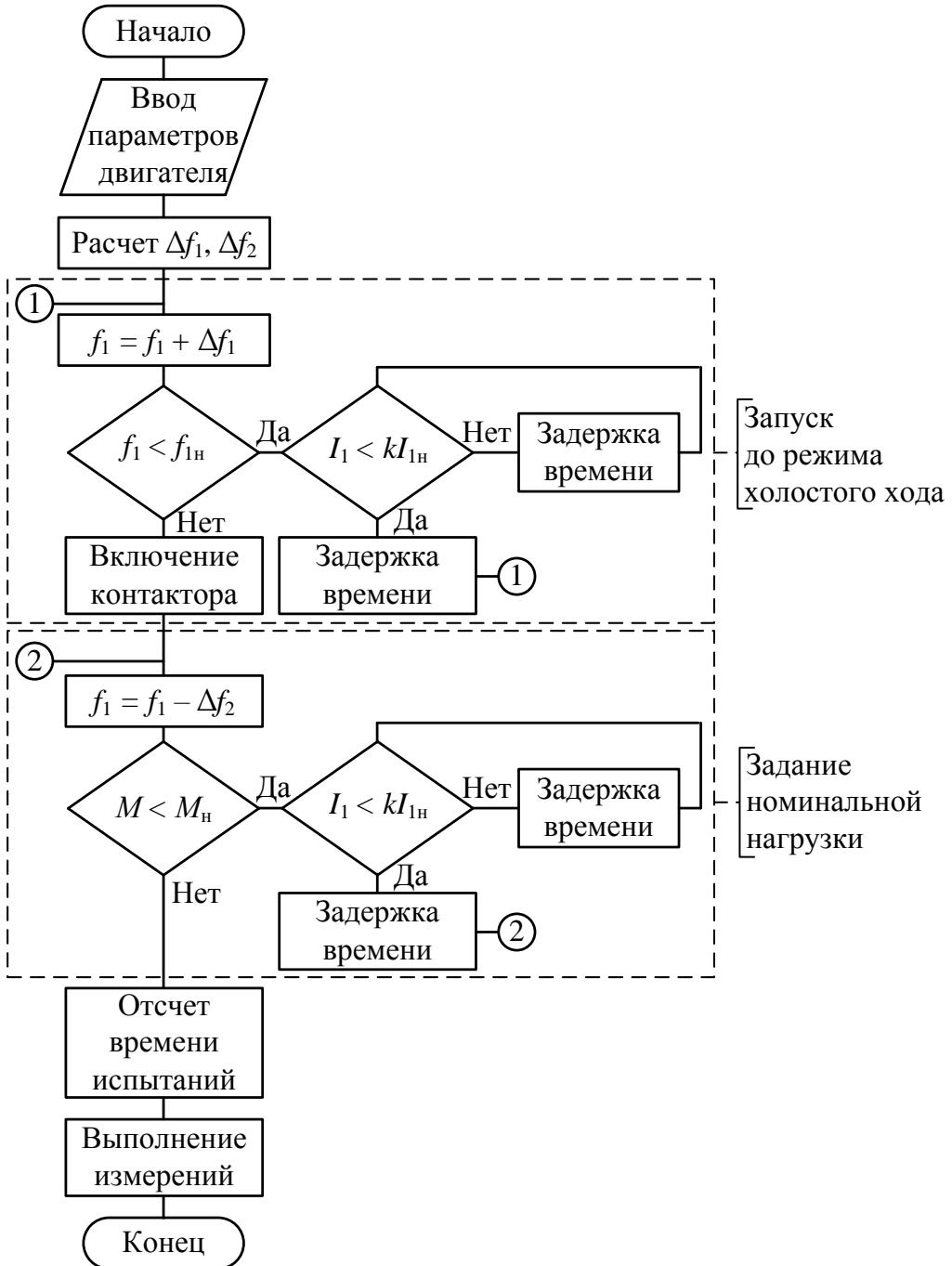


Рис. 4.2. Алгоритм управления процессом испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом энергией по сети

Для запуска машин без нагрузки на валу производится увеличение частоты питающего напряжения  $f_1$  с шагом  $\Delta f_1$  пока не перестанет выполняться условие

$$f_1 < f_{1н}, \quad (4.1)$$

где  $f_{1н}$  – номинальное значение частоты питающего напряжения испытуемого двигателя.

Шаг  $\Delta f_1$  должен быть рассчитан так, чтобы цикл, обеспечивающий увеличение  $f_1$ , завершился при равенстве  $f_1 = f_{1H}$ .

Каждый шаг увеличения частоты питающего напряжения  $f_1$  выполняется с задержкой по времени необходимой для того, чтобы ток статора снизился до значения  $kI_{1H}$ , т. е. обеспечивалось условие:

$$I_1 < kI_{1H}. \quad (4.2)$$

Коэффициент  $k > 1$  может быть принят равным приблизительно от 1,2 до 1,5 в зависимости от того, насколько плавным необходимо обеспечить процесс регулирования. Если за время задержки ток  $I_1$  не успел снизиться до значения  $kI_{1H}$ , задержка времени повторяется до выполнения условия (4.2).

После выполнения условия (4.2) производится включение контактора 11 (см. рис. 4.1). Обе асинхронные машины оказываются подключенными к источникам питания и работающими в режиме холостого хода.

Далее осуществляется задание номинальной нагрузки путем постепенного снижения частоты  $f_1$  с шагом  $\Delta f_2$  пока не перестанет выполняться условие

$$M < M_H, \quad (4.3)$$

где  $M_H$  – номинальное значение вращающего момента испытуемого двигателя.

Каждый шаг снижения частоты питающего напряжения  $f_1$  выполняется с задержкой по времени необходимой для того, чтобы ток статора снизился до значения  $kI_{1H}$ . Если за время задержки ток  $I_1$  не успел снизиться до значения  $kI_{1H}$ , задержка времени повторяется до выполнения условия (4.2).

После выполнения условия (4.3) испытуемый двигатель 10 (см. рис. 4.1) оказывается нагруженным номинальным моментом.

Принцип действия схемы испытаний АД, заложенный в алгоритм, представленный действующее

значение первой гармоники напряжения  $U_1 = 220$  В с частотой 50 Гц,

на рис. 4.2 (прил. А) [133].

#### **4.2. Разработка алгоритма управления процессом стендовых испытаний методом взаимной нагрузки с системой асинхронный двигатель – асинхронный генератор с обменом энергией по звену постоянного тока**

К схемам, предназначенным для испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, рассмотренным в п. 1.3, с системой асинхронный двигатель – асинхронный генератор с обменом энергией по звену постоянного тока относятся схемы с двумя преобразователями частоты (см. рис. 1.19 – 1.21). Анализ данных схемных решений показал, что схема, приведенная на рис. 1.21, является более совершенной ввиду того, что она лишена недостатков, присущих двух другим схемам.

Ниже рассмотрены вопросы автоматизации схемы испытаний АМ методом взаимной нагрузки с двумя преобразователями частоты и алгоритмизации работы данной схемы.

Для обеспечения возможности автоматизации схему, приведенную на рис. 1.21, необходимо дополнить рядом элементов, как показано на рис. 4.3.

Схема, приведенная на рис. 4.3, помимо общих с предыдущей схемой элементов 1–9 (см. рис. 4.1) имеет асинхронную нагрузочную машину 10 и дополнительные преобразователь частоты 11, вычислитель частоты напряжения 12 и датчик тока 13. Оба преобразователя частоты на данной схеме имеют неуправляемые выпрямители 2.1 и 11.1, звенья постоянного тока 2.2 и 11.2, управляемые выпрямители-инверторы 2.3 и 11.3. Испытуемым двигателем на схеме является асинхронная машина 8, нагрузочной – машина 10 [147].

Данная схема работает следующим образом. Напряжение трехфазной сети 1 подается на выпрямители 2.1 и 11.1 преобразователей частоты, после чего выпрямленный ток протекает через звенья постоянного тока 2.2 и 11.2, и подается на инверторы 2.3 и 11.3, после чего переменное напряжение требуемой частоты подается на асинхронные двигатели 8 и 10.

Для работы системы управления, оператором вносятся необходимые номинальные величины в задатчик параметров 3: ток статора  $I_{1H}$ , частота питающего напряжения  $f_{1H}$ , частота вращения  $n_H$ .

Далее с выходов управляемых выпрямителей-инверторов 2.3 и 11.3 на обмотки статора испытуемого двигателя 8 и нагрузочной асинхронной машины 10 соответственно одновременно подаются переменные напряжения, с постепенным

увеличением их частот  $f_1$  и  $f_2$  от нулевого значения. Частоты  $f_1$  и  $f_2$  необходимо увеличивать, сохраняя их равенство. Скорость увеличения частоты  $f_1$  задается системой управления 4 в соответствии с данными, получаемыми от датчиков тока 6, 13 и вычислителей частоты питающего напряжения 5, 12 и номинальными параметрами, введенными в задатчик 3 [156].

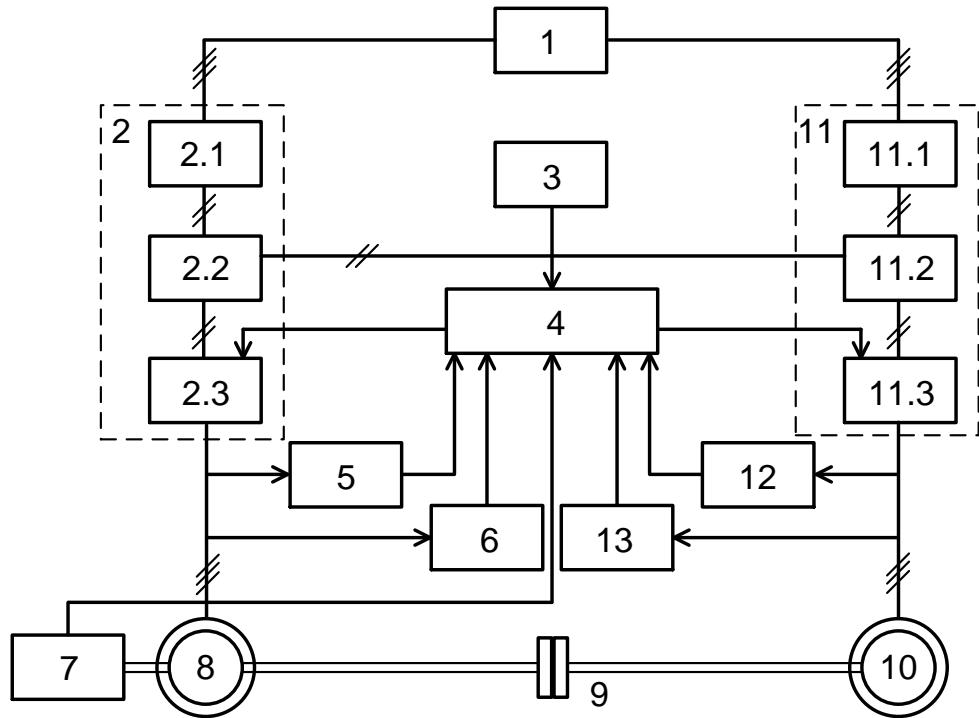


Рис. 4.3. Схема испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом электроэнергии по звену постоянного тока

Датчики тока 6 и 13 позволяют осуществить обратную связь по току статора асинхронных машин 8 и 10 и тем самым позволяют осуществить их плавный пуск без нагрузки на валу.

Значение частот напряжения  $f_1$  и  $f_2$  контролируется системой управления 4 с помощью вычислителей частоты питающего напряжения 5, 12 и увеличивается до значения номинального значения  $f_{1n}$ .

Далее снижается частота переменного напряжения  $f_2$ , подаваемого на нагрузочную асинхронную машину 10, что приводит к увеличению ее нагрузки в режиме генератора и нагрузки испытуемой асинхронной машины 8 в режиме двигателя.

Скорость снижения и конечное значение частоты  $f_2$ , задается системой управления 4 в соответствии с данными, получаемыми от датчиков тока 6, 13 и частоты вращения 7, вычислителя частоты питающего напряжения 5, 12 и введенными в задатчик параметров 3.

Датчик тока 6 позволяет осуществить обратную связь по току статора  $I_1$  нагрузочной асинхронной машины 8, и тем самым позволяет осуществить процесс ее нагружения с заданным значением тока  $I_1$ , незначительно превышающим значение  $I_{1n}$ .

Система управления 4 фиксирует достижение частотой вращения ротора  $n$  значения  $n_n$  в соответствии с показаниями, регистрируемыми с помощью датчика частоты вращения 7. Выполнение данного условия означает достижение режима работы с номинальной нагрузкой.

Представленное схемное решение защищено патентом РФ на полезную модель (прил. А) [118].

К схемам испытаний методом взаимной нагрузки с системой асинхронный двигатель – асинхронный генератор с обменом энергией по звену постоянного тока помимо схем с двумя преобразователями частоты, рассмотренным в п. 1.3, можно также отнести схему с общим выпрямителем, питающим два выпрямителя-инвертора (см. рис. 1.22).

Для обеспечения возможности автоматизации данную схему, необходимо дополнить рядом структурных элементов, как показано на рис. 4.4. Такой вид схемы испытаний получается путем объединения в схеме, приведенной на рис. 4.3, следующих параллельно включенных элементов: двух выпрямителей 2.1 и 11.1 в один выпрямитель и двух звеньев постоянного тока 2.2 и 11.2 в одно звено.

Схема (см. рис. 4.4) имеет следующие обозначения элементов, совпадающие с обозначениями на предыдущей схеме: 1, 3–13. На схеме также приведены неуправляемый выпрямитель 2, общее звено постоянного тока 14, управляемые выпрямители-инверторы 15 и 16.

Таким образом, данная схема испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки не имеет отличий в принципе работы от предыдущей схемы (см. рис. 4.3) и, следовательно, требует идентичный алгоритм эффективного управления процессом испытаний.

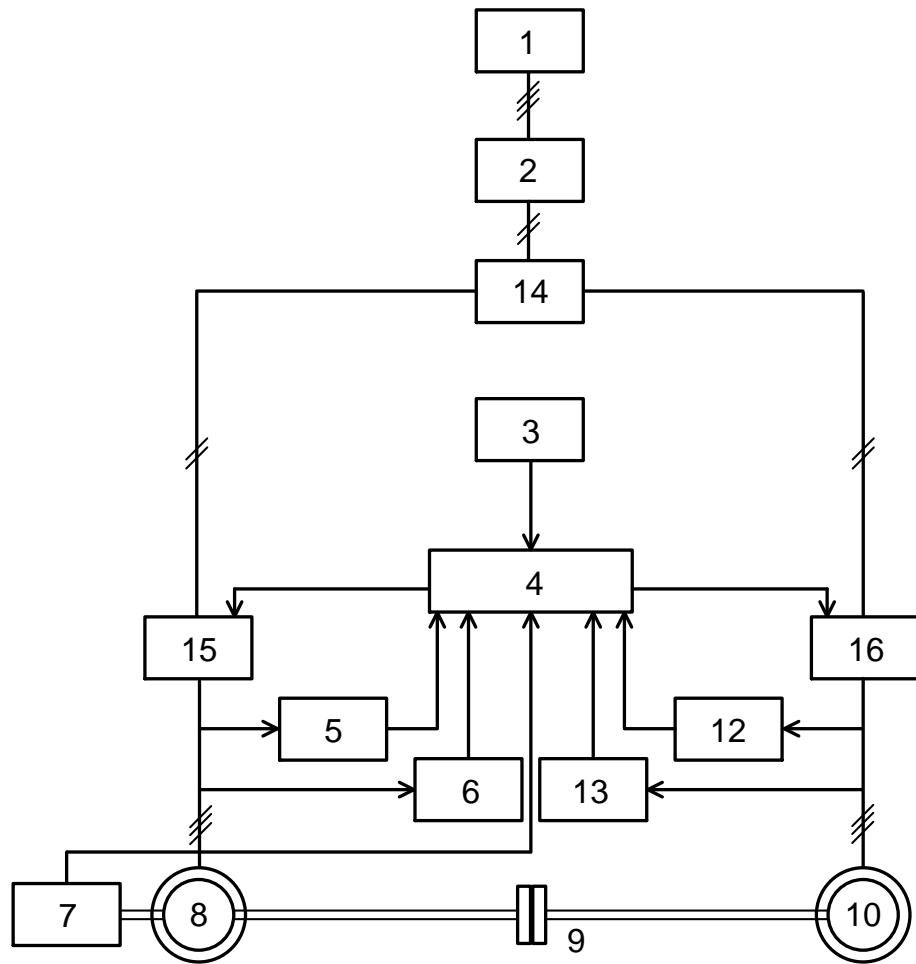


Рис. 4.4. Схема испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом электроэнергией по звену постоянного тока с общим неуправляемым выпрямителем

Дополнительная патентная защита приведенному техническому решению не требуется, т.к. данная схема является топологией схемы, приведенной на рис. 4.3 и, следовательно, является защищенной патентом РФ на полезную модель (прил. А) [118].

Алгоритм управления процессом испытаний схем, приведенных на рис. 4.3 и 4.4 приведен на рис. 4.5 [191, 196].

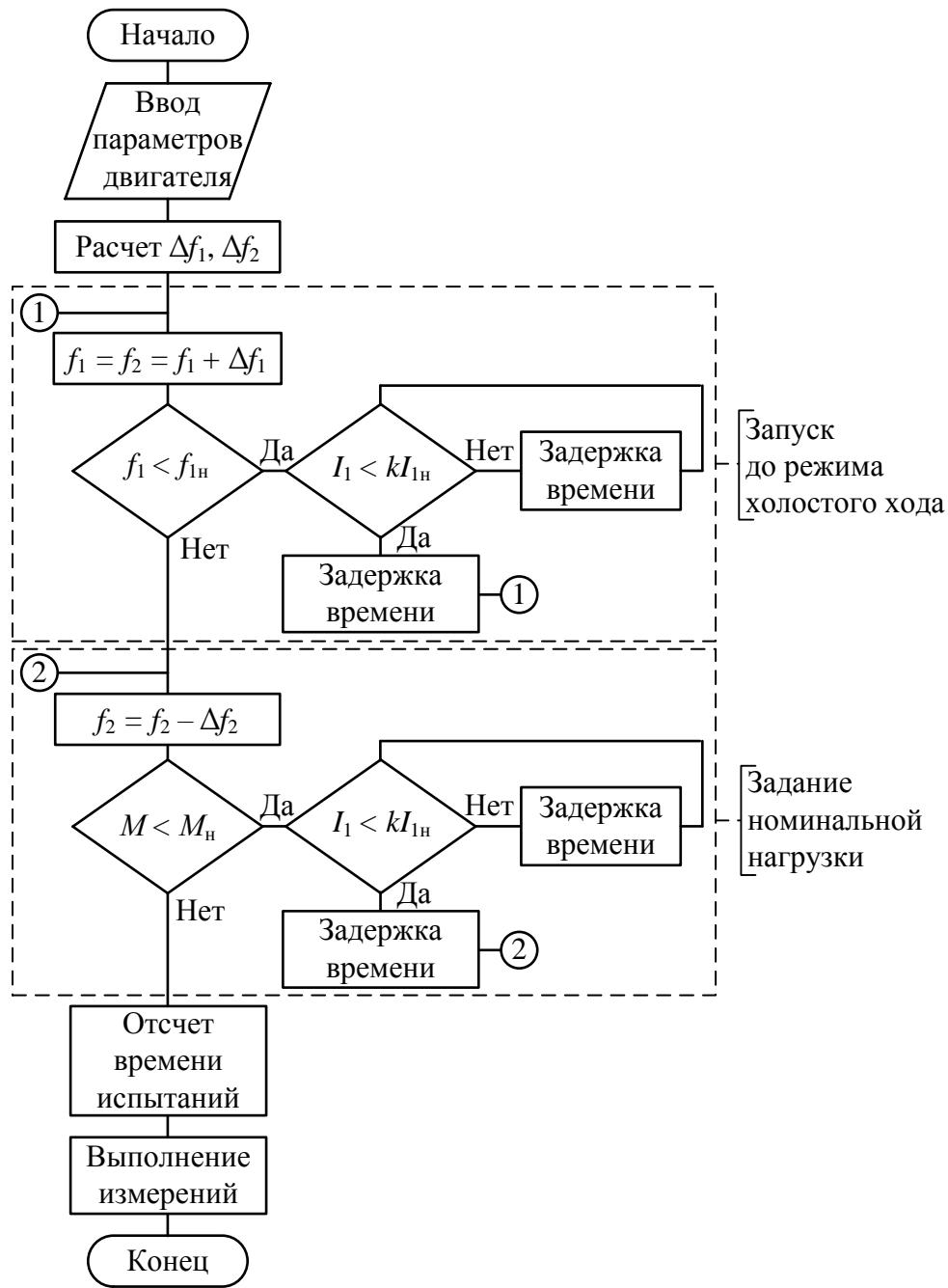


Рис. 4.5. Алгоритм управления процессом испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом энергией по звену постоянного тока

Представленный алгоритм управления процессом испытаний имеет общую часть с предыдущим алгоритмом (см. рис. 4.2) часть: перед запуском машин оператором должны быть заданы параметры испытуемого двигателя – номинальные ток  $I_{1n}$  и частота вращения  $n_n$ , по которым система управления определяет шаги регулирования частоты вращения  $\Delta f_1$  и  $\Delta f_2$ . Далее алгоритм позволяет обеспечить запуск машин без нагрузки на валу.

После запуска машин без нагрузки на валу с номинальной частотой питающего напряжения осуществляется задание номинальной нагрузки испытуемому двигателю. Далее обе машины работают в установившемся режиме в течение времени, необходимого для данного типа испытаний, и производятся измерения диагностических параметров. В том случае, если на стенде испытываются только однотипные машины, номинальные параметры испытуемого двигателя могут быть заданы однократно и при проведении последующих испытаний повторно не вноситься.

Данный алгоритм имеет следующие особенности.

Для запуска машин без нагрузки на валу с шагом  $\Delta f_1$  производится увеличение частоты питающего напряжения ( $f_1 = f_2$ ), подаваемого на машины 8 и 10 (см. рис. 4.3 и 4.4) пока не перестанет выполняться условие (1).

Каждый шаг увеличения частоты питающего напряжения  $f_1$  выполняется с задержкой по времени необходимой для обеспечения условия (2). Если за время задержки ток  $I_1$  не успел снизиться до значения  $kI_{1H}$ , задержка времени повторяется до выполнения условия (2). После выполнения данного условия обе асинхронные машины оказываются работающими в режиме холостого хода.

Далее осуществляется задание номинальной нагрузки путем постепенного снижения частоты  $f_2$  с шагом  $\Delta f_2$  пока не перестанет выполняться условие (3).

Каждый шаг снижения частоты питающего напряжения  $f_1$  выполняется с задержкой по времени необходимой для того, чтобы ток статора снизился до значения  $kI_{1H}$ . Если за время задержки ток  $I_1$  не успел снизиться до значения  $kI_{1H}$ , задержка времени повторяется до выполнения условия (2).

Выполнение условия (3) означает, что испытуемый двигатель 8 (см. рис. 4.3 и 4.4) имеет на валу номинальный момент нагрузки.

Принцип действия схем испытаний асинхронного двигателя, представленных на рис. 4.3 и 4.4, заложенный в алгоритм, приведенный на рис. 4.5, защищен патентом РФ на изобретение (прил. А) [118].

### 4.3. Разработка алгоритма управления процессом стендовых испытаний методом взаимной нагрузки с системой асинхронный двигатель – генератор постоянного тока

Преимуществом схемы с нагрузочным генератором постоянного тока, приведенной на рис. 1.24 над схемой, представленной на рис. 1.23, является значительное упрощение силовой части. Недостатком схемы, приведенной на рис. 1.24, является усложнение процесса включения обмотки якоря нагрузочного генератора в цепь питания управляемого инвертора, а также необходимость дополнительного источника питания для обмотки возбуждения. Для устранения недостатков рассмотренных схем в рамках настоящей работы предложена новая схема для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, приведенная на рис. 4.5 (прил. А) [122].

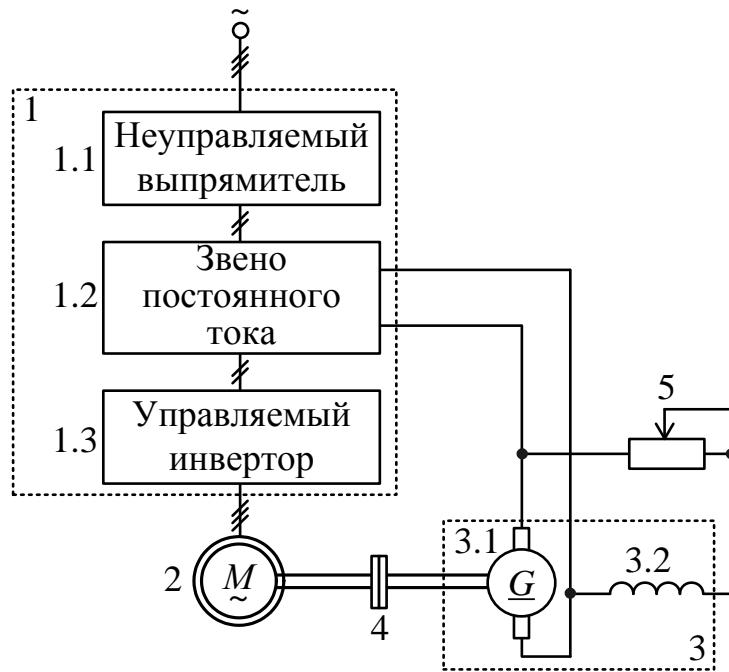


Рис. 4.5. Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока

В схеме (см. рис. 4.5) источником питания является двухзвененный преобразователь частоты 1, питающийся от трехфазной сети переменного тока, имеющий на входе неуправляемый выпрямитель. Обмотка возбуждения 3.2 нагрузочной электрической машины 3 питается от ЗПТ преобразователя 1.2 и создает магнитное поле, величина магнитного потока которого регулируется путем изменения сопротивления регулировочного реостата 5. В процессе испытаний при необходимости создания механической нагрузки асинхронному двигателю с помощью

регулировочного реостата 5 увеличивается магнитный поток нагрузочной машины 3. При этом величина электродвижущей силы обмотки якоря 3.1 становится больше, чем напряжение на выходе звена постоянного тока 1.2, следовательно, машина постоянного тока 3 нагружается в режиме генератора, создавая тем самым механический момент нагрузки на валу испытуемого асинхронного двигателя 2. Электрическая энергия, вырабатываемая нагрузочной машиной постоянного тока 3, передается испытуемому асинхронному двигателю 2 от обмотки якоря 3.1 через звено постоянного тока 1.2 и управляемый инвертор 1.3.

Схема испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, представленная на рис. 4.5 является наиболее простой из схем, в которых применяется нагрузочный генератор постоянного тока. Однако данная схема не учитывает особенности безопасного подключения обмотки якоря 3.1 нагрузочного генератора 3 к звену постоянного тока 1.2, позволяющие избежать короткого замыкания напряжения ЗПТ через якорную обмотку 3.1. Такие особенности на рис. 1.23 учтены наличием диодов 7 и 8, а на рис. 1.24 учтены совместной работой контактора и двух датчиков напряжения. С учетом данных замечаний ниже предлагаются два варианта дополнений схемы, позволяющие избавиться от названной проблемы.

Первый вариант совершенствования схемы (см. рис. 4.5), приведен на рис. 4.7. Данный вариант схемы дополнен контактором 6, который должен находиться в отключенном состоянии, пока напряжение якоря не совпадает с напряжением в ЗПТ [201]. После совпадения данных напряжений необходимо включить контактор 6, подключив тем самым обмотку якоря нагрузочной машины к ЗПТ. Далее усиливая возбуждение нагрузочной машины необходимо нагрузить ее в генераторном режиме, что приведет к нагружению асинхронной машины в двигательном режиме.

Более совершенным вариантом схемы с нагрузочным генератором постоянного тока является схема, приведенная на рис. 4.8. Данная схема сочетает в себе все преимущества предыдущих схем, является наиболее простой как в силовой части, так и в управлении подключением обмотки якоря 3.1 ПЧ 1 к ЗПТ [201]. При небольшой величине электродвижущей силы обмотки якоря 3.1 она оказывается отключена от ЗПТ посредством обратного диода 6. В процессе увеличения скорости вращения ротора асинхронного двигателя 2, пуск которого осуществляется без нагрузки на валу, и установлении тока обмотки возбуждения 3.2 значения достаточного для того, чтобы ЭДС обмотки якоря превысило значение напряжения звена постоянного тока, диод 6 окажется открыт. При этом генератор 3 начнет вырабатывать электроэнергию и отдавать ее управляемому инвертору 1.3.

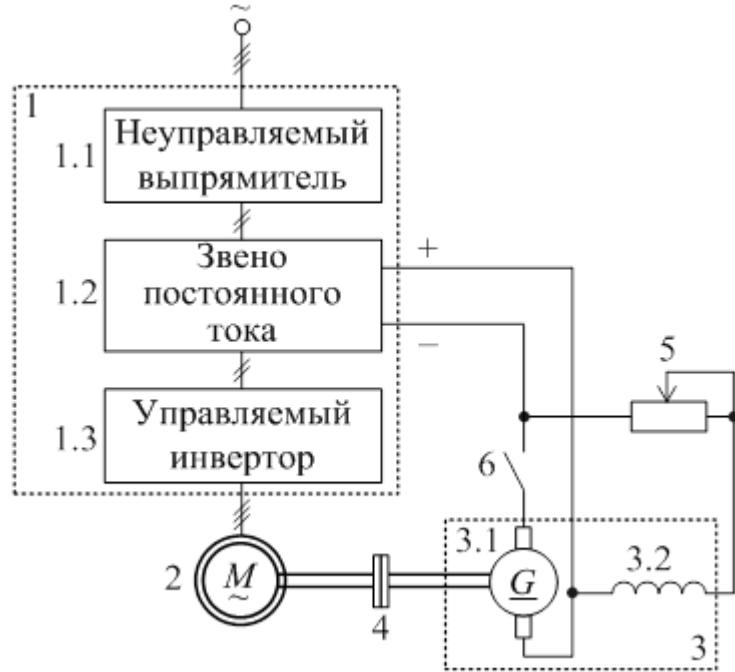


Рис. 4.7. Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока с подключением цепи якоря посредством контактора

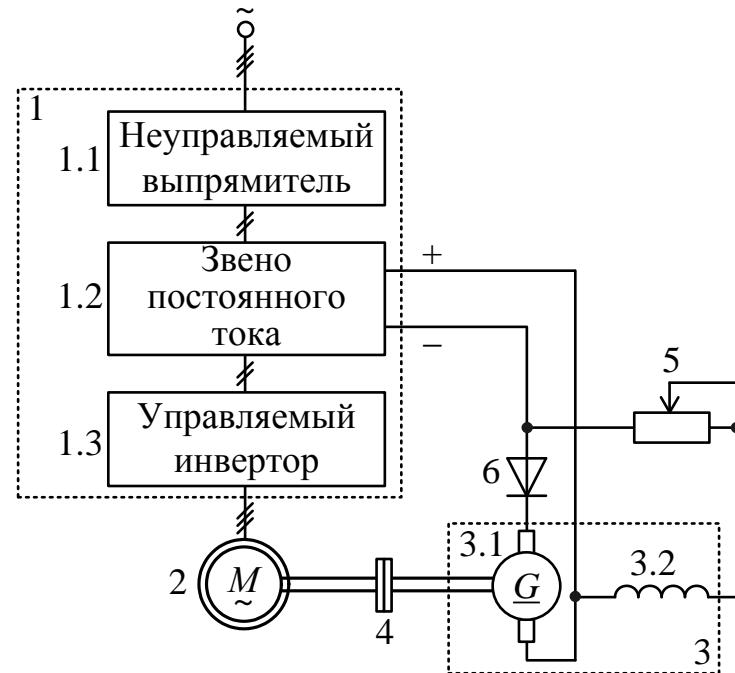


Рис. 4.8. Схема испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока с диодной защитой от короткого замыкания в цепи якоря

Для обеспечения возможности автоматизации схему, приведенную на рис. 4.7, необходимо дополнить рядом элементов, как показано на рис. 4.9.

Схема, приведенная на рис. 4.9, помимо общих для предыдущих схем (см. рис. 4.1 и 4.3) элементов 1 – 9 имеет нагрузочную машину постоянного тока 10, управляемый выпрямитель 11, контактор 13, датчики напряжения 12 и 14. Преобразователь частоты на данной схеме имеет неуправляемый выпрямитель 2.1, ЗПТ 2.2 и управляемый выпрямитель-инвертор 2.3. Испытуемым двигателем на схеме является асинхронная машина 8, нагрузочной – машина постоянного тока 10, обмотка якоря которой, подключена через контактор 13 к звену постоянного тока 2.2 преобразователя частоты 2, а обмотка возбуждения получает питание от управляемого выпрямителя 11.

Переменное напряжение сети 1 подается на вход ПЧ 2, далее оно преобразуется в постоянное посредством выпрямителя 2.1, передается в звено постоянного тока 2.2 и инвертируется с помощью управляемого инвертора 2.3. Напряжение на выходе управляемого инвертора 2.3 имеет заданные действующее значение и частоту.

Обмотка возбуждения генератора постоянного тока 10.2 получает питание от управляемого выпрямителя 11 и создает магнитное поле, величина магнитного потока которого регулируется путем подачи соответствующего управляющего сигнала на управляемый выпрямитель 11 от системы управления 4.

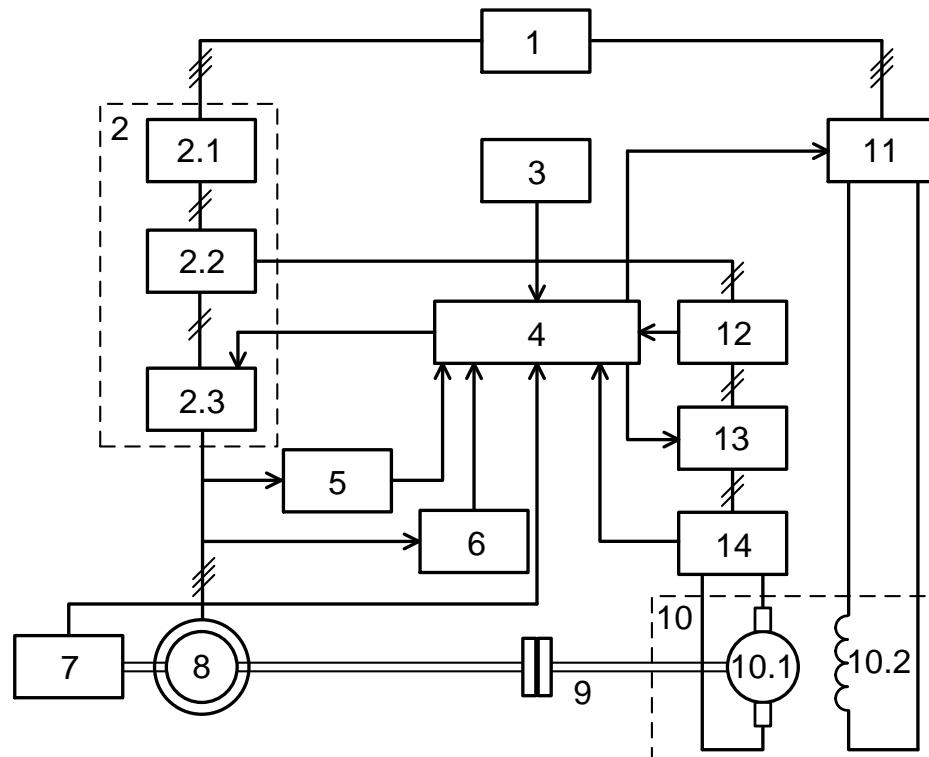


Рис. 4.9. Схема испытаний асинхронного двигателя с нагрузочной машиной постоянного тока и подключением цепи ее якоря посредством контактора

Процесс нагружения асинхронного двигателя выполняют в следующей последовательности. В исходном положении обмотке якоря 10.1 отключена от ЗПТ 2.2 частотного преобразователя 2, обмотка возбуждения 10.2 обесточена. В задатчик параметров сети и испытуемого асинхронного двигателя 3 оператором вводится расчетная частота питающего асинхронный двигатель напряжения  $f_{1n}$ , а также значения следующих номинальных величин асинхронного двигателя 8: тока статора  $I_{1n}$  и частоты вращения  $n_n$ .

Далее с выхода управляемого инвертора 2.3 на обмотку статора асинхронного двигателя 8 подается переменное напряжение, с постепенным увеличением его частоты  $f_1$  от нулевого значения. Скорость увеличения частоты  $f_1$  задается системой управления 4 в соответствии с данными, получаемыми от датчика тока 6, вычислителя частоты питающего напряжения 5 и введенными в задатчик параметров сети и испытуемого асинхронного двигателя 3.

Датчик тока 6 позволяет осуществить обратную связь по току статора  $I_1$  асинхронного двигателя 8, и тем самым позволяет осуществить его пуск с заданным значением тока  $I_1$ , незначительно превышающим значение  $I_{1n}$ . Значение частоты  $f_1$  контролируется системой управления 4 с помощью вычислителя частоты питающего напряжения 5 и увеличивается до значения  $f_{1n}$ . Далее при достижении частотой  $f_1$  значения равного  $f_{1n}$ , увеличивается напряжение  $U_b$  и ток  $I_b$ , подаваемые с управляемого выпрямителя 11 на обмотку возбуждения 10.2.

Далее при достижении электродвижущей силы обмотки якоря 10.1  $E_a$ , регистрируемой при помощи датчика напряжения 14, значения равного напряжению  $U_{зпт}$ , регистрируемого при помощи датчика напряжения 12, в ЗПТ 2.2 преобразователя частоты 2 обмотка якоря 10.1 посредством контактора 13 подключается к ЗПТ 2.2 частотного преобразователя 2.

Увеличение тока  $I_b$  приводит к неравенству  $E_a > U_{зпт}$  и, как следствие, увеличению нагрузки генератора постоянного тока 10 и асинхронного двигателя 8. Скорость увеличения и конечное значение тока  $I_b$  задается системой управления 4 в соответствии с данными, введенными в задатчик параметров сети и испытуемого асинхронного двигателя 3, а также получаемыми от датчиков тока 6 и частоты вращения 7.

Датчик тока 6 позволяет осуществить обратную связь по току статора  $I_1$  асинхронного двигателя 8, и тем самым позволяет осуществить процесс его нагружения с заданным значением тока  $I_1$ , незначительно превышающим значение  $I_{1n}$ .

Система управления 4 фиксирует равенство частоты вращения вала асинхронного двигателя  $n$  значения  $n_h$  по показаниям датчика частоты вращения 7. Выполнение данного условия означает достижение момента на валу двигателя номинального значения. Представленное схемное решение защищено патентом РФ на полезную модель (прил. А) [127].

Для обеспечения возможности автоматизации схему, приведенную на рис. 4.8, необходимо дополнить рядом элементов, как показано на рис. 4.10.

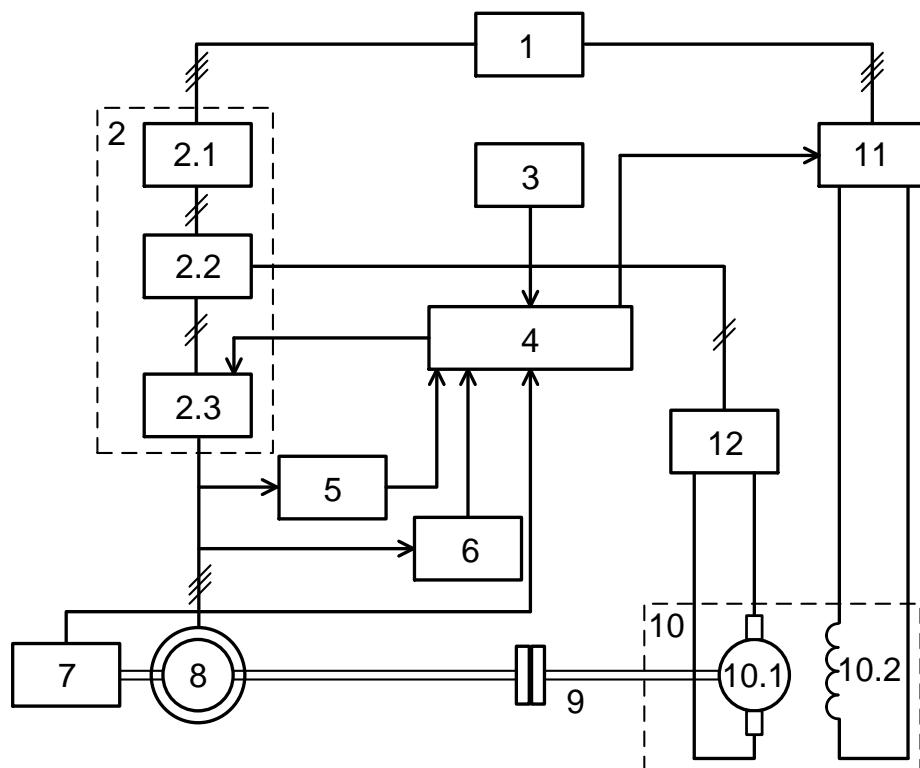


Рис. 4.10. Схема испытаний асинхронного двигателя с нагрузочной машиной постоянного тока и диодной защитой от короткого замыкания в цепи якоря

Схема, приведенная на рис. 4.10, помимо общих для предыдущих схем (см. рис. 4.1, 4.3 и 4.9) элементов 1 – 9 имеет нагрузочную машину постоянного тока 10, управляемый выпрямитель 11, диод 12. Преобразователь частоты на данной схеме имеет неуправляемый выпрямитель 2.1, звено постоянного тока 2.2 и управляемый выпрямитель-инвертор 2.3.

Испытуемым двигателем на схеме является асинхронная машина 8, нагрузочной – машина постоянного тока 10, обмотка якоря которой, подключена через диод 12 к звену постоянного тока 2.2 преобразователя частоты 2, а обмотка возбуждения получает питание от управляемого выпрямителя 11. Данная схема рабо-

тает аналогично схеме, приведенной на рис. 4.9: запуск асинхронного двигателя без нагрузки на валу осуществляется так же.

Отличие в работе схемы (см. рис. 4.10) заключается в процессе подключения обмотки якоря 10.1 к звену постоянного тока 2.2 преобразователя частоты 2 при нагружении машин.

Процесс нагружения асинхронного двигателя осуществляется следующим образом.

Стенд начинает работу при отключенной обмотке якоря 10.1 от звена постоянного тока 2.2 преобразователя частоты 2 и обесточенной обмотке возбуждения 10.2.

Далее при достижении частотой  $f_1$  значения равного  $f_{1n}$ , увеличивается напряжение  $U_b$  и ток  $I_b$ , подаваемые с управляемого выпрямителя 11 на обмотку возбуждения 10.2, что приводит к увеличению электродвижущей силы обмотки якоря 10.1  $E_a$ .

Пока электродвижущая сила обмотки якоря 10.1 меньше чем напряжение в звене постоянного тока 2.2  $U_{зпт}$  (то есть выполняется условие  $E_a < U_{зпт}$ ), диод 12 остается закрыт, следовательно, генератор постоянного тока 10 не нагружается электрической мощностью, а асинхронный двигатель 8 не нагружается механической мощностью.

Дальнейшее увеличение тока  $I_b$  приводит к неравенству  $E_a > U_{зпт}$  и, как следствие, увеличению нагрузки генератора постоянного тока 10 и асинхронного двигателя 8.

Представленное схемное решение защищено патентом РФ на полезную модель (прил. А) [125].

Алгоритм управления процессом испытаний схемы, представленной на рис. 4.9, приведен на рис. 4.11 [196].

В соответствии с данным алгоритмом необходимо выполнить следующие действия.

Для запуска двух машин без нагрузки на валу с шагом  $\Delta f_1$  производится увеличение частоты питающего напряжения  $f_1$ , подаваемого на машину 8 (см. рис. 4.9).

Увеличение частоты  $f_1$  осуществляется до тех пор, пока не перестанет выполняться условие, заключенное в первом условном блоке: частота напряжения, питающего испытуемый двигатель меньше ее номинального значения для данного асинхронного двигателя.

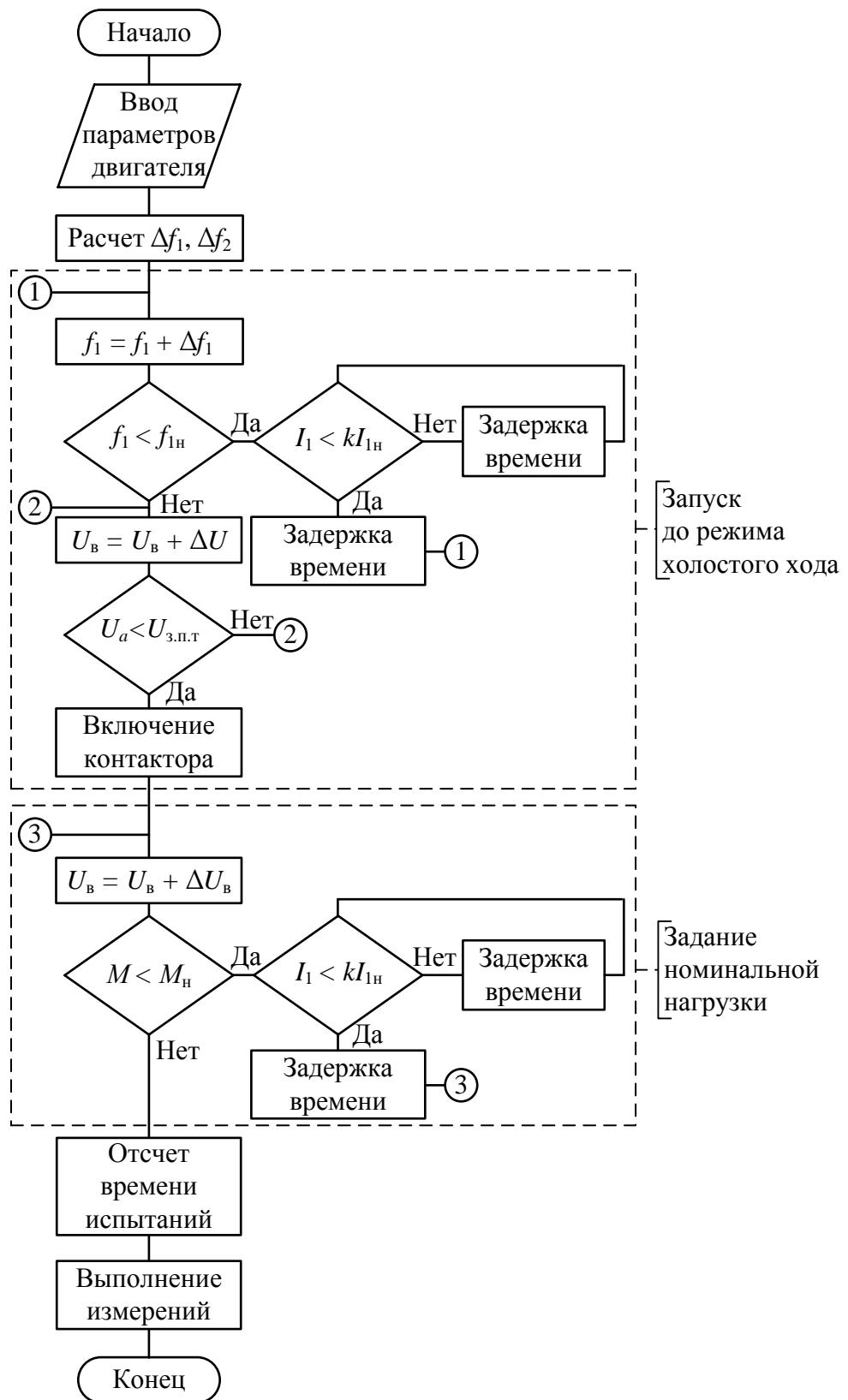


Рис. 4.11. Алгоритм управления процессом испытаний с нагрузочной машиной постоянного тока и подключением цепи ее якоря посредством контактора

Каждый шаг увеличения частоты питающего напряжения  $f_1$  выполняется с задержкой по времени необходимой для обеспечения условия (2).

Если за время задержки ток  $I_1$  не успел снизиться до значения  $kI_{1\text{н}}$ , задержка времени повторяется до выполнения условия (2).

После выполнения данного условия на обмотку возбуждения нагрузочной машины постоянного тока подается напряжение  $U_{\text{в}}$ , которое увеличивается с шагом  $\Delta U_{\text{в}}$  без выдержек времени пока не перестанет выполняться условие

$$U_a < U_{a\text{н}}, \quad (4.4)$$

где  $U_a$  – напряжение, на выводах обмотки якоря нагрузочной машины постоянного тока;  $U_{a\text{н}}$  – номинальное напряжение обмотки якоря нагрузочной машины.

Далее осуществляется включение контактора 13 (см. рис. 4.9), после чего обе электрические машины оказываются подключенными к источникам питания и работающими в режиме холостого хода.

Далее осуществляется задание номинальной нагрузки путем постепенного увеличения напряжения  $U_{\text{в}}$  с шагом  $\Delta U_{\text{в}}$  пока не перестанет выполняться условие (3).

Каждый шаг увеличения напряжения  $U_{\text{в}}$  выполняется с задержкой по времени необходимой для того, чтобы ток статора испытуемого асинхронного двигателя снизился до значения  $kI_{1\text{н}}$ .

Если за время задержки ток  $I_1$  не успел снизиться до значения  $kI_{1\text{н}}$ , задержка времени повторяется до выполнения условия (2).

После выполнения условия (3) испытуемый двигатель 8 (см. рис. 4.9) оказывается нагруженным номинальным моментом.

Принцип действия схемы испытаний асинхронного двигателя, заложенный в алгоритм, приведенный на рис. 4.11, изложен в патенте РФ на изобретение (прил. А) [135].

Алгоритм управления процессом испытаний схемы, представленной на рис. 4.10, приведен на рис. 4.12 [196].

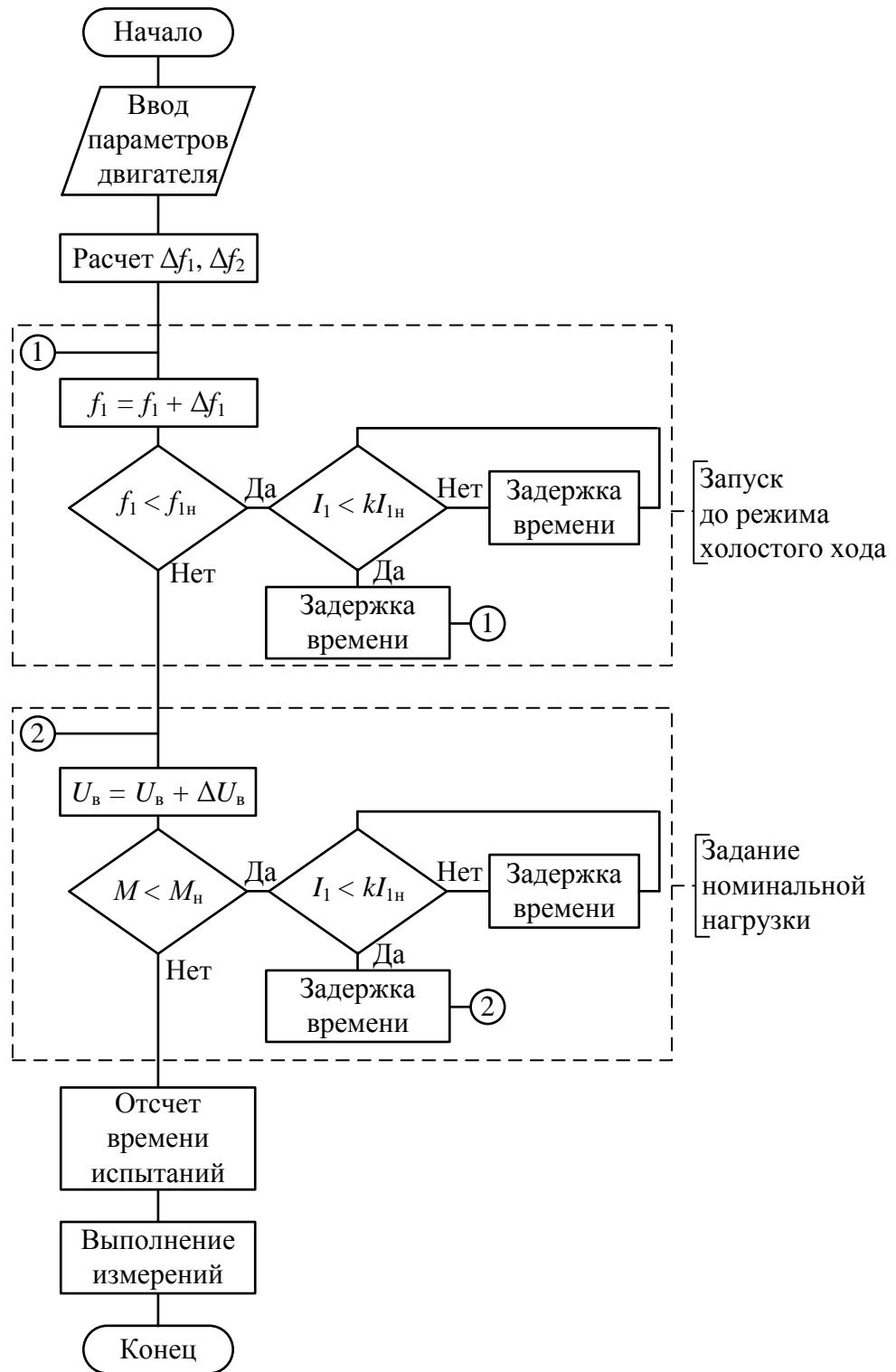


Рис. 4.12. Алгоритм управления процессом испытаний с нагрузочной машиной постоянного тока и диодной защитой от короткого замыкания в цепи якоря

Отличие данного алгоритма от предыдущего состоит в отсутствии блоков, обеспечивающих подключение цепи якоря к звену постоянного тока контактором в схеме, приведенной на рис. 4.9.

В соответствии с данным алгоритмом необходимо выполнить следующие действия.

Для запуска машин без нагрузки на валу с шагом  $\Delta f_1$  производится увеличение частоты питающего напряжения  $f_1$ , подаваемого на машину 8 (см. рис. 4.9) пока не перестанет выполняться условие (1).

Повышение частоты  $f_1$  выполняется пошагово с задержкой по времени. Если ток  $I_1$  не успел снизиться до значения  $kI_{1\text{н}}$  в течении задержки по времени, то она повторяется до выполнения условия (2). После выполнения условия (2) на обмотку возбуждения нагрузочной машины постоянного тока подается напряжение  $U_{\text{в}}$ , которое увеличивается с шагом  $\Delta U_{\text{в}}$ . При превышении напряжением якоря значения напряжения в ЗПТ открывается диод, после чего обмотка якоря оказываются подключенной в электрическую схему.

Далее осуществляется увеличение номинальной нагрузки путем пошагового повышения  $U_{\text{в}}$  на значение  $\Delta U_{\text{в}}$  пока условие (3) не перестанет выполнятся.

Повышение напряжения  $U_{\text{в}}$  выполняется пошагово с задержкой по времени необходимой для того, чтобы ток статора испытуемого асинхронного двигателя снизился до значения  $kI_{1\text{н}}$ . Если за время задержки ток  $I_1$  не успел снизиться до значения  $kI_{1\text{н}}$ , задержка времени повторяется до выполнения условия (2).

После выполнения условия (3) испытуемый двигатель 8 (см. рис. 4.10) оказывается нагруженным номинальным моментом.

Алгоритм, приведенный на рис. 4.12, в виде текстового пояснения принципа действия схемы испытаний асинхронного двигателя приведен в описании патента РФ на полезную модель (прил. А) [125].

#### **4.4. Разработка алгоритма выбора варианта схемы испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки**

Выше в настоящей работе представлен ряд новых схем, предназначенных для испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Это приводит к необходимости определить их область применения и принцип выбора при разработке электротехнических комплексов для испытаний электрических машин.

Каждая из предложенных схем имеет конструктивные особенности, определяющие ее эксплуатационные характеристики, степень воздействия на питающую сеть [149], себестоимость разработки и изготовления ЭТК для испытаний ТЭМ в целом. Следовательно, выбор конкретной схемы необходимо осуществлять с учетом всех значимых факторов.

Как показал анализ, выполненный в п. 1.3, наиболее совершенными схемами в плане отсутствия возможных недостатков по отношению к известным аналогам являются схемы, представленные на рис. 1.18, 1.21, 1.22, 4.8. Все данные схемы, а также аналогичные им автоматизированные схемы и присвоенные им условные номера типов схем приведены в табл. 4.1.

**Таблица 4.1 – Рекомендуемые к применению схемы испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки**

Тип схемы	Схема без автоматизации	Аналогичная схема с автоматизацией
1	Рис. 1.18	Рис. 4.1
2	Рис. 1.21	Рис. 4.3
3	Рис. 1.22	Рис. 4.4
4	Рис. 4.8	Рис. 4.10

Схемы, приведенные в табл. 4.1 имеют ряд существенных признаков, характеризующих их особенности эксплуатации. Наиболее существенные из них, поддающиеся количественному или качественному сравнению путем анализа без привлечения математического или физического моделирования, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Основные параметры различных типов схем испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки

Тип схемы	Элемент схемы, по которому происходит передача электроэнергии от нагрузочной машины к испытуемой	Количество ПЧ (вы- (вы- прямите- телей- инвер- торов)	Тип нагру- зочной машины	Влияние на электриче- скую сеть	Особенности измерения момента на валу
1	Сеть	1 (1)	Асинх-ронная	Наиболь-шее	Необходимо сложное спе-циальное оборудование
2	ЗПТ	2 (2)	Асинх-ронная	Среднее	Необходимо сложное спе-циальное оборудование
3	ЗПТ	– (2)	Асинх-ронная	Среднее	Необходимо сложное спе-циальное оборудование
4	ЗПТ	1 (1)	Генера-тор пос-тоянно-го тока (ГПТ)	Наимень-шее	Возможно вычисление момента по легкодоступ-ному значе-нию тока яко-ря ГПТ

В схемах испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки первого типа (с асинхронной нагрузочной машиной, одним преобразователем ча-стоты и обменом энергией по сети, см. рис. 1.18) обмотка статора испытуемого асинхронного двигателя подключается непосредственно в электрическую сеть. Следовательно, в данной схеме из сети будет потребляться реактивная мощность, необходимая для создания вращающегося магнитного поля асинхронной машины, что приведет к потреблению из сети относительно большого реактивного тока. Данное явление отсутствует в схемах других типов, т.к. в них источниками реак-тивной мощности для всех асинхронных машин являются выпрямители-инверторы, питаемые от неуправляемых выпрямителей и питающие обмотки ста-тора. Наибольшую значимость и необходимость учета реактивный ток, потребля-емый обмоткой статора асинхронной машины напрямую из сети, будет иметь при

разработке испытательных станций для асинхронных двигателей большой мощности.

Вопрос электромагнитной совместимости рассматриваемых схем испытаний с оборудованием предприятий, на которых данные схемы могут быть установлены, несомненно, требует учета множества факторов и выполнения достаточно большого объема расчетов. Однако анализ состава оборудования схем испытаний четырех типов (см. табл. 4.1) позволяет без расчетов дать качественную оценку относительной степени влияния данных схем на сеть за счет потребления реактивной мощности, а также токов высших гармоник. Наибольшее влияние на сеть будут оказывать схемы первого типа, что обусловлено высокой долей потребляемой реактивной мощности. Схемы второго и третьего типа будут иметь меньшее потребление реактивной мощности, но могут потреблять из сети ток с высоким коэффициентом несинусоидальности за счет одновременной работы в схеме двух источников напряжения, сформированного выпрямителями-инверторами посредством ШИМ.

Схемы второго и третьего типов имеют по два выпрямителя-инвертора, питающих обмотки статора асинхронных машин, благодаря чему данные схемы являются симметричными, что позволяет без каких-либо дополнительных переключений в схеме менять функциональную роль электрических машин – любая из двух машин может работать как испытуемый двигатель, другая при этом будет работать как нагрузочный генератор. Схемы первого типа не обладают данной симметрией и, следовательно, не позволяют осуществить смену функций электрических машин без переключений и дополнительного коммутационного оборудования.

Схемы четвертого типа (см. табл. 4.1, 4.2) имеют в качестве нагрузочной машины генератор постоянного тока, который может быть оторирован для измерения механического момента на его валу по току якоря. Следовательно, схемы данного типа не требуют сложного специального оборудования для измерения врачающегося момента на валу. Схемы остальных трех типов имеют в качестве нагрузочной асинхронную машину и требуют специального дорогостоящего оборудования для измерения момента.

Отмеченные выше особенности различных типов схем испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки являются одними из их наиболее важных эксплуатационных характеристик. Однако выбор той или иной схемы необходимо осуществлять в первую очередь исходя из того на сколько она соответствует параметрам испытуемых асинхронных двигателей и требованиям к испытаниям. Также критичным параметром является количество одновременно поступающих на испытательную станцию асинхронных двигателей. При поступлении на испытания

двигателей по одному в состав станции должна обязательно входить нагрузочная машина. В таком случае схемы четвертого типа позволяют испытывать асинхронные двигатели. Схемы остальных типов для обеспечения такой возможности должны быть дополнены штатным асинхронным нагрузочным генератором, наличие которого отпадает, если двигатели на испытания поступают как минимум парами.

Схемы, имеющие в своем составе штатный нагрузочный генератор, будут иметь большую суммарную себестоимость оборудования по сравнению с остальными схемами (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Особенности питания испытуемого асинхронного двигателя в схемах испытаний методом взаимной нагрузки и относительная электромагнитная совместимость схем

Тип схемы	Особенности напряжения, подаваемого на обмотку статора испытуемого асинхронного двигателя	Минимальное количество двигателей на испытательной станции	Относительная себестоимость испытательной станции
1	Синусоидальное	2* или 1	Низкая*
2	Образовано преобразователем частоты посредством ШИМ	2* или 1	Низкая*
3	Образовано выпрямителем-инвертором посредством ШИМ	2* или 1	Низкая*
4	Образовано преобразователем частоты посредством ШИМ	1	Высокая

\* – при отсутствии штатного асинхронного генератора в составе испытательной станции.

Однако оценивая себестоимость внедрения испытательного комплекса в целом, необходимо учитывать помимо стоимости отдельных единиц оборудования стоимость разработки всех элементов, включая стоимость научно-исследовательской работы, которая может значительно различаться у различных типов схем.

Исходя из изложенного предлагается следующий алгоритм выбора схемы испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, представленный на рис. 4.13.

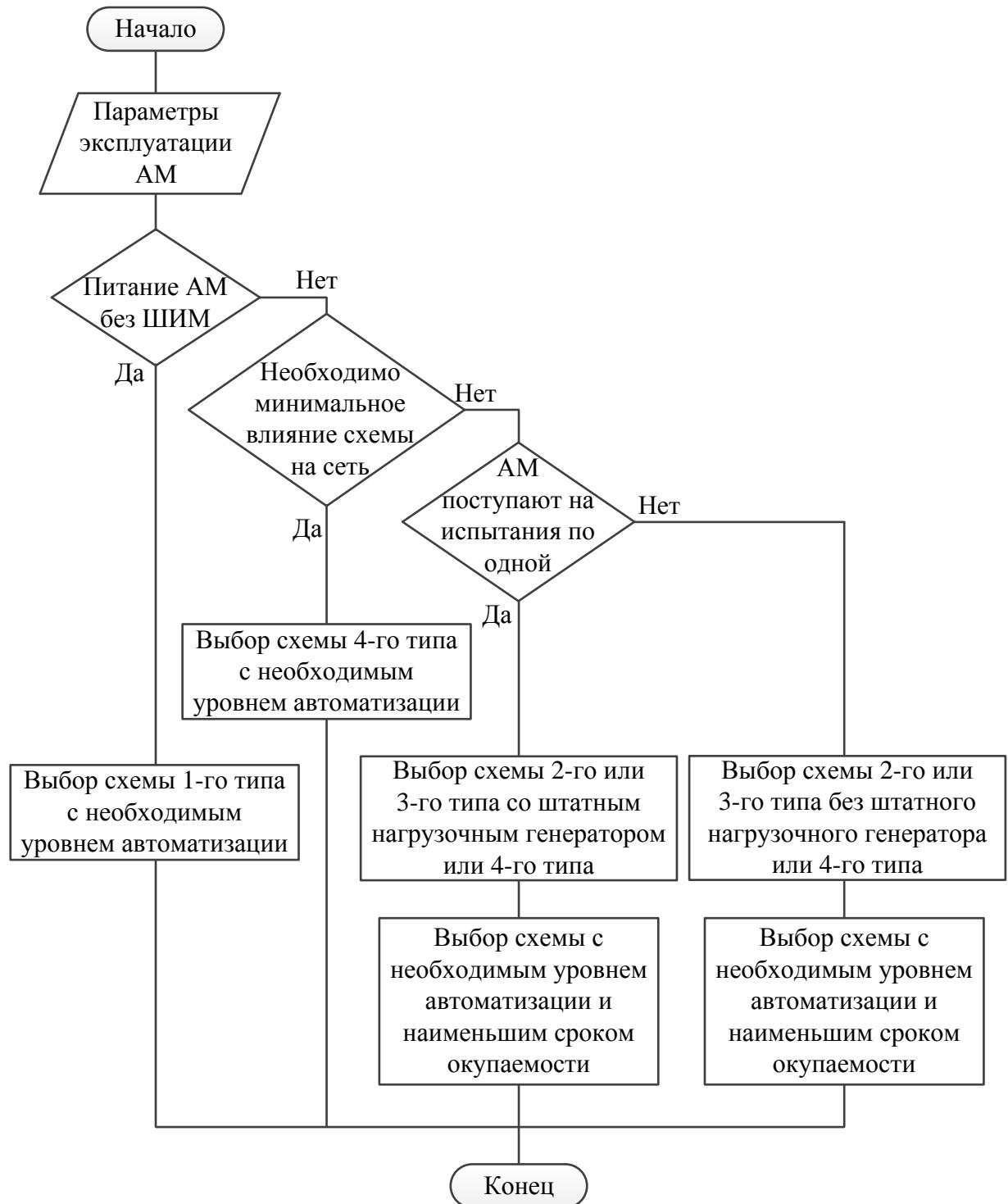


Рис. 4.13. Алгоритм выбора схемы испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки

Алгоритм реализуется следующим образом.

Входными данными для выполнения алгоритма являются параметры эксплуатации асинхронного двигателя, такие как форма напряжения (синусоидальное или сформированное посредством ШИМ), ограничения по влиянию на питающую электрическую сеть и количество двигателей одновременно поступающих на испытания.

Если в эксплуатации асинхронная машина получает питание от сети переменного тока с синусоидальным напряжением частотой 50 Гц, необходимо выбрать схему испытания первого типа.

Если необходимо иметь минимальное влияние схемы испытаний на электрическую сеть, то более всего подходят схемы четвертого типа.

Если асинхронные двигатели поступают на испытания по одному экземпляру, то подходят схемы четвертого типа без изменений. При этом схемы второго и третьего типа должны быть оснащены штатным нагрузочным асинхронным генератором. В остальных случаях подходят схемы второго, третьего и четвертого типа.

При возможности применения схем испытаний различных типов при выборе конкретной схемы необходимо исходить из требуемой степени автоматизации технологических процессов и экономических показателей внедрения нового оборудования.

Представленный алгоритм позволяет по достаточно простым параметрам сузить круг имеющихся схем испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки при выборе необходимой схемы. Кроме того алгоритм содержит ряд критериев, позволяющих выбрать конкретную схему испытаний. Однако в ряде случаев потребуется выполнение технико-экономического обоснования для осуществления окончательного выбора схемы испытаний.

#### **4.5. Выводы по четвертому разделу**

1. Разработаны силовые части схем электротехнических комплексов, предназначенных для испытания тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки, позволяющие автоматизировать процесс испытаний асинхронных двигателей при различных типах нагрузочных генераторов и различном пути обмена энергией между машинами.

2. Для предложенных автоматизированных схем испытаний асинхронных двигателей составлены алгоритмы эффективного управления процессом испытаний методом взаимной нагрузки.

3. Выполнен анализ особенностей предложенных схем испытаний различных типов. В результате проведенного анализа выполнена типизация схем по их параметрам, отмечены наиболее важные особенности их эксплуатации, которые необходимо учитывать при разработке электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки.

4. На основании выявленных эксплуатационных особенностей разработанных схем испытания предложен алгоритм, позволяющий осуществить выбор конкретной схемы при разработке испытательного комплекса.

## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ И ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Разработка электротехнических комплексов требует проведения всесторонних исследований особенностей их функционирования. Как правило, одним из важнейших направлений таких исследований является изучение влияния тех или иных технических решений, принятых при разработке сложных технических систем, на их эксплуатационные характеристики и качество выполнения поставленных перед ними задач.

Качество функционирования электротехнических комплексов, предназначенных для испытания электрических машин, помимо внутренних параметров во многом определяется внешними воздействиями. Как правило, в цеховых условиях, при высоком уровне автоматизации испытаний единственным значимым воздействием такого рода является изменение параметров напряжения питающей сети. Следовательно, в процессе проектирования названных электротехнических комплексов необходимо учитывать возможные воздействия сети на качество их функционирования.

Помимо внешних воздействий качество функционирования электротехнических комплексов также определяется оперативным управлением, направленным на достижение требуемых показателей.

В данном разделе приведены исследования влияния схемных решений и состава оборудования электротехнических комплексов для испытания индукторных асинхронных машин на гармонический состав потребляемых из сети токов и скачки напряжения в элементах схем, а также влияния внешних воздействий на качество функционирования. В результате выполненных исследований разработан способ управления процессом испытаний, позволяющий добиться снижения потерь в электротехническом комплексе.

### **5.1. Исследование влияния параметров и схем испытательных комплексов на гармонический состав тока, потребляемого из сети**

Наличие различных вариантов схем, работающих по аналогичному принципу и имеющих одинаковое назначение, требует обоснованного выбора одной из них в процессе проектирования комплекса для испытания асинхронных машин.

Проанализируем далее особенности эксплуатации данных схем и степень их влияния на сеть путем сравнительного анализа гармонического состава потребляемого тока и оценки их возможного коэффициента искажения синусоидальности кривой тока (по ГОСТ Р 54130-2010).

Схемы второго (рис. 5.1) и третьего типа (см. табл. 4.3) работают в идентичных условиях, принцип преобразований тока в них одинаков и, следовательно, гармонический состав токов, потребляемых данными типами схем, идентичен и отличается от гармонического состава токов, потребляемых схемами других типов.

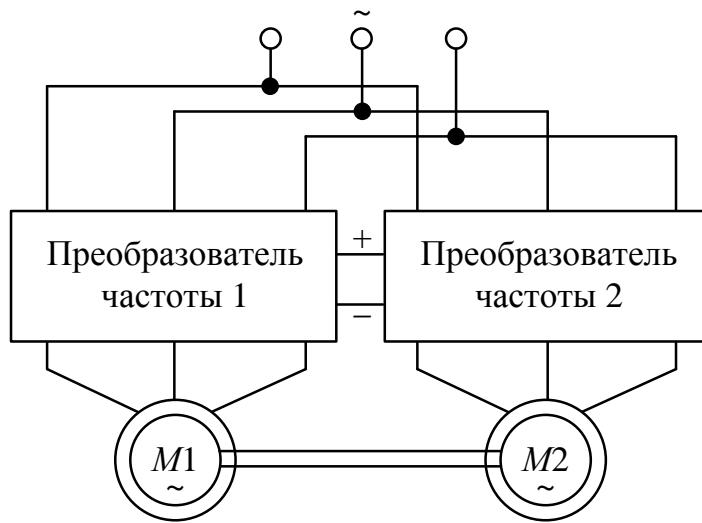


Рис. 5.1. Фрагмент схем испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с нагрузочным асинхронным генератором

Схемы, первого типа (см. табл. 4.3) подходят только для испытания асинхронных двигателей, предназначенных для работы от сети с синусоидальным напряжением. Следовательно, три остальные типа схем не являются для схем первого типа альтернативными. В связи с этим из дальнейшего сравнительного анализа схемы первого типа исключаем.

Схема, приведенная на рис. 1.17 [137] обеспечивает нагружение асинхронного двигателя до номинального режима только при строго определенной частоте питающего напряжения, не совпадающей с ее номинальным значением, что на практике означает нарушение требований, приведенных в ГОСТ Р 53472-2009. В связи с этим из дальнейшего сравнительного анализа данную схему также исключаем.

Альтернативой для схем второго и третьего типа (см. табл. 4.3) являются схемы четвертого типа (рис. 5.2).

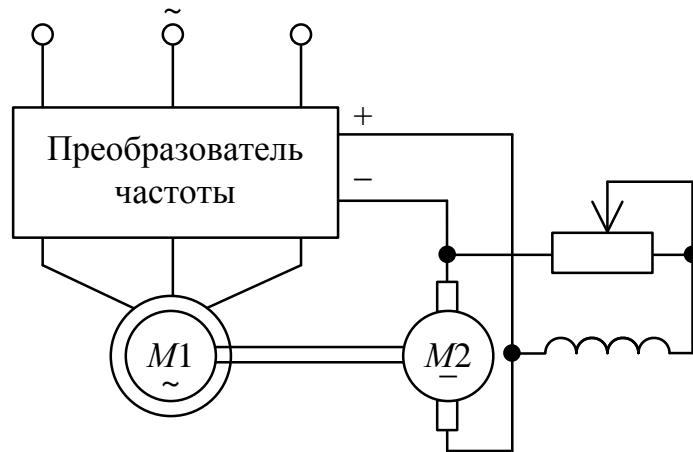


Рис. 5.2. Фрагмент схем испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока

Таким образом, качественная сравнительная характеристика необходима только для типов схем с нагрузочным асинхронным генератором, приведенных на рис. 5.1 (схемы второго и третьего типов), и с нагрузочным генератором постоянного тока, приведенных на рис. 5.2 (схемы четвертого типа).

Следует отметить, что все перечисленные схемы испытаний имеют в своем составе преобразователи частоты, осуществляющие широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) напряжения, подаваемого на обмотку статора асинхронной машины. ШИМ напряжения на выходе преобразователя частоты является причиной несинусоидальности тока, потребляемого им из сети [187]. При достаточно большой мощности испытательного комплекса это может послужить причиной нарушений в работе подключенного к той же сети электрооборудования.

Применение математических моделей, представленных в разд. 3 настоящей работы, позволяет найти ток, протекающий на выходе выпрямителя  $i_{\text{вып}}$ , зная который, можно рассчитать ток, протекающий по фазе  $A$  сети, следующим образом:

$$i_A(t) = \begin{cases} i_{\text{вып}}(t), & \text{если } [u_A(t) > u_B(t)] \cap [u_A(t) > u_C(t)]; \\ -i_{\text{вып}}(t), & \text{если } [u_A(t) < u_B(t)] \cap [u_A(t) < u_C(t)]; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5.1)$$

где  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  – фазные напряжения в сети.

Ток фазы  $B$  можно найти следующим образом:

$$i_B(t) = \begin{cases} i_{\text{вып}}(t), & \text{если } [u_B(t) > u_A(t)] \cap [u_B(t) > u_C(t)]; \\ -i_{\text{вып}}(t), & \text{если } [u_B(t) < u_A(t)] \cap [u_B(t) < u_C(t)]; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5.2)$$

Аналогичным образом можно найти ток фазы С:

$$i_C(t) = \begin{cases} i_{\text{вып}}(t), & \text{если } [u_C(t) > u_B(t)] \cap [u_C(t) > u_A(t)]; \\ -i_{\text{вып}}(t), & \text{если } [u_C(t) < u_B(t)] \cap [u_C(t) < u_A(t)]; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5.3)$$

Пример расчета тока фазы А, потребляемого из сети при испытании асинхронного двигателя типа 5А80МА8 номинальной мощностью  $P_n = 0,37$  кВт для схемы с нагрузочным асинхронным генератором (см. рис 5.1) при частоте ШИМ равной 4000 Гц приведен на рис. 5.3.

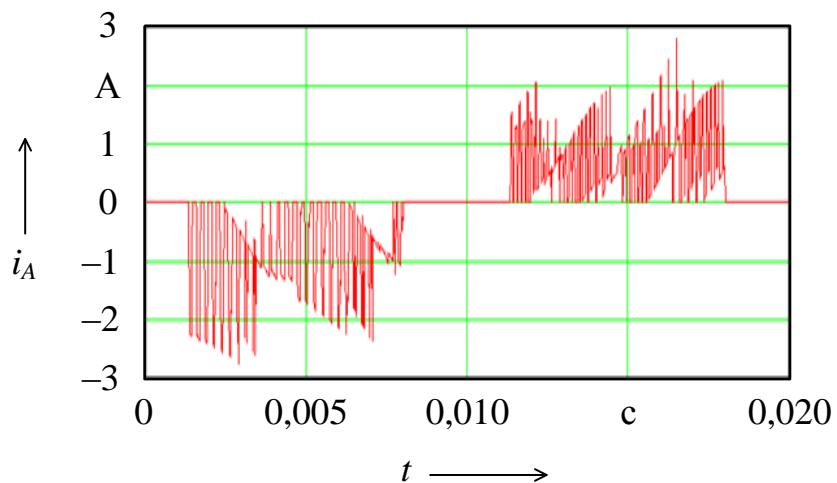


Рис. 5.3. Фазный ток, потребляемый из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 0,37 кВт с нагрузочным асинхронным генератором

Гармонический состав данного тока представлен на рис. 5.4. Для компактности отображения приведены гармоники и интергармоники с номерами не выше восьмой.

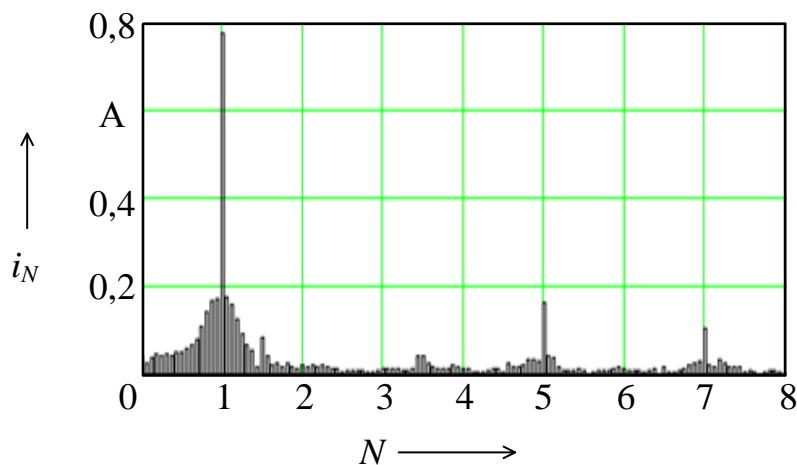


Рис. 5.4. Гармонический состав тока, потребляемого из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 0,37 кВт с нагрузочным асинхронным генератором

Также следует отметить, что достаточно высокие значения (сопоставимые с основной гармоникой) имеют гармоники близкие к кратности  $4000 \text{ Гц} / 50 \text{ Гц} = 80$  (рис. 5.5).

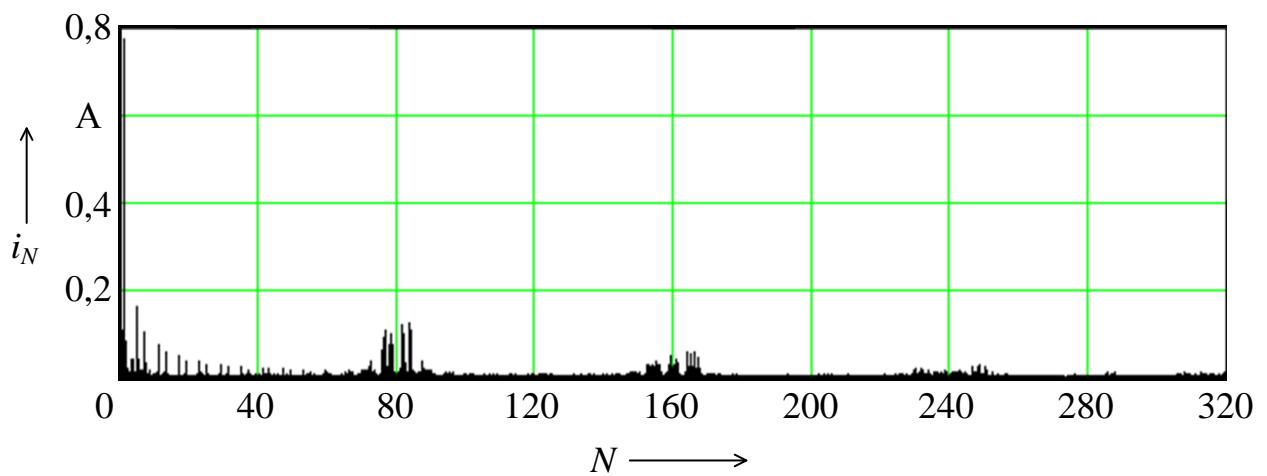


Рис. 5.5. Гармонический состав тока, потребляемого из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 0,37 кВт с нагрузочным асинхронным генератором

Расчетный ток фазы  $A$ , потребляемый из сети схемой с нагрузочным генератором постоянного тока (см. рис. 5.2) при тех же параметрах испытуемого асинхронного двигателя и соответствующего ему по мощности генератора постоянного тока, приведен на рис. 5.6.

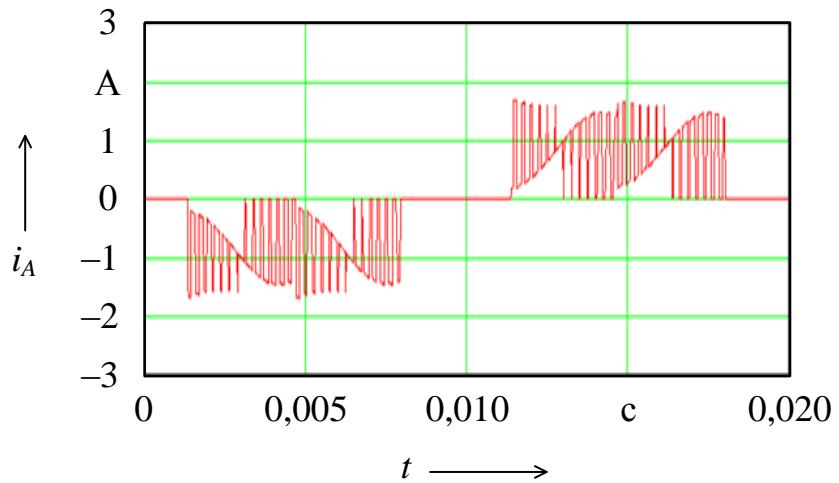


Рис. 5.6. Фазный ток, потребляемый из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 0,37 кВт с нагрузочным генератором постоянного тока

Гармонический состав данного тока представлен на рис. 5.7. Основной отличительной особенностью гармонического состава тока, потребляемого схемой с нагрузочным ГПТ, является то, что амплитуды интергармоник имеют значительно более низкие значения, чем в предыдущем случае (см. рис. 5.4).

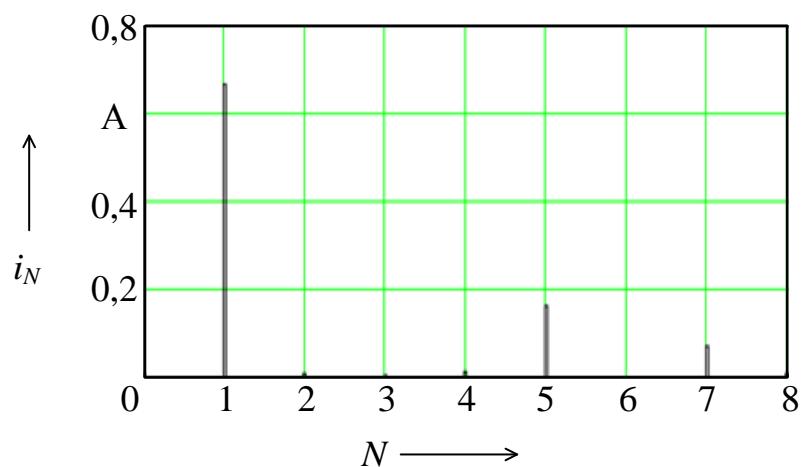


Рис. 5.7. Гармонический состав тока, потребляемого из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 0,37 кВт с нагрузочным генератором постоянного тока

Анализ результатов расчета (рис. 5.3–5.7) позволяет сделать вывод о том, что схема с асинхронным нагрузочным генератором потребляет из сети ток, который содержит помимо 5-й, 7-й и др. нечетных гармоник не кратных трем, также

широкий спектр интергармоник с относительно высокой амплитудой. В схеме с нагрузочным генератором постоянного тока амплитуды интергармоник значительно ниже. Физически это объясняется тем, что в схеме с ГПТ присутствует только один источник ШИМ, а в схеме с АГ – сразу два источника с ШИМ различной частоты, работающих одновременно.

Анализ результатов расчета токов для двигателей номинальной мощностью  $P_n = 5,5$  (рис. 5.8–5.11) и  $P_n = 37$  кВт (рис. 5.12–5.15) приводит к тем же выводам.

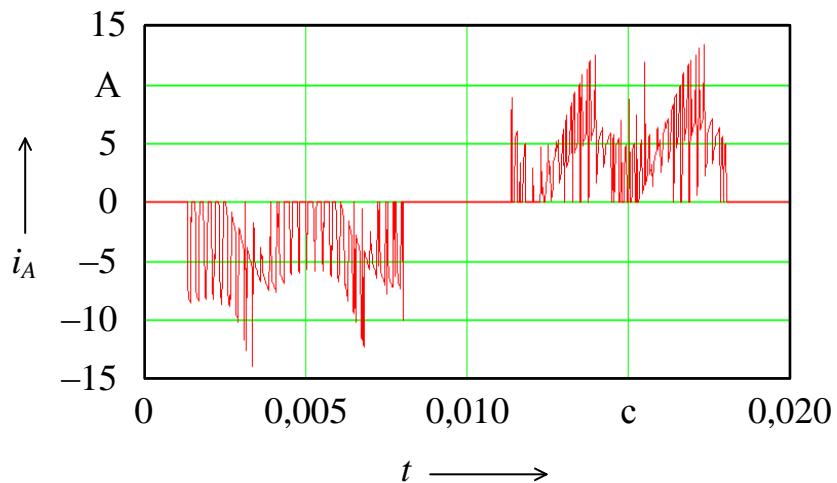


Рис. 5.8. Фазный ток, потребляемый из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 5,5 кВт с нагрузочным асинхронным генератором

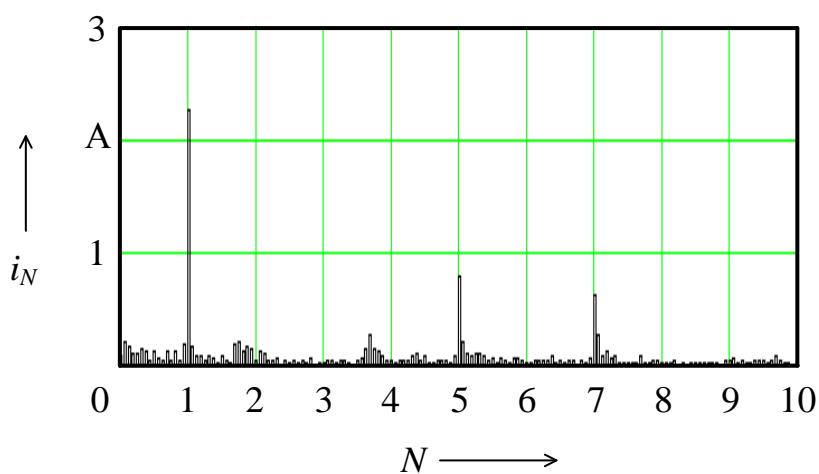


Рис. 5.9. Гармонический состав тока, потребляемого из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 5,5 кВт с нагрузочным асинхронным генератором

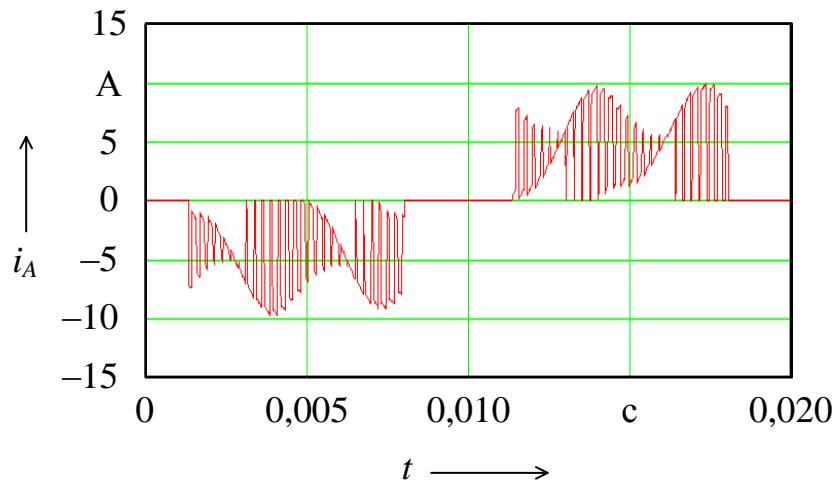


Рис. 5.10. Фазный ток, потребляемый из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 5,5 кВт с нагрузочным генератором постоянного тока

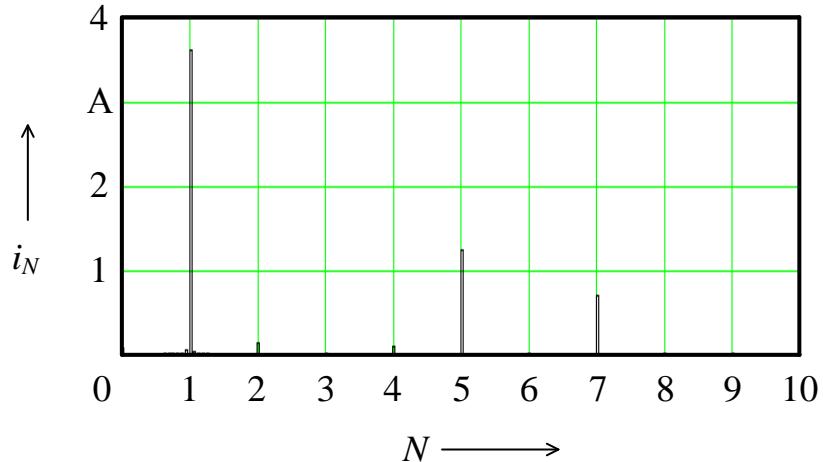


Рис. 5.11. Гармонический состав тока, потребляемого из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 5,5 кВт с нагрузочным генератором постоянного тока

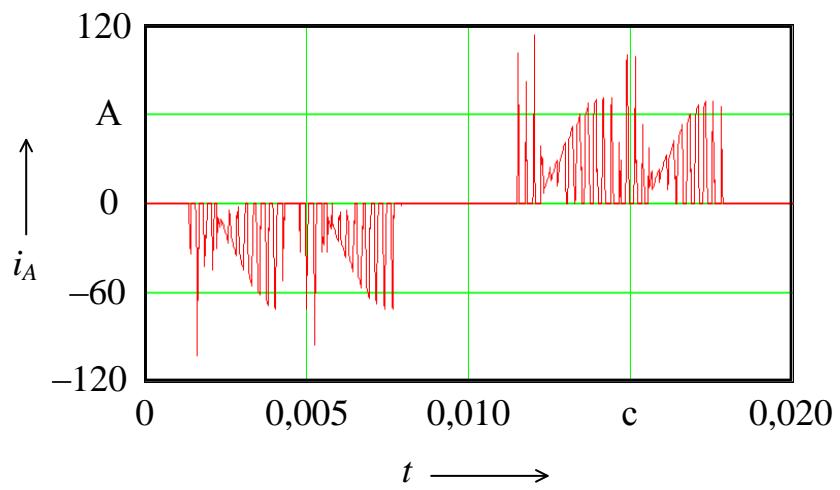


Рис. 5.12. Фазный ток, потребляемый из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 37 кВт с нагрузочным асинхронным генератором

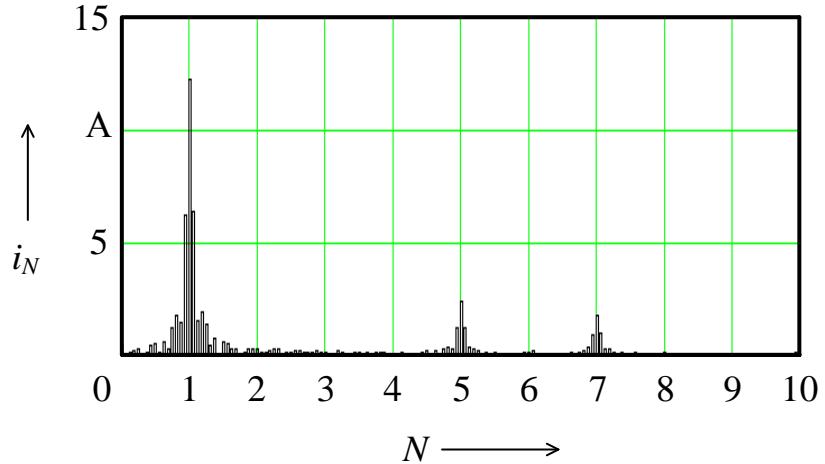


Рис. 5.13. Гармонический состав тока, потребляемого из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 37 кВт с нагрузочным асинхронным генератором

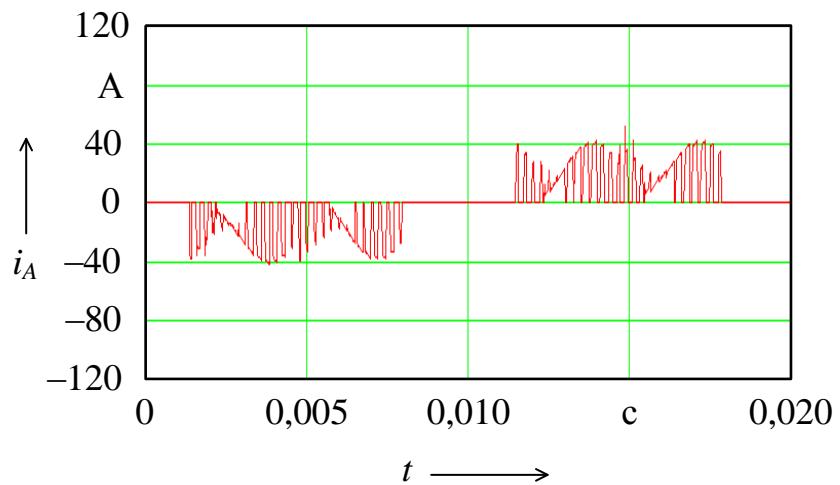


Рис. 5.14. Фазный ток, потребляемый из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 37 кВт с нагрузочным генератором постоянного тока

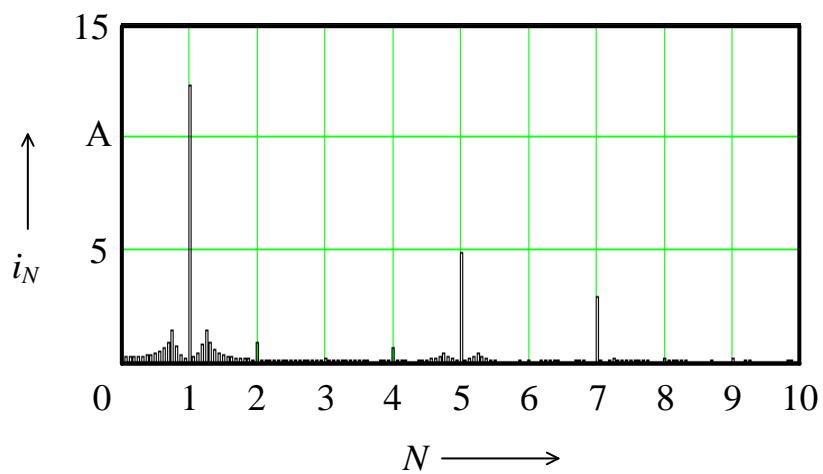


Рис. 5.15. Гармонический состав тока, потребляемого из сети схемой испытания асинхронных двигателей мощностью 37 кВт с нагрузочным генератором постоянного тока

Для количественного сравнения влияния особенностей различных схем рассчитан коэффициент искажения синусоидальности кривой тока для рассмотренных номинальных мощностей асинхронных двигателей [42]. Результаты данного расчета приведены на рис. 5.16.

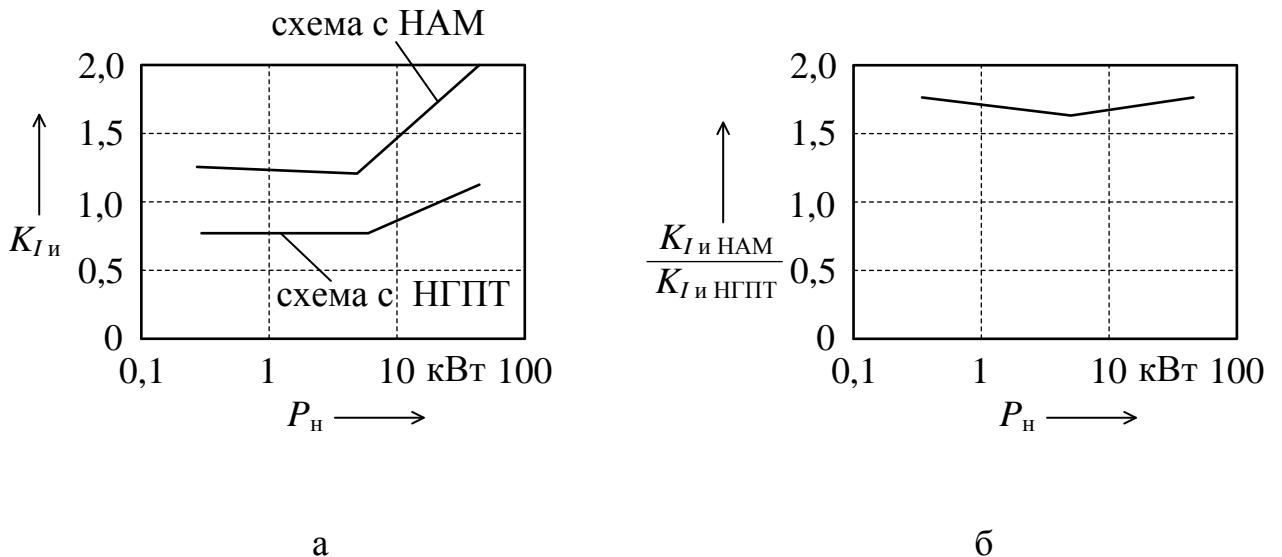


Рис. 5.16. Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока при различных номинальных мощностях испытуемых машин

Проведенный сравнительный анализ влияния на сеть комплексов испытаний асинхронных машин, применяющих метод взаимной нагрузки, в диапазоне номинальных мощностей двигателей от 0,37 кВт до 37 кВт при допущении, что питающая сеть имеет бесконечно большую мощность, позволяет сделать следующие выводы.

Выполненные теоретические исследования, показали, что коэффициент искажения синусоидальности кривой тока  $K_{I_i}$  в диапазоне номинальных мощностей испытуемого двигателя от 0,37 кВт до 37 кВт на входе схемы с НАМ лежит в диапазоне от 1,30 до 2,00, для схемы с НГПТ – в диапазоне от 0,75 до 1,15. При этом отношение данных коэффициентов в рассмотренном диапазоне номинальных мощностей лежит в пределах от 1,62 до 1,72 (рис. 5.16, б). Следовательно, схемы испытаний АМ с НГПТ обладают лучшими показателями электромагнитной совместимости. В случае критического значения данного показателя именно схемы с НГПТ должны иметь преимущество при выборе в процессе проектирования электротехнических комплексов для испытания АМ методом взаимной нагрузки.

## 5.2. Исследование переходных режимов работы в звене постоянного тока испытательных комплексов

В схемах испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки для питания электрических машин применяются один или два выпрямителя-инвертора, которые могут являться составной частью преобразователей частоты (см. рис. 1.21) или быть отдельными устройствами (см. рис. 1.22).

Конденсаторы, подключенные к входам выпрямителей-инверторов данных схем должны учитывать особенности работы при взаимной нагрузке электрических машин с передачей энергии по звену постоянного тока. Следовательно, в данном случае требуется оценка особенностей условий работы конденсаторов в данных схемах.

Таким образом, для различных схем испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки требует решения задача определения или уточнения необходимой величины емкости конденсатора в звене постоянного тока.

Проведем анализ зависимости скачков напряжения и тока конденсатора от его емкости при различных номинальных мощностях испытуемых машин. Для расчета данных параметров конденсатора в различных схемах взаимной нагрузки применим математические модели, представленные в разд. 3.

Результаты расчета максимальных значений скачков напряжения на конденсаторе  $U_{k\max}$  и действующих значений тока  $I_k$  для установившегося режима работы при различных номинальных мощностях на выходе испытуемых двигателей  $P_h$  приведены на рис. 5.17.

При расчете схем второго и третьего типа (см. табл. 4.1), испытуемая и нагрузочная асинхронные машины (НАМ) принимались с идентичными параметрами. Различие в схемах второго и третьего типа состоит в том, что два параллельно включенных выпрямителя в схемах второго типа заменены на один выпрямитель в схемах третьего типа, и соответственно два параллельно включенных конденсатора заменены на один. В связи с этим результаты моделирования данных двух типов схем объединены на рис. 5.17, а, в, д. При расчете схемы с двумя ПЧ (второй тип схем) в качестве емкости  $C$  принята сумма емкостей конденсаторов обоих ЗПТ [158].

При расчете схемы четвертого типа (см. табл. 4.1) нагрузочный ГПТ принят той же номинальной мощности, что и испытуемый асинхронный двигатель. Результаты моделирования схем данного типа представлены на рис. 5.17, б, г, е.

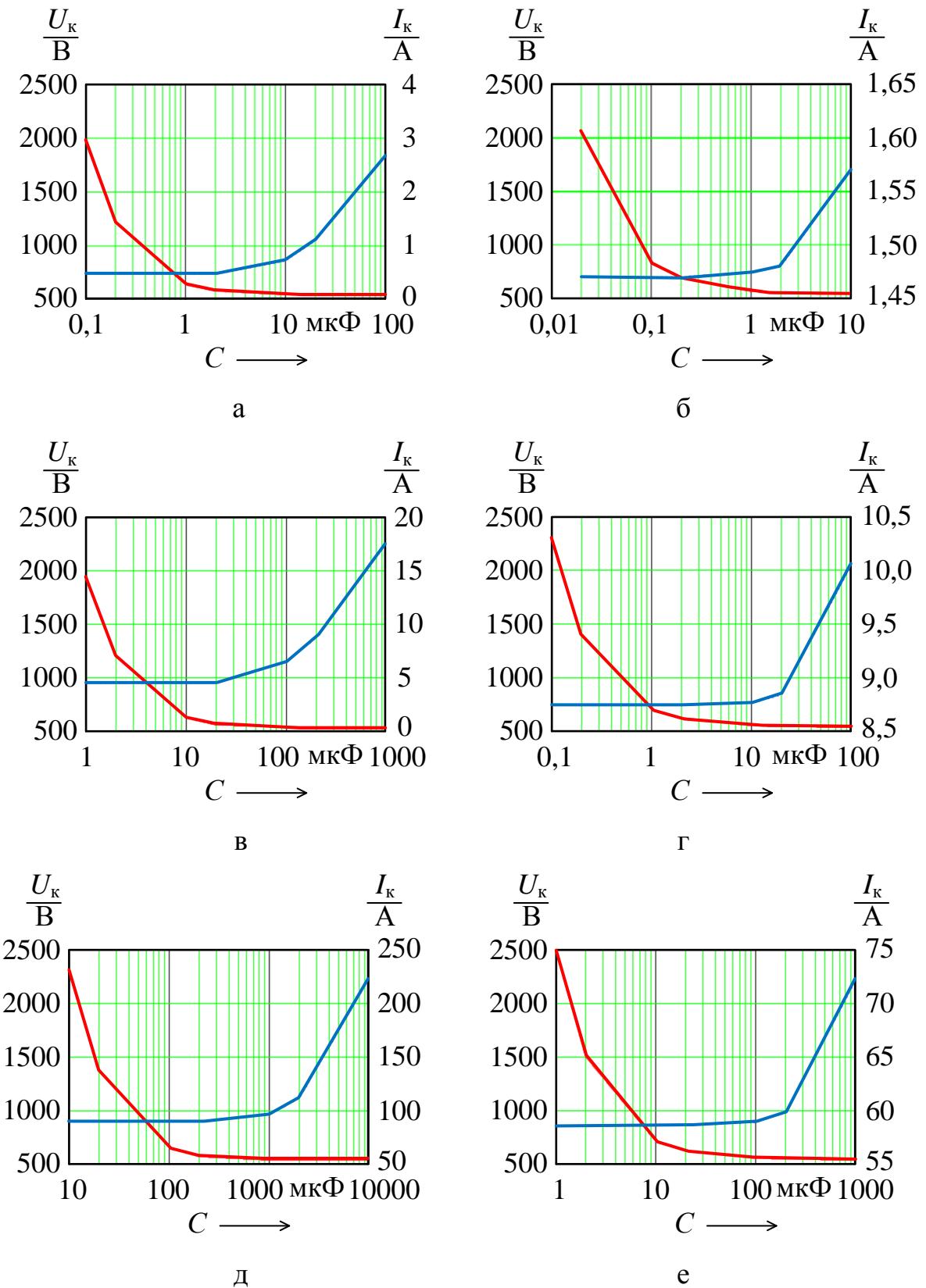


Рис. 5.17. Максимальное напряжение и действующее значение тока конденсатора при различных параметрах схемы:  
 а –  $P_h = 0,37 \text{ кВт (HAM)}$ ; б –  $P_h = 0,37 \text{ кВт (НГПТ)}$ ;  
 в –  $P_h = 5,5 \text{ кВт (HAM)}$ ; г –  $P_h = 5,5 \text{ кВт (НГПТ)}$ ;  
 д –  $P_h = 37 \text{ кВт (HAM)}$ ; е –  $P_h = 37 \text{ кВт (НГПТ)}$

На графиках (см. рис. 5.17) сплошной линией показаны максимальные значения скачков напряжения  $U_k$  в звене постоянного тока, пунктиром – действующее значение тока конденсатора  $I_k$ .

Анализ результатов выполненного математического моделирования схем взаимной нагрузки асинхронных машин для установившегося режима работы показывает, что с увеличением емкости конденсатора ЗПТ максимальные значения  $U_k$  снижаются экспоненциально и стремятся к некоторой постоянной величине. Однако при увеличении емкости выше некоторого значения начинает резко возрастать действующее значение тока конденсатора (см. рис. 5.17).

Сравнение результатов моделирования схем с НАМ и НГПТ показывает, что наличие в схеме НГПТ, подключенного к звену постоянного тока, значительно снижает пики напряжения на конденсаторе, что приводит к уменьшению необходимых значений емкости для всего ряда мощностей  $P_h$ .

На практике необходимое значение емкости конденсатора определяется его способностью ограничить пики напряжения в ЗПТ до определенного уровня. Математическое моделирование позволило определить значения емкости ЗПТ необходимые для ограничения напряжения в установившемся режиме работы схемы на уровне  $U_k \leq 550$  В ( $C_{550}$ ),  $U_k \leq 600$  В ( $C_{600}$ ),  $U_k \leq 800$  В ( $C_{800}$ ),  $U_k \leq 1000$  В ( $C_{1000}$ ), графики зависимости которых от номинальной мощности испытуемого двигателя для схемы с НАМ приведены на рис. 5.18.

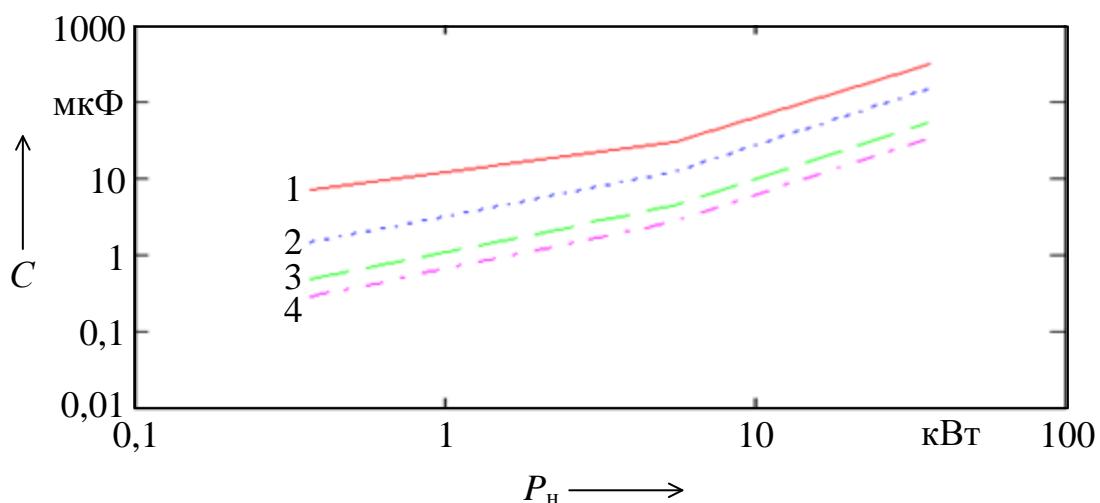


Рис. 5.18. Значение емкости конденсатора необходимое для ограничения напряжения при установившемся режиме работы в схеме с НАМ:  
1 –  $C_{550} = f(P_h)$ , 2 –  $C_{600} = f(P_h)$ , 3 –  $C_{800} = f(P_h)$ , 4 –  $C_{1000} = f(P_h)$

Графики зависимости значений емкости ЗПТ, необходимых для ограничения напряжения в установившемся режиме работы схемы с НГПТ на тех же уровнях приведены на рис. 5.19.

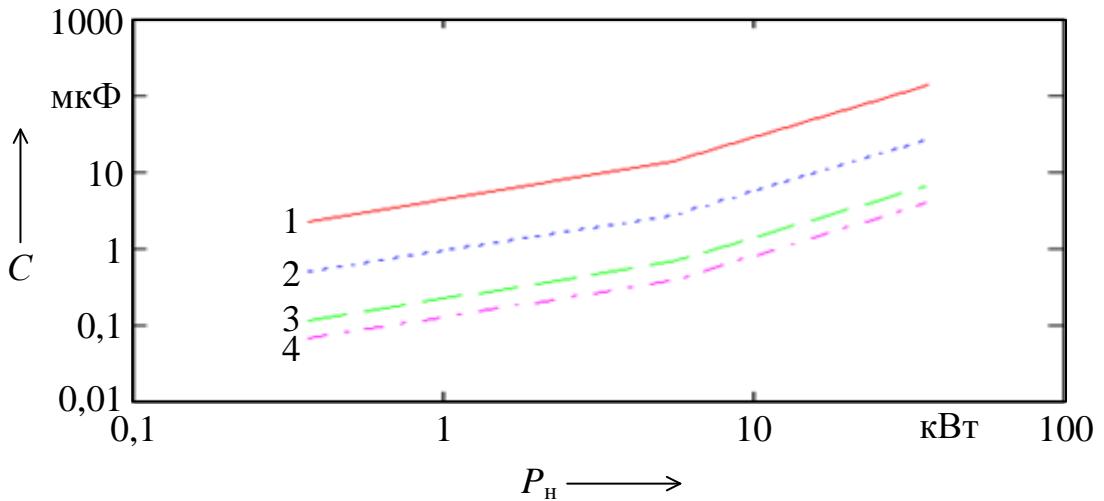


Рис. 5.19. Значение емкости конденсатора необходимое для ограничения напряжения при установившемся режиме работы в схеме с НГПТ:  
1 –  $C_{550} = f(P_h)$ , 2 –  $C_{600} = f(P_h)$ , 3 –  $C_{800} = f(P_h)$ , 4 –  $C_{1000} = f(P_h)$

Анализ результатов расчета, приведенного на рис. 5.18 и 5.19 показывает, что увеличение номинальной мощности испытуемого двигателя на порядок увеличивает необходимую емкость ЗПТ приблизительно также на порядок.

В переходных режимах работы испытуемой и нагрузочной машин скачки напряжения в ЗПТ преобразователя частоты могут быть значительно выше, чем в установившемся режиме. Следовательно, выбор необходимого значения емкости конденсатора для ЗПТ должен осуществляться в первую очередь исходя из расчета переходных режимов.

При проведении испытания на нагрев в схеме осуществляется два переходных режима: при пуске и остановке машин. Более опасным для оборудования, как правило, является переходной режим с увеличением нагрузки [175]. Однако конкретные значения максимального напряжения на конденсаторе при пуске машин зависят от параметров алгоритма вывода их на режим нагрузки.

Нижеприведены результаты моделирования переходного процесса при нагружении испытуемого асинхронного двигателя (ИАД) и НАГ путем увеличения частоты напряжения ( $f_{\text{ИАД}}, f_{\text{НАГ}}$ ), подаваемого на их обмотки статора, по экспоненциальному законам с различными асимптотами, как показано на рис. 5.20.

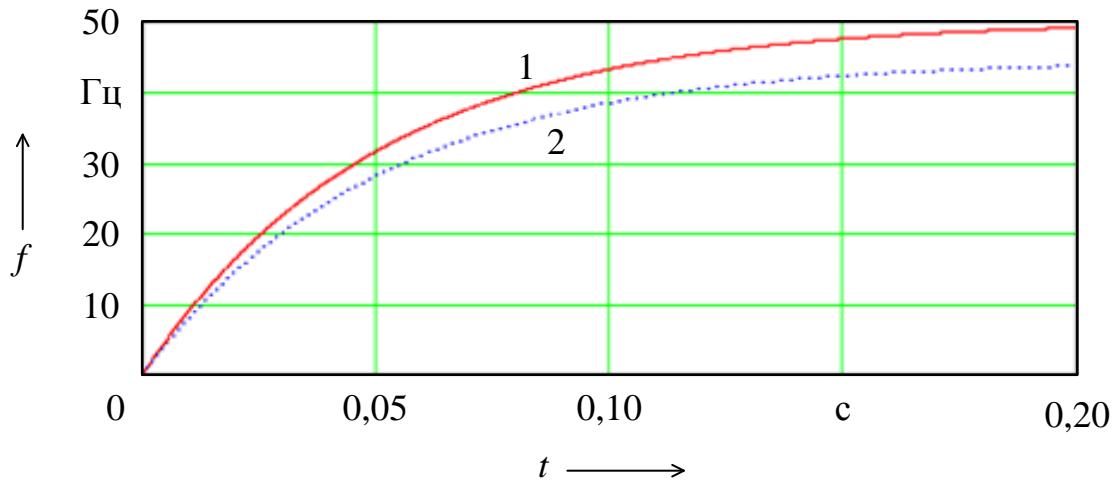


Рис. 5.20. Временная диаграмма изменения частоты напряжения, подаваемого на обмотки статора асинхронных машин:  
1 – испытуемой; 2 – нагрузочной

Пример расчета частоты вращения ротора ( $n_2$ ), напряжения ( $u_k$ ) и тока конденсатора ( $i_k$ ) для испытуемой машины с  $P_h = 5,5$  кВт при значении  $C = 20$  мкФ приведен на рис. 5.21, 5.22.

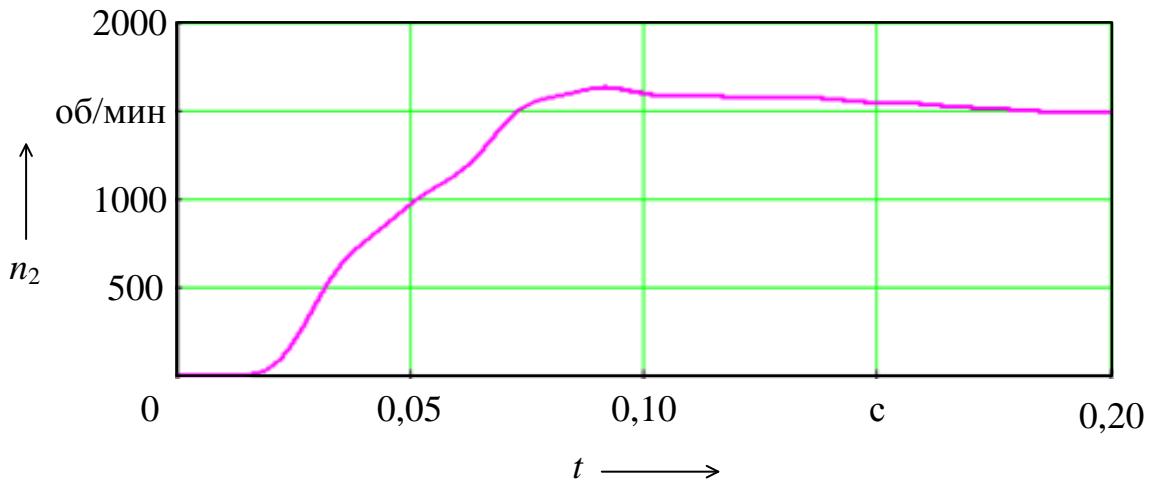


Рис. 5.21. Результаты расчета частоты вращения ротора при выводе машин мощностью 5,5 кВт на режим номинальной нагрузки

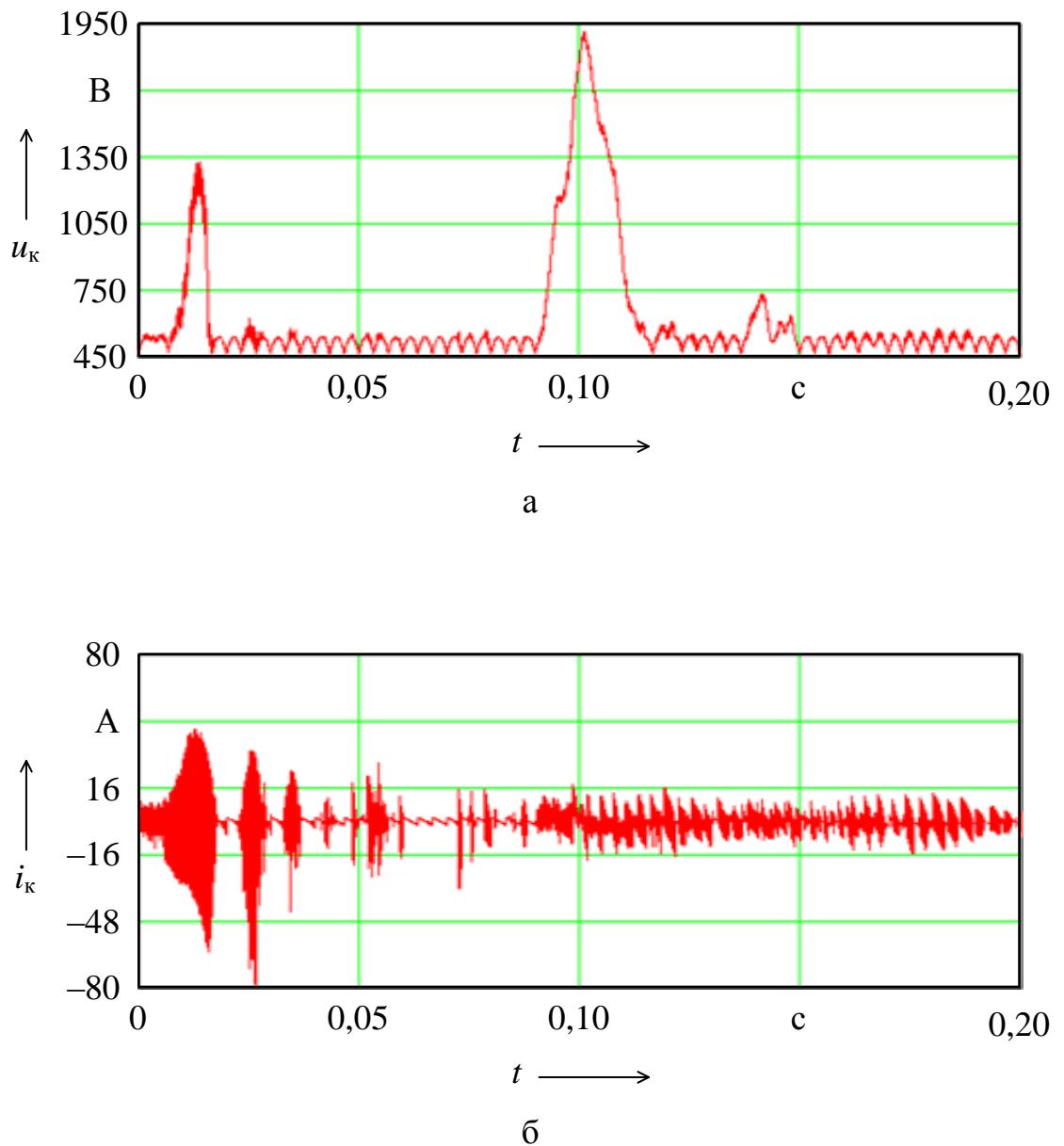


Рис. 5.22. Результаты расчета переходного процесса при выводе машин мощностью 5,5 кВт на режим номинальной нагрузки:  
а – напряжение на конденсаторе; б – ток, проходящий по конденсатору

Результаты проведенного моделирования для номинальных мощностей от 0,37 кВт до 37 кВт для рассмотренного варианта вывода машин на режим нагрузки приведены на рис. 5.23.

Анализ полученных результатов показывает, что при рассматриваемом варианте нагружения машин, зависимости необходимых емкостей конденсатора от  $P_n$  принципиально имеют вид аналогичный рис. 5.19, полученному при установившемся режиме. Однако все значения емкости  $C$  для переходного режима необходимо увеличить более чем на порядок по сравнению с установившимся режимом.

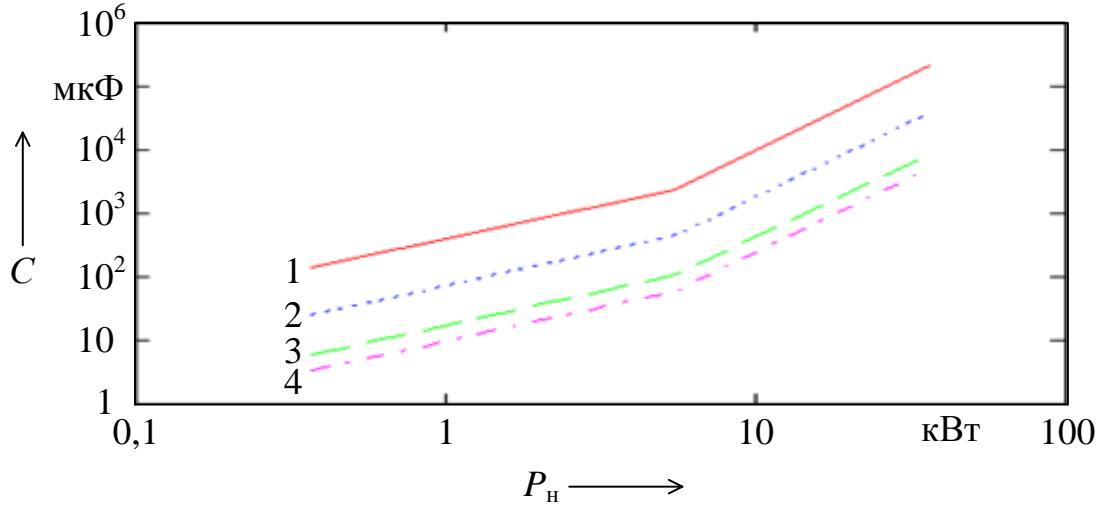


Рис. 5.23. Значения емкости конденсатора необходимые для ограничения пиков напряжения при выводе машин на режим номинальной нагрузки:  
1 –  $C_{550} = f(P_n)$ , 2 –  $C_{600} = f(P_n)$ , 3 –  $C_{800} = f(P_n)$ , 4 –  $C_{1000} = f(P_n)$

Выполненное математическое моделирование переходных и стационарных режимов работы схем испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки позволило определить зависимости необходимых значений емкости конденсатора для снижения пульсаций напряжения в звене постоянного тока от номинальной мощности испытуемого двигателя.

Результаты расчетов показывают, что схема с нагрузочной машиной постоянного тока менее склонна к перенапряжениям на конденсаторе, включенном в звено постоянного тока.

При разработке электротехнических комплексов для испытания АМ диапазон рекомендуемых значений емкости для ЗПТ с учетом переходных процессов должен быть смешен в сторону больших значений.

### **5.3. Исследование влияния изменения напряжения сети на качество функционирования испытательных комплексов**

Отклонение частоты тока в сети от 50 Гц в пределах норм, установленных ГОСТ 32144-2013 для производственных установок, не приведет к значимому изменению формы напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты (ПЧ), и, следовательно, не окажет существенного влияния на его выходное напряжение и режим работы электрических машин [40].

Существенное влияние на форму напряжения на выходе ПЧ оказывает изменение действующего значения входного напряжения.

Согласно ГОСТ 32144-2013 изменение напряжения в сети не должно превышать  $\pm 10\%$  от номинального значения.

Рассмотрим работу схем взаимной нагрузки с различными типами нагрузочных машин при изменении напряжения сети в диапазоне  $\pm 10\%$ .

Математическая модель, приведенная в п.п. 2.1.1 позволяет рассчитать напряжение на выходе преобразователя частоты при колебаниях напряжения на его входе от 198 В до 242 В [151].

Если на выходе преобразователя частоты поддерживается действующее значение первой гармоники напряжения  $U_1 = 220$  В с частотой 50 Гц, при значениях напряжения сети  $U_c = 209$  В, 220 В и 242 В его форма принимает вид, приведенный на рис. 5.24, б, в, г (красная линия – напряжение на выходе ПЧ, синяя линия – основная гармоника напряжения).

При снижении напряжения сети ниже 209 В, становится невозможным поддержание на выходе ПЧ действующего значения напряжения равным 220 В.

В связи с этим на данном диапазоне напряжений сети ( $198 \text{ В} \leq U_c < 209 \text{ В}$ ) примем для изучения функционирования схем взаимной нагрузки максимально возможные напряжения на выходе ПЧ, которые соответствуют ступенчатой форме напряжения, приведенной на рис. 5.24, а.

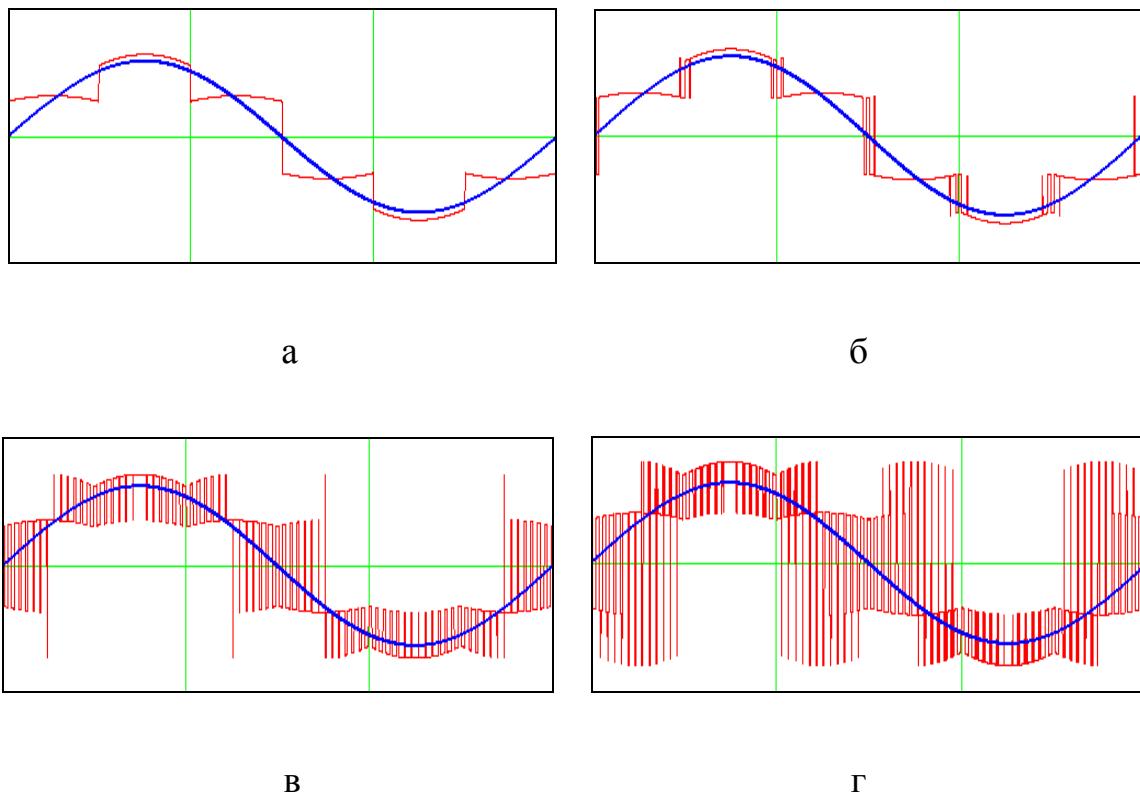


Рис. 5.24. Расчетные осциллограммы напряжения на выходе преобразователя частоты и их первая гармоника: а –  $U_c = 198$  В; б –  $U_c = 209$  В; в –  $U_c = 220$  В; г –  $U_c = 242$  В

Значения напряжения на выходе ПЧ, соответствующие всему рассматриваемому диапазону изменения напряжения сети, приведены на рис. 5.25.

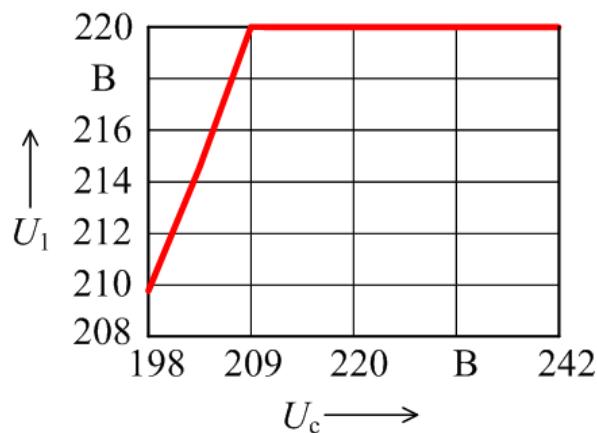


Рис. 5.25. Действующие значения напряжения на выходе преобразователя частоты при различных значениях напряжения сети

Проанализируем работу схем взаимной нагрузки при данных значениях напряжения (см. рис. 5.25).

Рассмотрим схему взаимной нагрузки с нагрузочной асинхронной машиной, приведенную на рис. 1.21.

Работа машин в данной схеме описывается математической моделью в виде системы уравнений (2.33). Проведенный численный эксперимент с машинами мощностью 0,75 кВт, 5,5 кВт и 250 кВт показал, что для поддержания на валу номинальной нагрузки, необходимо иметь разность частот напряжений ( $\Delta f$ ), подаваемых на обмотки статора испытуемого двигателя и нагрузочной асинхронной машины (НАМ), в соответствии с кривыми, приведенными на рис. 5.26.

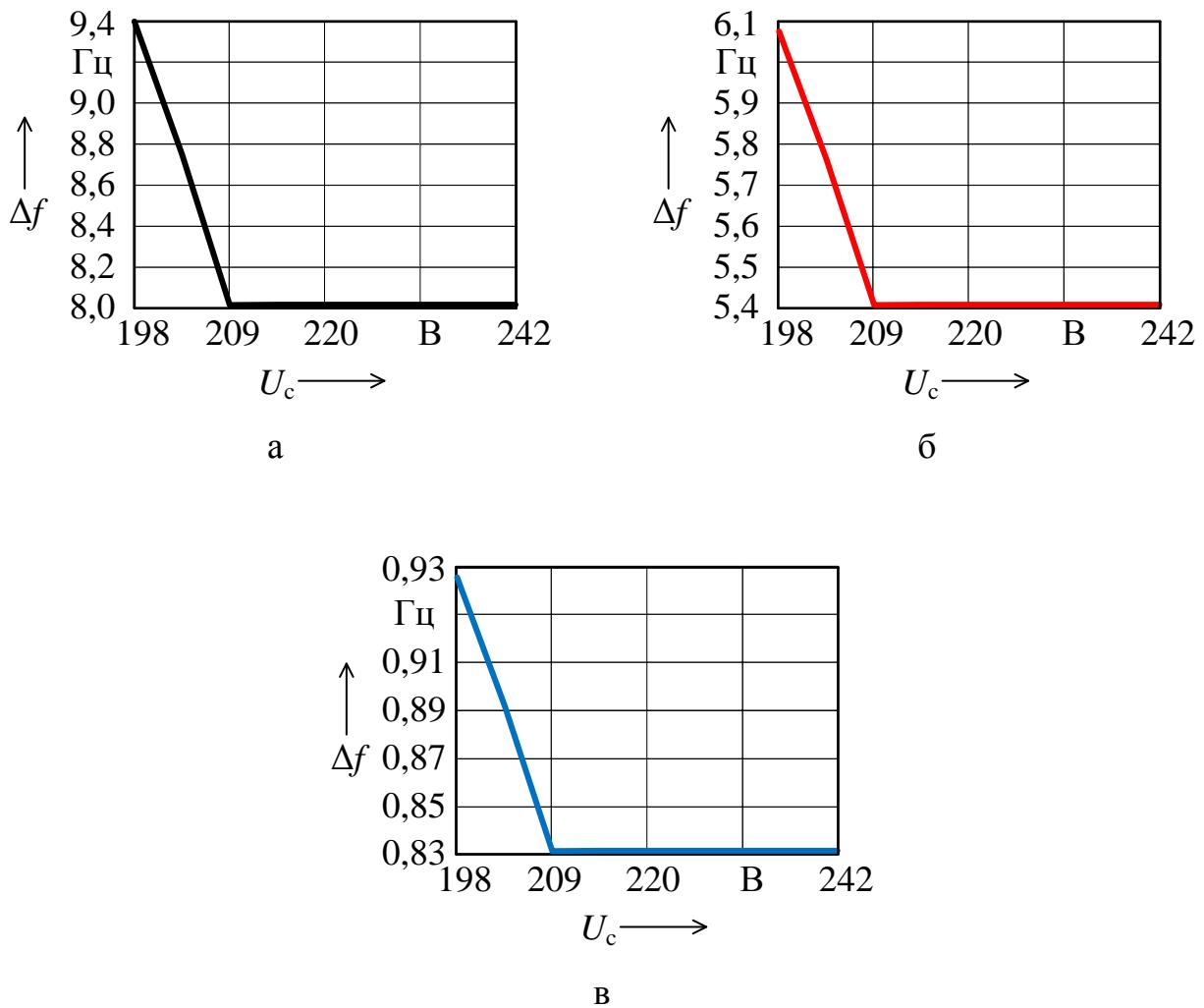


Рис. 5.26. Необходимая для обеспечения номинальной нагрузки разность частот тока испытуемого двигателя и НАМ при различных значениях напряжения сети для машин с номинальной мощностью: а – 0,75 кВт, б – 5,5 кВт; в – 250 кВт

Как показывает анализ результатов расчета: при неизменном значении напряжения на выходе ПЧ ( $U_1 = 220$  В,  $U_c = 209 \div 242$  В) необходимо иметь неиз-

менное значение  $\Delta f$ ; при снижении напряжения в сети ниже 209 В и как следствие снижении напряжения на выходе ПЧ необходимо увеличивать  $\Delta f$ . При снижении напряжения на выходе ПЧ до 210 В (при  $U_c = 198$  В) для поддержания номинальной нагрузки необходимо увеличить  $\Delta f$  на 12 – 17,5 % (см. рис. 5.26).

Рассмотрим схему взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока, приведенную на рис. 4.8.

Работа машин в данной схеме описывается математической моделью, приведенной в п.п. 3.2.2 настоящей работы. Численный эксперимент для данной схемы проведен с испытуемыми асинхронными двигателями тех же мощностей (0,75 кВт, 5,5 кВт и 250 кВт) и соответствующими по мощности нагрузочными генераторами постоянного тока (НГПТ) (2,4 кВт, 5,5 кВт и 250 кВт) с номинальным напряжением 440 В и частотой вращения 1500 и 1600 об/мин. Анализ результатов расчетов показал, что для поддержания на валу номинальной нагрузки, необходимо увеличивать магнитный поток НГПТ ( $\Phi$ ) с ростом напряжения сети во всем диапазоне его изменения ( $198 \text{ В} \leq U_c \leq 242 \text{ В}$ ) в соответствии с рис. 5.27. Примерный диапазон регулирования магнитного потока НГПТ при изменении напряжения сети в рассматриваемом диапазоне составляет  $\pm 10\%$  от величины потока при  $U_c = 220$  В.

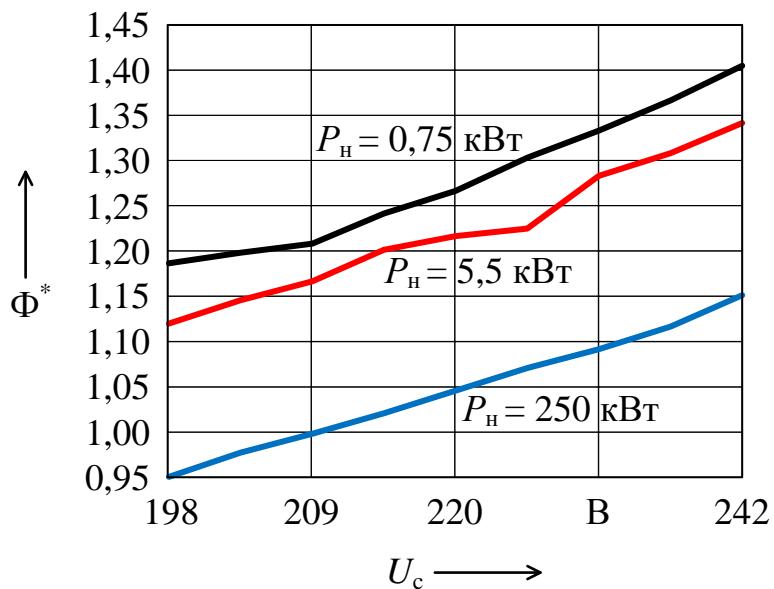


Рис. 5.27. Необходимая для обеспечения номинальной нагрузки величина магнитного потока НГПТ при различных значениях напряжения сети

Отложенный по оси ординат магнитный поток НГПТ ( $\Phi^*$ ) в относительных единицах (см. рис. 5.27), определяется как отношение потока ( $\Phi$ ) к номинальному потоку НГПТ ( $\Phi_n$ ).

Одним из важных параметров качества функционирования электроустановки является коэффициент искажения синусоидальности кривой тока, потребляемого ей из сети [42]. Результаты расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой тока, потребляемого схемой испытания из сети, для схем с НАМ и НГПТ с испытуемыми асинхронными двигателями различных номинальных мощностей (0,75 кВт, 5,5 кВт и 250 кВт) приведены на рис. 5.28.

Как показывает анализ результатов моделирования: минимальные значения коэффициента искажения синусоидальности кривой потребляемого тока соответствуют напряжению сети  $U_c = 220 \div 225$  В; зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой тока от напряжения сети  $K_{II} = f(U_c)$  имеет  $U$ -образный вид; для машин малой и средней мощности левая часть полученных  $U$ -образных кривых имеет меньшее нарастание или даже спад при снижении напряжения сети ( $U_c$ ) за счет снижения напряжения на выходе ПЧ ( $U_1$ ).

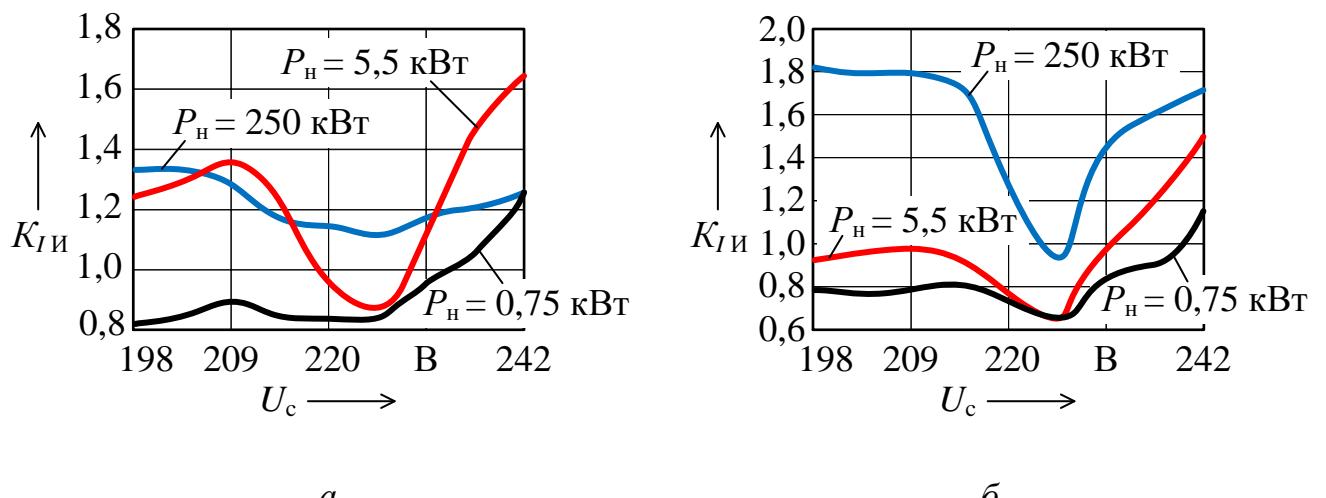


Рис. 5.28. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока сети при различных значениях напряжения питания:  
а – схемы с НАМ; б – схемы с НГПТ

В результате проведенного исследования воздействия изменения напряжения на функционирование схем взаимной нагрузки для испытания асинхронных двигателей выявлено:

- 1) при снижении напряжения в сети ниже 209 В, действующее значение напряжения на выходе преобразователя частоты неизбежно опускается ниже 220 В;

2) в схеме с НАМ при неизменном значении напряжения на выходе преобразователя частоты необходимо иметь неизменное значение разности частот напряжений ( $\Delta f$ ), питающих испытуемый двигатель и нагрузочную машину; при снижении напряжения на выходе преобразователя частоты необходимо увеличивать  $\Delta f$ ; снижение напряжения на выходе ПЧ до значения  $U_1 = 210$  В (при  $U_c = 198$  В) приводит к необходимости увеличения  $\Delta f$  на  $12 \div 17,5\%$ ;

3) в схеме с НГПТ для поддержания на валу номинальной нагрузки, необходимо при увеличении напряжения сети ( $U_c$ ) усиливать магнитный поток НГПТ, при уменьшении  $U_c$  – ослаблять; примерный диапазон регулирования потока для двигателей различных мощностей составляет порядка  $\pm 10\%$  от потока необходимого при  $U_c = 220$  В;

4) отклонение напряжения сети ( $U_c$ ) от 220 В на  $\pm 10\%$  приводит к росту коэффициента искажения синусоидальности кривой потребляемого тока ( $K_{I\text{ и}}$ ); при определенных параметрах элементов схемы испытания отклонение  $U_c$  на 10% может приводить к двукратному возрастанию  $K_{I\text{ и}}$ .

Рассмотрим влияние изменения величины действующего значения питающего напряжения в пределах  $\pm 10\%$  от номинального значения 220 В (соответствует диапазону от 198 В до 242 В) на потери мощности в схемах взаимной нагрузки.

Учтем результаты, полученные при расчете и анализе воздействия изменения напряжения сети на напряжение на выходе преобразователя частоты приведенные в п.п. 5.3.1.

Моделирование работы пары электрических машин в схеме с нагрузочной асинхронной машиной (см. рис. 1.21) осуществлено с учетом расчетных кривых напряжения на выходе ПЧ (см. рис. 5.24) по системе уравнений (2.33) без учета параметров статических преобразователей. Действующие значения фазного напряжения сети приняты от 209 В до 242 В с шагом по 5,5 В, составляющим 2,5 % от номинального значения равного 220 В. Расчет выполнен с параметрами асинхронных двигателей трех типов: АИР71В4 ( $P_h = 0,75$  кВт), 5АМ112М4 ( $P_h = 5,5$  кВт), 5АМ315МВ2 ( $P_h = 215$  кВт). Частота широтно-импульсной модуляции принята  $f_3 = 4$  кГц, действующее значение напряжения на выходе ПЧ поддерживается равным или максимально близким величине 220 В путем регулирования параметра  $U_{3\text{ max}}$ , согласно рис. 5.24, а - г. Количество расчетных точек приходящихся на одну секунду работы схемы принято равным 51200. Параметры схемы замещения асинхронных машин определены по методике, приведенной в [186]. В расчете задавалась неизменная частота основной гармоники напряжения,

подаваемого на испытуемый двигатель  $f_1 = f_h = 50$  Гц, и уменьшенная по сравнению с ней частота основной гармоники напряжения, подаваемого на нагрузочную машину  $f_2$ . Разность данных частот ( $f_1 - f_2$ ) подбиралась такой, чтобы обеспечить неизменную электромагнитную мощность испытуемого двигателя, равную его номинальной мощности.

При математическом моделировании работы асинхронных машин по системе уравнений (2.33) имеем переходный электромеханический процесс, устанавливающийся через некоторое время  $T_{\pi}$ . Пример результата расчета скорости вращения от состояния покоя до установившегося режима работы под номинальной нагрузкой для схемы с НАМ при номинальной мощности асинхронных машин 5,5 кВт приведен на рис. 5.29 [150].

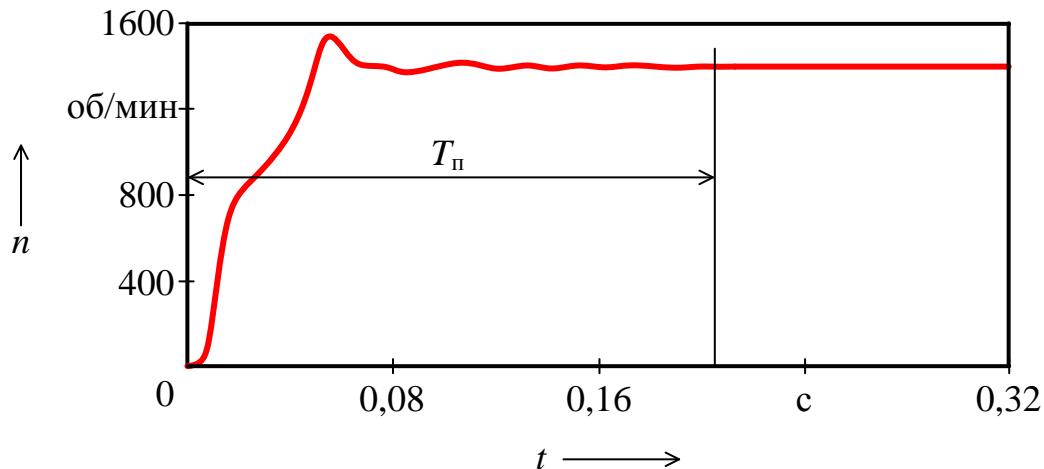


Рис. 5.29. Расчетная скорость вращения для схемы с нагрузочной асинхронной машиной при номинальной мощности асинхронных машин 5,5 кВт

Расчет параметров режима работы осуществлялся по следующим выражениям.

Установившаяся частота вращения:

$$n_y = \frac{1}{(N - N_{k,\pi})} \sum_{i=N_{k,\pi}}^N (n_i), \quad (5.4)$$

где  $N$  – количество расчетных точек,

$N_{k,\pi}$  – номер расчетной точки, соответствующей окончанию переходного режима,

$i$  – номер расчетного момента времени,  
 $n_i$  – расчетная частота вращения в  $i$ -й момент времени (по результатам математического моделирования).

Установившийся электромагнитный момент:

$$M_{\text{Э.М.}} = \frac{1}{(N - N_{\text{к.п.}})} \frac{pL_{12}}{\sqrt{3}} \sum_{i=N_{\text{к.п.}}}^N (i1_{1a}i [i1_{2b}i - i1_{2c}i] + \dots \\ \dots i1_{1b}i [i1_{2c}i - i1_{2a}i] + i1_{1c}i [i1_{2a}i - i1_{2b}i]), \quad (5.5)$$

где  $p$  – число пар полюсов машины,

$L_{12}$  – наибольшее значение взаимной индуктивности трехфазной обмотки,  
 $i1_{1a}, i1_{1b}, i1_{1c}$  – расчетные токи фаз статора испытуемого асинхронного двигателя (по результатам математического моделирования),  
 $i1_{2a}, i1_{2b}, i1_{2c}$  – расчетные токи фаз ротора испытуемого асинхронного двигателя (по результатам математического моделирования).

Установившееся значение электромагнитной мощности принято равным:

$$P_{\text{Э.М.}} = M_{\text{Э.М.}} n_y \frac{\pi}{30}. \quad (5.6)$$

Мощность, потребляемая испытуемым двигателем:

$$P_1 = \frac{1}{(N - N_{\text{к.п.}})} \sum_{i=N_{\text{к.п.}}}^N (u1_{ai}i1_{1a}i + u1_{bi}i1_{1b}i + u1_{ci}i1_{1c}i), \quad (5.7)$$

где  $u1_{ai}, u1_{bi}, u1_{ci}$  – напряжения, формируемые ПЧ, подаваемые на фазы обмотки статора испытуемого двигателя.

Мощность, вырабатываемая нагрузочной машиной:

$$P_2 = \frac{1}{(N - N_{\text{к.п.}})} \sum_{i=N_{\text{к.п.}}}^N (u2_{1a}i i2_{1ai} + u2_{1b}i i2_{1bi} + u2_{1c}i i2_{1ci}), \quad (5.8)$$

где  $u2_{1a}i, u2_{1b}i, u2_{1c}i$  – напряжения, формируемые ПЧ, подаваемые на фазы обмотки статора нагрузочной асинхронной машины.

В качестве критерия энергоэффективности схемы взаимной нагрузки принято отношение суммарной мощности потребляемой обеими машинами ( $P_1 + P_2$ ) к электромагнитной мощности испытуемого двигателя. С учетом того, что мощ-

ность нагрузочной машины имеет отрицательные значения ( $P_2 < 0$ ), суммарная мощность, потребляемая обеими машинами равна сумме потерь в этих машинах:

$$P_1 + P_2 = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (5.9)$$

Суммарную мощность обеих машин без учета потерь в статических преобразователях можно считать мощностью, потребляемой схемой испытаний из сети ( $P_c = P_1 + P_2$ ). В соответствии с введенным критерием энергоэффективности ( $P_c / P_{\text{Э.М.}}$ ), чем меньше его значение, тем выше энергоэффективность схемы испытаний:

$$\frac{P_c}{P_{\text{Э.М.}}} = \frac{P_1 + P_2}{P_{\text{Э.М.}}} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{P_{\text{Э.М.}}}. \quad (5.10)$$

В рассматриваемых схемах взаимной нагрузки электромагнитную мощность, которой нагружен испытуемый двигатель, условно можно считать полезной. Таким образом, физический смысл критерия энергоэффективности ( $P_c / P_{\text{Э.М.}}$ ) можно трактовать как удельную величину мощности, затрачиваемую на создание номинальной нагрузки испытуемому двигателю.

Расчетные зависимости, относительных потерь в схеме взаимной нагрузки с НАМ от напряжения сети приведены на рис. 5.30.

Анализ результатов расчета (см. рис. 5.30) показывает, что при напряжении в сети 220 В  $\pm 2,5\%$  потери мощности в схеме минимальны. Отклонение напряжения в сети на 5  $\div$  10% может приводить к увеличению мощности, потребляемой из сети более чем на 20%, и, следовательно, значительно снижать энергоэффективность схемы испытаний.

Моделирование работы пары электрических машин в схеме с нагрузочным генератором постоянного тока (см. рис. 4.8) осуществлено при тех же параметрах и условиях по уравнениям, представленным в п.п. 3.2.2. В качестве нагрузочных генераторов приняты машины типа: 2ПБ132МУХЛ4 (2,4 кВт), 2ПФ132ЛУХЛ4 (5,5 кВт), 2ПФ315ЛУХЛ4 (250 кВт). Магнитный поток НГПТ подбирался таким, чтобы обеспечить неизменную электромагнитную мощность испытуемого двигателя, равную его номинальной мощности. Результаты математического моделирования для схемы взаимной нагрузки с НГПТ приведены на рис. 5.31.

Анализ результатов математического моделирования (см. рис. 5.31) показывает, что при напряжении в сети 220 В  $\pm 2,5\%$  потери мощности в схеме с НГПТ также как и в схеме с НАМ оказываются минимальны. Отклонение напряжения в

сети на 5 ÷ 10% может приводить к увеличению мощности, потребляемой из сети схемой с НГПТ более чем на 10%.

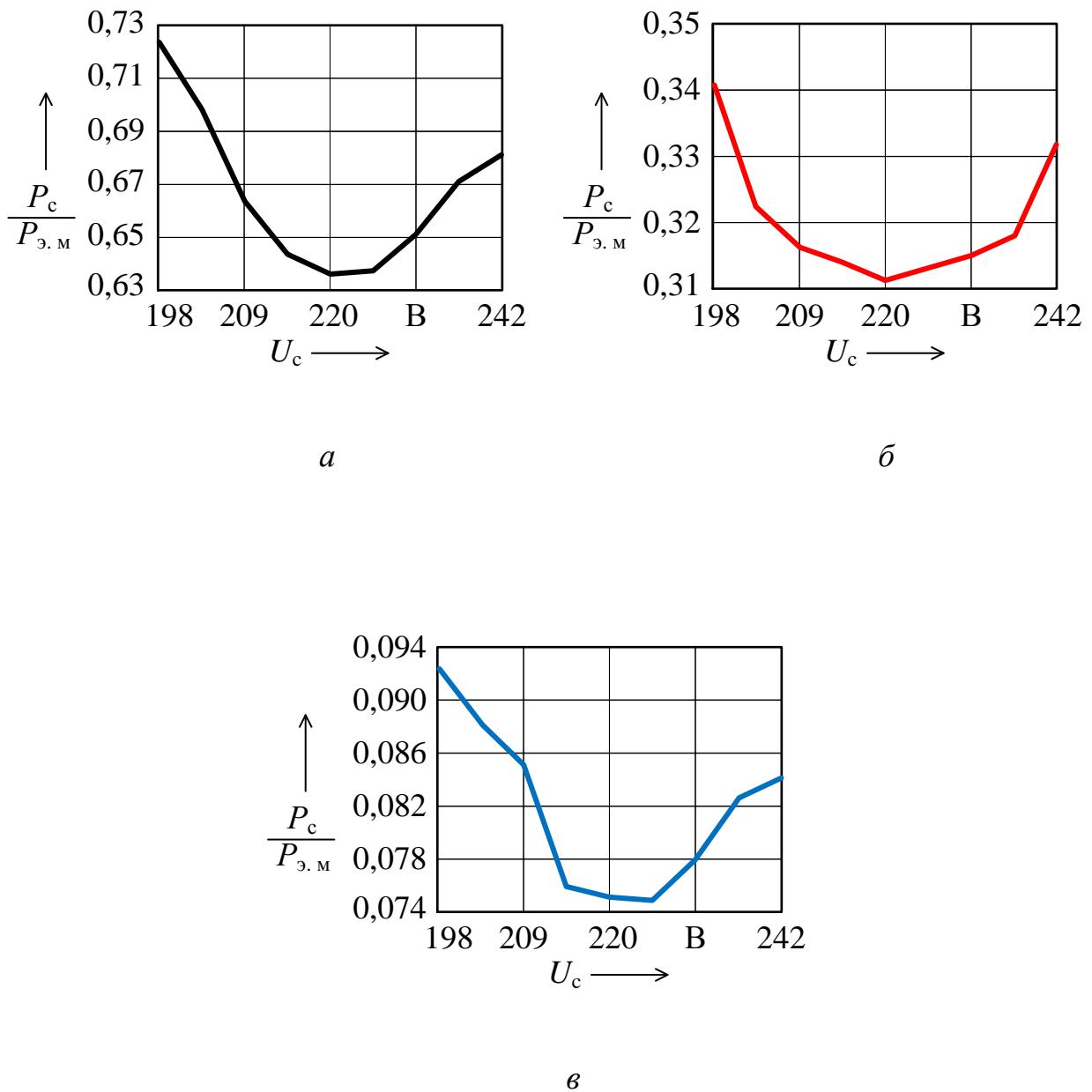


Рис. 5.30. Относительные потери в схеме взаимной нагрузки с НАМ при испытании асинхронных двигателей различной номинальной мощности:  
*a* – 0,75 кВт; *б* – 5,5 кВт; *в* – 250 кВт

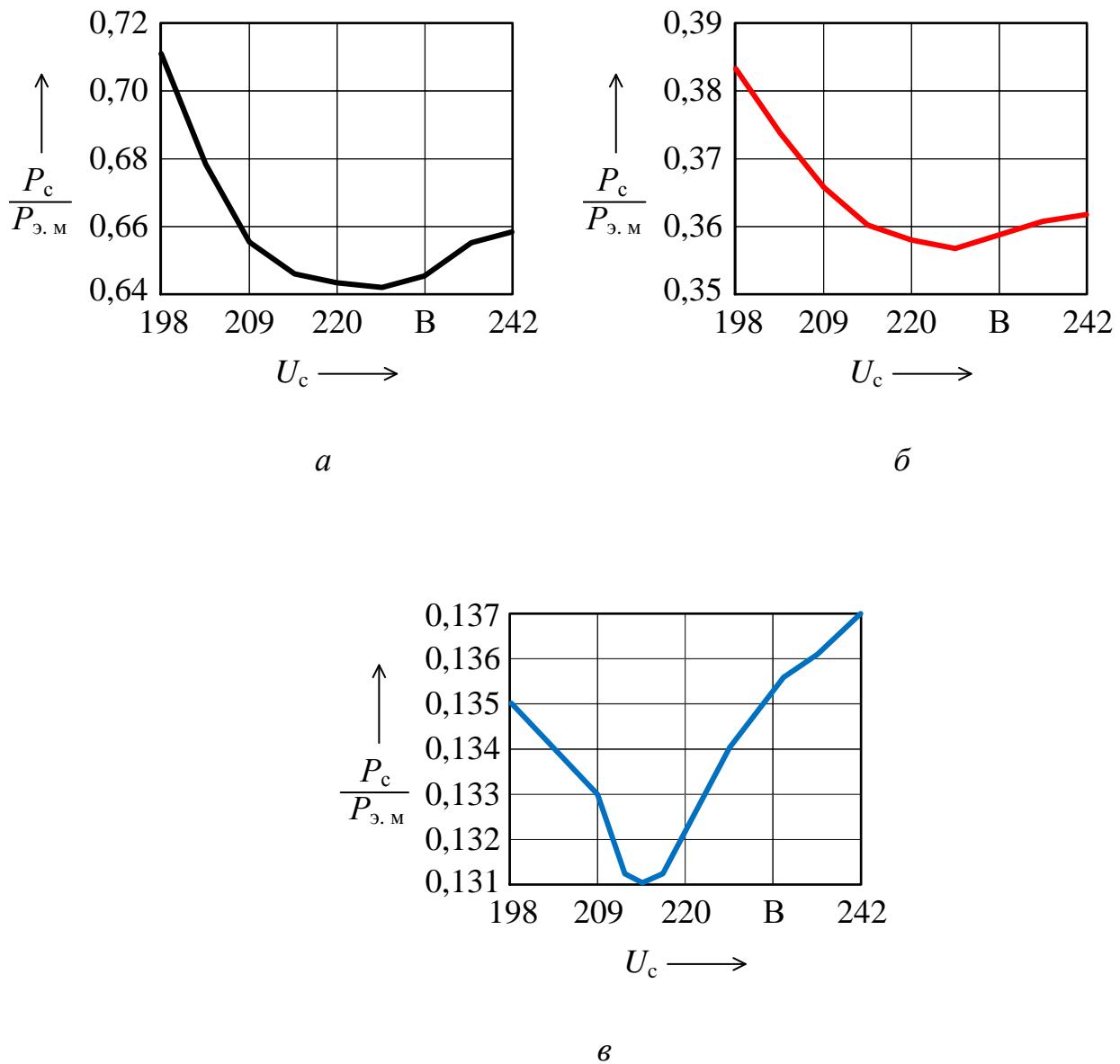


Рис. 5.31. Относительные потери в схеме взаимной нагрузки с НГПТ при испытании асинхронных двигателей различной номинальной мощности:  
*a* – 0,75 кВт; *б* – 5,5 кВт; *в* – 250 кВт

Таким образом, анализ расчетных энергетических показателей, полученных в результате математического моделирования показал, что при отклонении напряжения в сети на  $\pm 2,5 \%$  потери мощности в схеме испытаний минимальны. Отклонение напряжения в сети до  $\pm 10 \%$  может приводить к увеличению мощности, потребляемой из сети, более чем на 20 % в схемах с НАМ и более 10 % в схемах с НГПТ.

#### **5.4. Разработка и исследование эффективности способа снижения потерь в схеме испытаний с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор»**

Современные разработки в области управления асинхронными электроприводами позволили значительно повысить их энергетическую эффективность, расширить сферы применения [54, 55, 88, 168, 174, 185].

Преобразователи частоты, разработанные на базе *IGBT*-транзисторов, позволяют эффективно применять различные законы регулирования питающего напряжения для снижения потерь в процессе электромеханического преобразования [219, 224, 259].

При нагрузочных испытаниях электродвигатель должен быть нагружен номинальной механической мощностью при параметрах питающего напряжения, наиболее близко соответствующих номинальным значениям. При этом параметры режима работы генератора принципиально могут быть варьируемыми. Однако известные схемы взаимной нагрузки не используют возможность повышения энергетической эффективности испытательной установки за счет регулирования параметров напряжения, подведенного к обмотке статора нагрузочного генератора.

Ниже приведен новый способ повышения эффективности испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки за счет снижения потерь в схеме путем регулирования параметров напряжения, питающего нагрузочную машину.

Для реализации данной идеи необходим комплекс технических устройств, приведенный на рис. 5.32 [134].

Представленная блок-схема включает в себя следующие общие элементы для известных схем испытания данного типа: испытуемый асинхронный двигатель 1, муфта 2, нагрузочная асинхронная машина 3, управляемый инвертор 4 [238]. Также на блок схеме приведены элементы, необходимые для осуществления регулирования: система управления 5, вычислитель частоты напряжения 6, датчик частоты вращения 7.

На обмотку статора испытуемого асинхронного двигателя подается переменное трехфазное напряжение. На силовой вход управляемого инвертора подается постоянное напряжение.

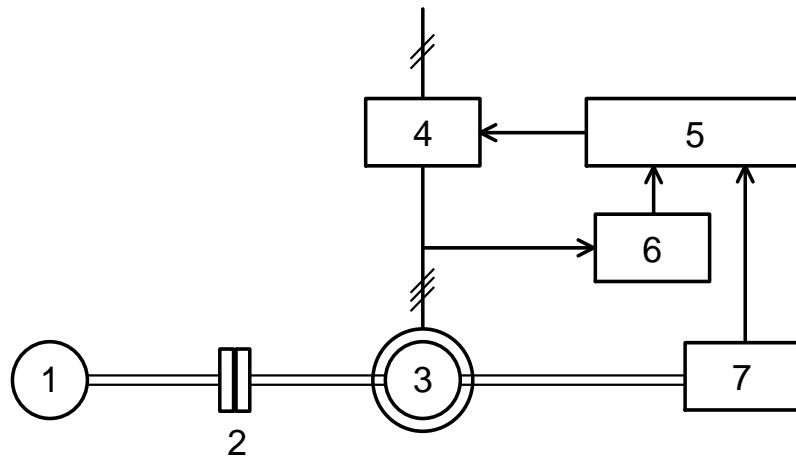


Рис. 5.32. Общий фрагмент различных схем испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки

Предложенный способ повышения энергетической эффективности схемы испытаний АМ методом взаимной нагрузки (см. рис. 5.32) предполагает следующий принцип ее работы.

Вначале обе асинхронные машины запускают на холостом ходу. При этом на обмотку статора испытуемого двигателя подается номинальное по частоте и действующему значению напряжение.

Далее вывод испытуемого асинхронного двигателя на режим номинальной нагрузки происходит путем задания разности частот напряжений, подаваемых на обмотки статора обеих машин. Механические характеристики испытуемого асинхронного двигателя и нагрузочной асинхронной машины при этом принимают вид, приведенный на рис. 5.33, а.

Сплошная линия соответствует механической характеристике испытуемого асинхронного двигателя, пунктирная линия – механической характеристике нагрузочной асинхронной машины. Частота вращения ротора  $n$ , контролируемая при помощи датчика частоты вращения, принимает значение равное номинальному значению частоты вращения ротора испытуемого асинхронного двигателя  $n_h$ .

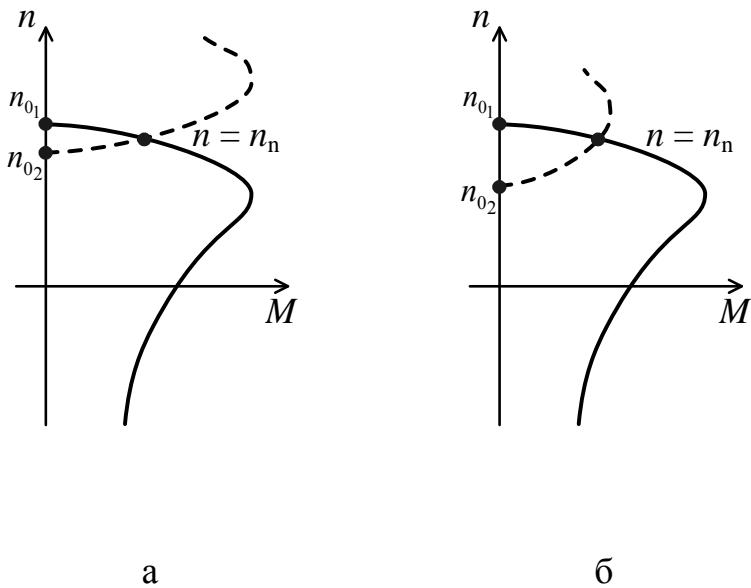


Рис. 5.33. Механические характеристики испытуемой и нагрузочной машины

На следующем этапе происходит пошаговое снижение частоты напряжения  $f_2$ , питающего нагрузочную машину, контролируемое при помощи вычислителя частоты напряжения. После каждого шага снижения частоты  $f_2$ , если частота вращения ротора  $n$  увеличилась, то производится плавное снижение действующего значения напряжения  $U_2$ , питающего нагрузочную машину, до достижения частоты вращения ротора номинального значения ( $n = n_n$ ).

В процессе регулирования частоты  $f_2$  и действующего значения напряжения  $U_2$  механические характеристики машин принимают вид, приведенный на рис. 5.33, б. Процесс регулирования должен осуществляться до достижения максимальной мощности, вырабатываемой нагрузочной асинхронной машиной.

С целью оценки энергетической эффективности регулирования параметров напряжения, подведенного к обмотке статора нагрузочного генератора, выполнено математическое моделирование работы схемы испытаний (рис. 5.32) [238]. В качестве математической модели применена система уравнений (2.33) для пары асинхронных машин, работающих по методу взаимной нагрузки.

Однако данная математическая модель не учитывает зависимость магнитных потерь в статоре от действующего значения напряжения.

Данное допущение неприменимо для анализа энергетических процессов в рассматриваемой системе (см. рис. 5.32) при регулировании параметров напряжения на выходе управляемого выпрямителя-инвертора 4.

Учтем в уравнении движения момент потерь в виде двух составляющих, одна из которых обусловлена механическими потерями, а другая – потерями в магнитной системе статора:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} = & \frac{-p}{J\sqrt{3}} \left\{ L1_{12} [il_{1a}(il'_{2b} - il'_{2c}) + il_{1b}(il'_{2c} - il'_{2a}) + il_{1c}(il'_{2a} - il'_{2b})] + \dots \right. \\ & \left. \dots + L2_{12} [i2_{1a}(i2'_{2b} - i2'_{2c}) + i2'_{1b}(i2'_{2c} - i2'_{2a}) + i2_{1c}(i2'_{2a} - i2'_{2b})] \right\} - \frac{(M_{\text{мех}} + M_{\text{маг}})}{J} \text{sign}(\omega), \end{aligned} \quad (5.11)$$

где  $M_{\text{мех}}$  – тормозной момент, обусловленный механическими потерями во вращающейся системе;

$M_{\text{маг}}$  – тормозной момент, обусловленный магнитными потерями в статорах машин.

Параметры схемы замещения и составляющие потерь асинхронных машин определены по методике, представленной в источнике [186]. Данная методика позволяет получить приближенные параметры асинхронной машины, исходя из ее каталожных данных и ряда принятых допущений.

Момент потерь, обусловленный механическими потерями, найден по выражению

$$M_{\text{мех}} = \frac{\Delta P1_{\text{мех}} + \Delta P2_{\text{мех}}}{\omega}, \quad (5.12)$$

где  $\Delta P1_{\text{мех}}$  – механические потери мощности в испытуемом двигателе;

$\Delta P2_{\text{мех}}$  – механические потери мощности в нагрузочной машине.

Зависимость магнитных потерь в статорах обеих машин от параметров напряжения, подаваемого на нагрузочную машину, может быть аппроксимирована в виде:

$$M_{\text{маг}} = \frac{\Delta P1_{\text{маг}}}{\omega} + \frac{\Delta P2_{\text{маг}}}{\omega} \left( \frac{U2}{U2_{\text{н}}} \right)^2 \left( \frac{f2}{f2_{\text{н}}} \right)^{1.2}, \quad (5.13)$$

где  $\Delta P1_{\text{маг}}$ ,  $\Delta P2_{\text{маг}}$  – магнитные потери мощности в испытуемом двигателе и нагрузочной машине;

$U2_{\text{н}}$ ,  $f2_{\text{н}}$  – действующее значение и частота номинального напряжения нагрузочной машины;

$U2$ ,  $f2$  – действующее значение и частота напряжения, подаваемого на нагрузочную машину.

В результате математического моделирования получены зависимости для асинхронных машин типа *IMM71B4У2* (номинальная мощность  $P_n = 0,37 \text{ кВт}$ ), которые приведены на рис. 5.34.

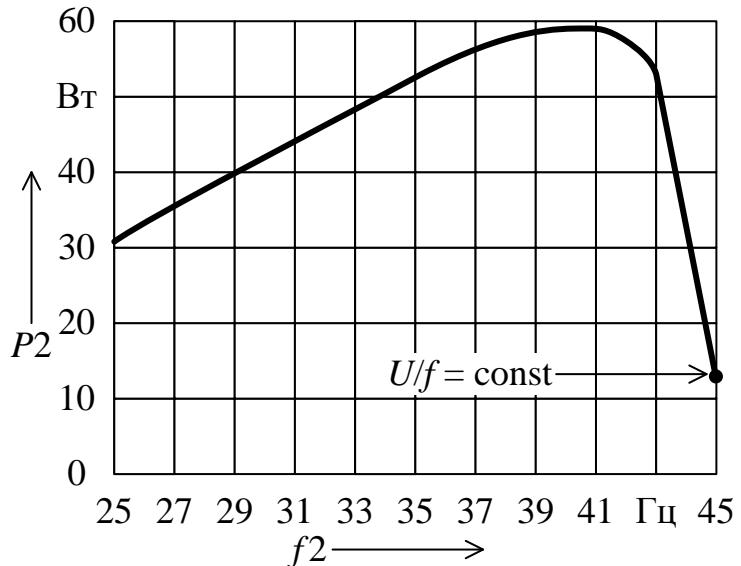
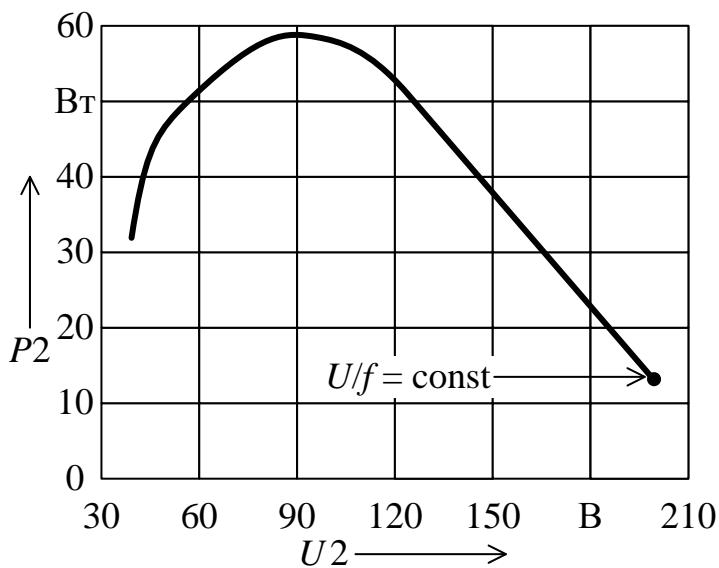
*a**б*

Рис. 5.34. Результаты математического моделирования с машинами номинальной мощностью  $P_n = 0,37 \text{ кВт}$

Анализ графиков, полученных в результате математического моделирования показывает, что на каждой кривой присутствует точка максимума, соответ-

ствующая наибольшей энергетической эффективности схемы испытаний. Данная точка для машины, с которой проводился эксперимент, соответствует мощности приблизительно в пять раз большей, чем можно получить, например, при регулировании параметров напряжения, подаваемого на генератор, по закону  $U/f = \text{const}$  (см. рис. 5.35).

Аналогичные зависимости, полученные для асинхронных машин типа 5АМН315М4 (номинальная мощность  $P_n = 250$  кВт), приведены на рис. 5.35.

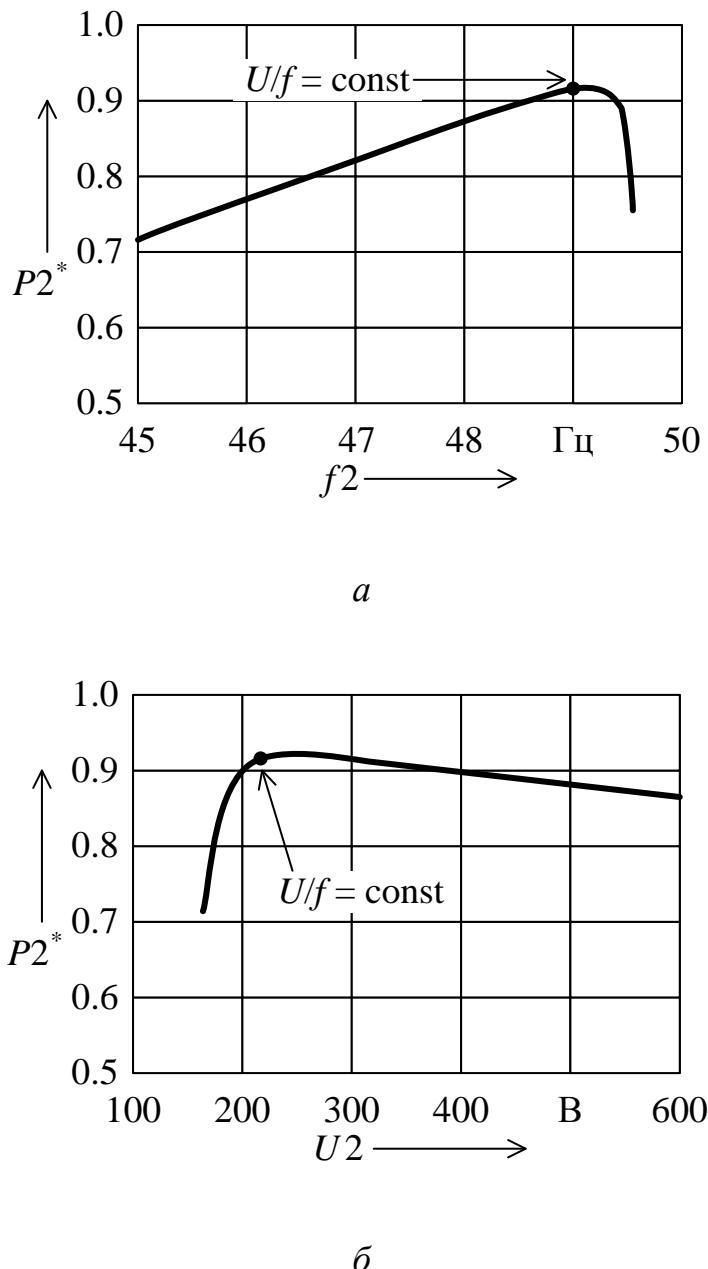


Рис. 5.35. Результаты математического моделирования с машинами номинальной мощностью  $P_n = 250$  кВт

Следует отметить, что для асинхронного двигателя большой мощности (см. рис. 5.35) данные точки находятся ближе друг к другу, при этом точка максимума лежит правее. Однако за счет регулирования можно увеличить вырабатываемую мощность приблизительно на 1%, что составляет более 20% от номинальных потерь для данной машины или более 10 % потерь от пары машин, в составе испытательной установки. Следовательно, при испытании асинхронных двигателей мощностью 250 кВт возможный эффект экономии потребляемой электроэнергии за счет предложенного способа составляет порядка 10 %.

Проверка адекватности результатов математического моделирования выполнена на экспериментальном стенде с НАМ типа *IMM71B4Y2*. Паспортные параметры данной машины:  $P_h = 0,37$  кВт,  $I_h = 2,37/1,37$  А,  $U_h = 220/380$  В,  $\cos(\varphi_h) = 0,7$ ,  $n_h = 1370$  об/мин [186]. На валу нагрузочной машины обеспечивались постоянные значения момента нагрузки и частоты вращения. Регулирование параметров напряжения осуществлялось двухзвенным преобразователем частоты, имеющим паспортные параметры: номинальный ток на выходе – 1,2 А, напряжение на выходе – 0...400 В, частота напряжения на выходе – 0...60 Гц. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5.36.

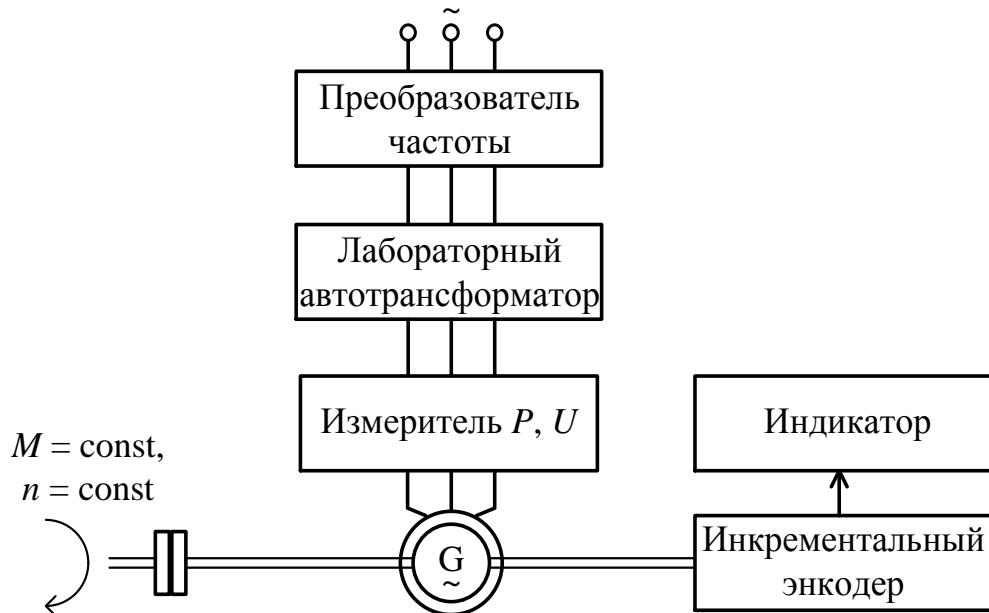


Рис. 5.36. Схема экспериментальной установки

При выполнении эксперимента осуществлялось ручное регулирование параметров напряжения, подаваемого на обмотку статора асинхронной нагрузочной машины при помощи преобразователя частоты и лабораторного автотрансформатора. Механические параметры на валу задавались плавным регулированием напряжения якоря приводного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

В результате эксперимента получены зависимости, приведенные на рис. 5.37.

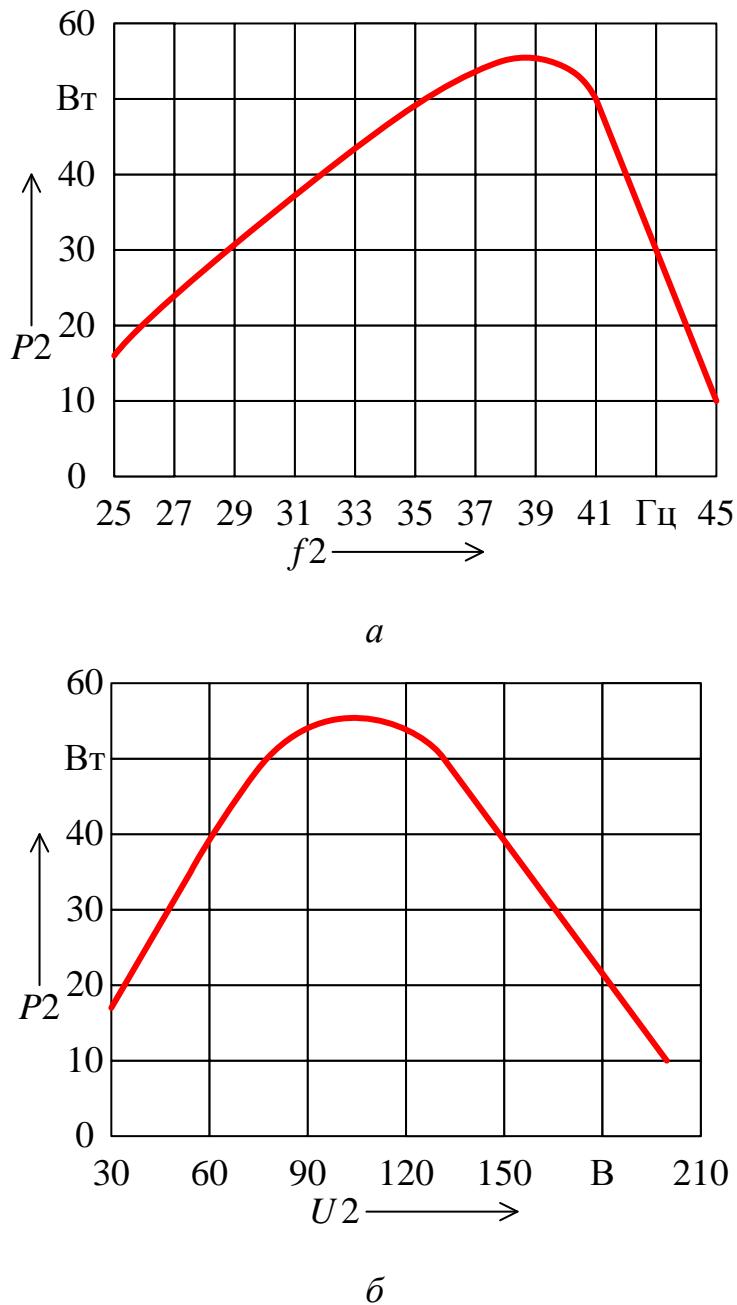


Рис. 5.37. Результаты математического моделирования и экспериментов с машинами номинальной мощностью  $P_n = 0,37$  кВт

Анализ графиков, полученных в результате математического моделирования и эксперимента (см. рис. 5.34 и 5.35), показывает их качественное совпадение, что подтверждает выводы, сделанные по результатам расчетной проверки эффективности предложенного способа снижения потерь.

Таким образом, результаты математического моделирования и экспериментальных исследований показывают, что для повышения энергетической эффективности может быть применено регулирование параметров напряжения питания нагрузочного асинхронного генератора в схеме взаимной нагрузки. Эффективность применения такого регулирования снижается при увеличении номинальной

мощности испытуемых машин. Целесообразность внедрения предложенного способа повышения эффективности испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки необходимо оценивать с учетом параметров конкретных типов двигателей, эксплуатируемых на предприятиях. С учетом приведенных оговорок данный способ может быть рекомендован к внедрению на предприятиях, занимающихся производством и эксплуатацией электрических машин.

### **5.5. Выводы по пятому разделу**

1. Анализ результатов математического моделирования работы различных схем электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки при принятых допущениях показал, что при наличии в составе схемы нагрузочного генератора постоянного тока, она имеет меньший коэффициент искажения синусоидальности кривой тока сети, чем схема с нагрузочной асинхронной машиной, работающей в режиме генератора, в 1,62 – 1,72 раза.

2. Математическое моделирование работы схем взаимной нагрузки позволило получить обоснованные рекомендуемые диапазоны значений емкости конденсаторов в звене постоянного тока для схем с нагрузочной асинхронной машиной:

- при мощности испытуемого двигателя 0,37 кВт составляет 1 – 10 мкФ;
- при мощности испытуемого двигателя 5,5 кВт составляет 10 – 100 мкФ;
- при мощности испытуемого двигателя 37 кВт составляет 100 – 1000 мкФ.

Таким образом, увеличение мощности двигателя в 10 раз ведет к увеличению необходимой емкости также в 10 раз. При применении схем взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока рекомендуемые значения емкости конденсатора в 10 раз ниже, чем при схеме с асинхронной нагрузочной машиной.

3. При разработке электротехнических комплексов для испытания АМ с учетом переходных процессов рекомендуется принимать значения емкости конденсатора в ЗПТ из больших значений, относящихся к диапазону, рекомендуемому для установившегося режима работы.

4. В результате проведенного исследования воздействия изменения напряжения на функционирование схем взаимной нагрузки для испытания асинхронных двигателей выявлено:

- при снижении напряжения в сети ниже более 5 %, действующее значение первой гармоники напряжения на выходе преобразователя частоты неизбежно опускается ниже номинального значения;

- в схеме с нагрузочной асинхронной машиной при неизменном значении напряжения на выходе преобразователя частоты необходимо иметь неизменное значение разности частот напряжений ( $\Delta f$ ), питающих испытуемый двигатель и нагрузочную машину; при снижении напряжения на выходе преобразователя частоты необходимо увеличивать  $\Delta f$ ; снижение напряжения на выходе ПЧ до значения  $U_1 = 210$  В (при  $U_c = 198$  В) приводит к необходимости увеличения  $\Delta f$  на 12 ÷ 17,5 %;

- в схеме с НГПТ для поддержания на валу номинальной нагрузки, необходимо при увеличении напряжения сети ( $U_c$ ) усиливать магнитный поток НГПТ, при уменьшении  $U_c$  – ослаблять; примерный диапазон регулирования потока для двигателей различных мощностей составляет порядка  $\pm 10\%$  от потока необходимого при  $U_c = 220$  В;

- отклонение напряжения сети ( $U_c$ ) от 220 В на  $\pm 10\%$  приводит к росту коэффициента искажения синусоидальности кривой потребляемого тока ( $K_{I\text{ и}}$ ); при определенных параметрах элементов схем испытания отклонение  $U_c$  на 10% может приводить к двукратному возрастанию  $K_{I\text{ и}}$ .

5. В результате математического моделирования работы схем взаимной нагрузки асинхронного двигателя с нагрузочной асинхронной машиной и нагрузочным генератором постоянного тока выявлено снижение энергоэффективности схем при отклонении напряжения от номинального значения на 5 ÷ 10 %. Диапазон изменения мощности, суммарно потребляемой испытуемой и нагрузочной машинами при изменении напряжения сети на  $\pm 10\%$ , для рассмотренных схем достигает более 20 % от номинальной мощности.

6. Разработан способ снижения потерь в схемах испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки за счет регулирования параметров напряжения питания нагрузочной асинхронной машины. При испытании асинхронных двигателей мощностью 250 кВт возможный эффект экономии потребляемой электроэнергии за счет предложенного способа составляет порядка 10 %. Эффективность предложенного способа испытаний асинхронных двигателей необходимо оценивать с учетом параметров конкретных типов двигателей.

## 6. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Конкурентоспособность нового оборудования во многом определяется его технико-экономическими показателями, повышения которых можно добиться в первую очередь за счет снижения себестоимости, чего при разработке электротехнических комплексов для испытания электрических машин можно достигнуть за счет снижения стоимости измерительного оборудования и уменьшения числа силовых агрегатов и сложных систем управления, задействованных в схеме испытаний.

В данном разделе представлены два варианта повышения эффективности электротехнических комплексов для испытания электрических машин:

- применение способов косвенного измерения мощности на участках схем;
- унификация схем испытаний электрических машин различного типа, позволяющая уменьшить общий перечень оборудования за счет исключения оборудования, дублирующего одинаковые функции.

### **6.1. Разработка способов косвенного определения мощности на участках схем электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин**

В рассмотренных схемах взаимной нагрузки, применяемых в электротехнических комплексах для испытания тяговых асинхронных машин применяются ПЧ, которые имеют на выходе несинусоидальное напряжение, частота которого не равна 50 Гц [62, 105].

Определение мощности электрических цепях с таким напряжением требует применения соответствующего дорогостоящего измерительного оборудования. В связи с этим особую актуальность имеет идея косвенного определения значения мощности. Косвенные способы в данном случае позволяют значительно повысить технико-экономические показатели электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин за счет снижения затрат на его измерительную часть [97, 194, 231].

### 6.1.1. Совершенствование способов определения мощности и потерь в основных элементах схем испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки

На современном уровне техники известны различные способы определения мощности в несинусоидальных цепях переменного тока.

Одним из таких способов является формирование первого сигнала путем перемножения сигналов напряжения и тока и второго – путем перемножения тех же сигналов, полученных с задержкой на определенный временной интервал.

Далее значение электрической мощности может быть определено по равным значениям накапливаемых интегралов в четные от начала измерений моменты равенства значений результатов интегрирования [141].

Функциональная схема измерения активной мощности в несинусоидальных цепях переменного тока с применением описанного способа приведена на рис. 6.1. Функциональная схема содержит следующие устройства: датчик напряжения 1, датчик тока 2; умножитель 3; линии задержки 4 и 5; интегратор 6; умножитель 7; интегратор 8; запоминающее устройство 9; устройство сравнения 10, арифметическое устройство 11; счетный триггер 12 и блок управления 13.

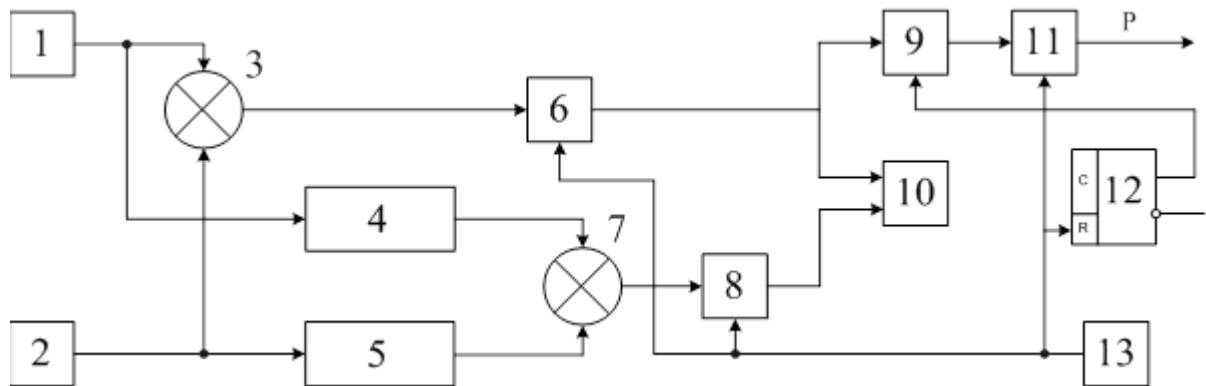


Рис. 6.1. Функциональная схема измерения активной мощности в несинусоидальных цепях переменного тока

Другой способ определения электрической мощности в цепях переменного тока основан на преобразовании значения активной электрической мощности, в пропорциональное ей значение переменного напряжения [142] (рис. 6.2).

В сформированном посредством датчиков напряжения электрическом сигнале выделяют составляющие различных полярностей. Сглаживая

пульсации обоих напряжений, преобразуют их в постоянные разнополярные напряжения, равные по величине пиковым значениям пульсирующих напряжений. Постоянные разнополярные напряжения суммируют и результирующее значение измеряют вольтметром, прокалиброванным в единицах мощности [142].

Данный способ поясняется следующей схемой, приведенной на рис. 6.2. К сети 1 подключена нагрузка 2. Напряжение с резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , подаются на входы умножителя напряжения 3.

Напряжение с выхода умножителя 3 (пропорциональное мгновенной мощности) подается на входы амплитудных детекторов 4 и 5.

Напряжения  $U_1$  и  $U_2$  подаются на сумматор 6. Результирующее напряжение с выхода сумматора 6 измеряется вольтметром 7.

Коэффициент преобразования мощности в напряжение в представленном устройстве является константой, зависящей от коэффициента усиления умножителя 3, а также значений  $R_1$  и  $R_2$ .

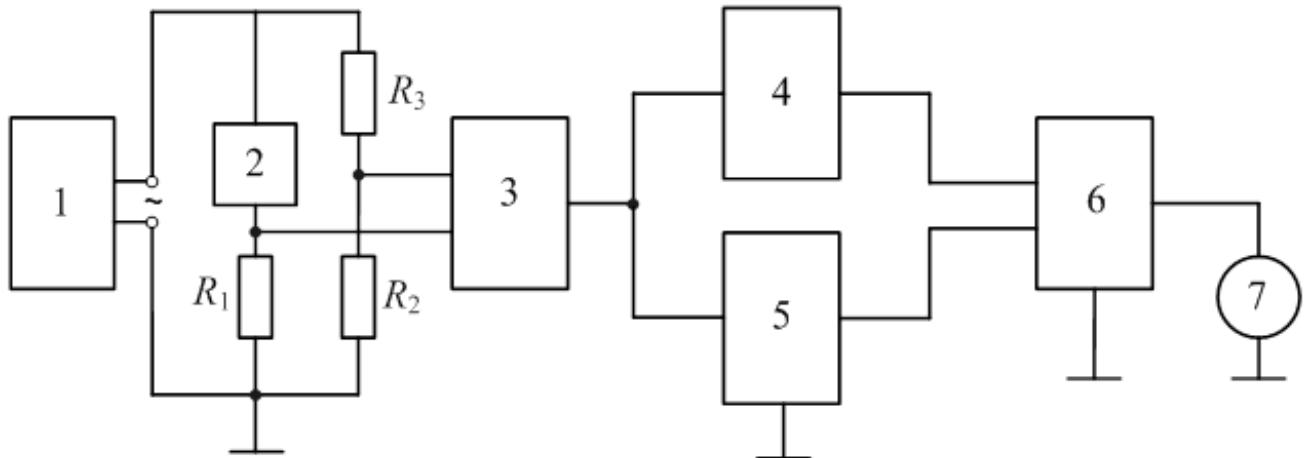


Рис. 6.2. Функциональная схема измерения активной мощности в несинусоидальных цепях переменного тока

Для определения электрической мощности несинусоидальных цепях переменного тока применяют эффект Холла (рис. 6.3).

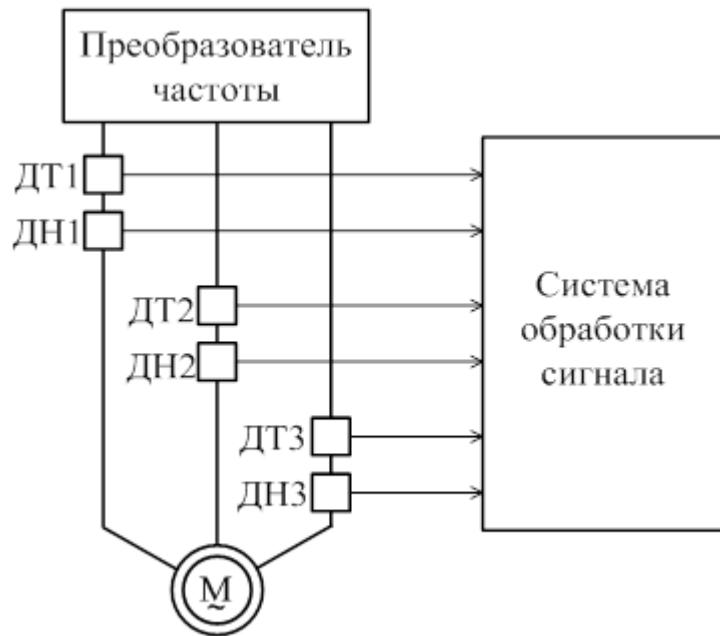


Рис. 6.3. Функциональная схема измерения активной мощности в несинусоидальных цепях переменного тока с применением датчиков Холла

Например, в одной из схем для испытания АД предложен способ определения активной мощности, требующий осуществление измерения сигналов токов и напряжения с применением датчиков Холла, обозначенных на схеме (см. рис. 6.3) в виде датчиков ДН1-3, ДТ1-3. Система обработки сигнала представляет собой аналоговую часть предварительной обработки сигналов, получаемых с данных датчиков [13].

Представленные выше способы определения активной электрической мощности требуют применения микросхем, специальных датчиков, а также наличия специализированного программного обеспечения. Следствием этого является усложнение оборудования электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин и повышение стоимости измерительной его части.

Упростить процесс определения мощности на участках электрической цепи позволяют косвенные способы, в которых для определения мощности на одном участке электрической цепи проводится измерение на других участках цепи и на основании измеренных данных выполняется расчет искомой мощности.

Рассмотрим далее косвенные способы определения мощности в ЭТК для испытаний асинхронных машин с различными типами схем их силовой части.

Рассмотрим способ определения активной мощности и потерь в элементах силовой части схемы ЭТК для испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки предложенной в источнике [114]. Элементы силовой части данной схемы приведены на рис. 6.4.

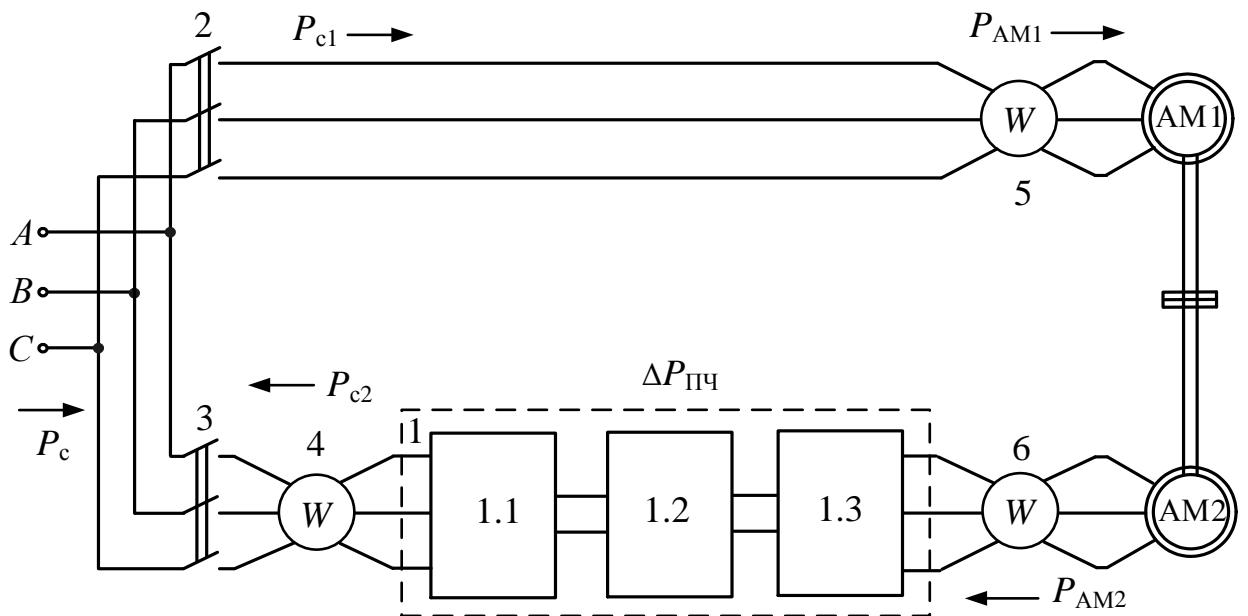


Рис. 6.4. Схема для определения значения мощности в элементах силовой части схемы испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки с использованием одного преобразователя частоты

На схеме (см. рис. 6.4) обозначены следующие элементы: 1 – преобразователь частоты, в состав которого входят два управляемых выпрямителя-инвертора 1.1 и 1.3, между которыми находится звено постоянного тока 1.2, как правило, включающее конденсатор; 2 и 3 – контакторы (или автоматы) для подключения к сети; АМ1 и АМ2 – асинхронные машины, одна из которых (АМ1) выступает в качестве испытуемого двигателя, другая (АМ2) – в качестве нагрузочного генератора; 4 – 6 – измерители мощности (ваттметры). При этом измеритель мощности 6 должен быть подходящим для измерений в цепях с несинусоидальным напряжением с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) с частотой в несколько килогерц.

На данной схеме (см. рис. 6.4) указаны мощности, проходящие по ее участкам, и потери в преобразователе частоты (ПЧ). Мощности на участках схемы считают положительными, если их направление совпадает с направлением соответствующих стрелок.

Определение электрической мощности, потребляемой или вырабатываемой асинхронными машинами в процессе испытания для схемы, приведенной на рис. 6.4, необходимо осуществлять в два этапа.

Первый этап определения мощности включает следующие действия:

включается контактор 3, подавая питание на вход ПЧ;

осуществляется плавный запуск машины АМ2 на холостом ходу до частоты напряжения сети;

включается контактор 2, подавая питание на машину АМ1;

ступенчато уменьшается частота напряжения, подаваемого на машину АМ2, за счет чего АМ2 нагружается в режиме генератора, а машина АМ1 – в режиме двигателя;

далее на каждой из ступеней нагрузки машины АМ1 при установившимся режиме работы проводится ряд измерений и вычислений:

выполняется измерение мощности приборами 4 – 6;

по полученным в эксперименте значениям мощности строят зависимость потерь в ПЧ 1 от  $P_{c2}$  в соответствии с выражением:

$$\Delta P_{\text{ПЧ}} = |P_{c2} - P_{\text{AM2}}|, \quad (6.1)$$

где  $P_{\text{AM2}}$  – мощность, вырабатываемая машиной АМ2;

$P_{c1}$  – мощность, возвращаемая ПЧ в сеть;

каждому из значений  $\Delta P_{\text{ПЧ}}$  ставится в соответствие значение  $P_{c2}$ , в результате чего можем вывести зависимость  $\Delta P_{\text{ПЧ}} = f(P_{c2})$ .

Первый этап проводится только один раз для получения и дальнейшего многократного использования зависимости  $\Delta P_{\text{ПЧ}} = f(P_{c2})$ .

На втором этапе измеритель мощности 6 не требуется. При определенном статическом режиме работы машин измеряются  $P_{\text{AM1}}$  и  $P_{c2}$ , после чего определяют потери в ПЧ по зависимости  $\Delta P_{\text{ПЧ}} = f(P_{c2})$ .

Мощность вырабатывающую машиной АМ2 можно определить по выражению:

$$P_{\text{AM2}} = P_{c2} + \Delta P_{\text{ПЧ}}. \quad (6.2)$$

За счет переключения ваттметра 4 на сторону сети, как показано на рис. 6.5, на втором этапе можно добиться условий работы для измерительных приборов с более синусоидальными токами и напряжениями.

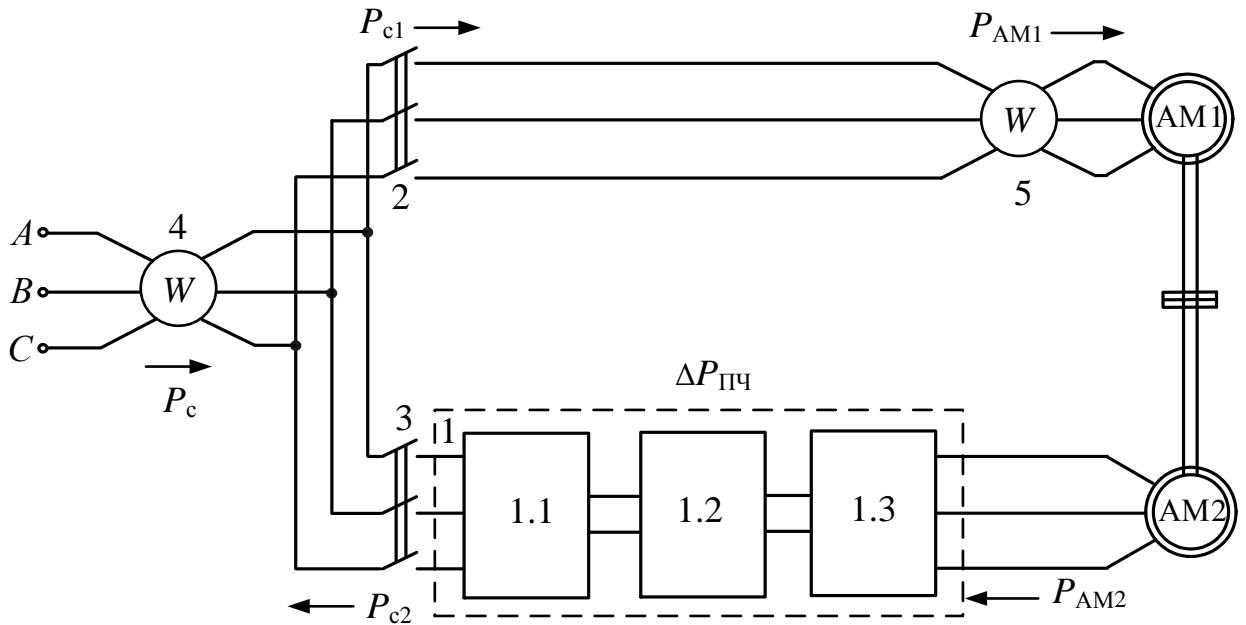


Рис. 6.5. Усовершенствованная схема (с применением одного ПЧ) второго этапа испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки

При такой схеме (см. рис. 6.5) мощность  $P_{c2}$  необходимо определять по разности измерений двух ваттметров:

$$P_{c2} = P_c - P_{c1}, \quad (6.3)$$

где  $P_c$  – значение мощности, потребляемой всей схемой из сети;

$P_{c1}$  – значение мощности, потребляемой машиной АМ1.

Практическая ценность представленного способа заключается в том, что при определении потребляемой и вырабатываемой мощностей асинхронными машинами АМ1 и АМ2 измерения требуют применения измерительных приборов, спроектированных для работы на частоте напряжения 50 Гц с небольшими допусками по коэффициенту несинусоидальности измеряемых напряжений и токов, что существенно удешевляет и упрощает схему испытаний.

Другой вариант определения мощности вырабатываемой машиной АМ2 в схеме испытаний с одним ПЧ может быть осуществлен с применением схемы, приведенной на рис. 6.6.

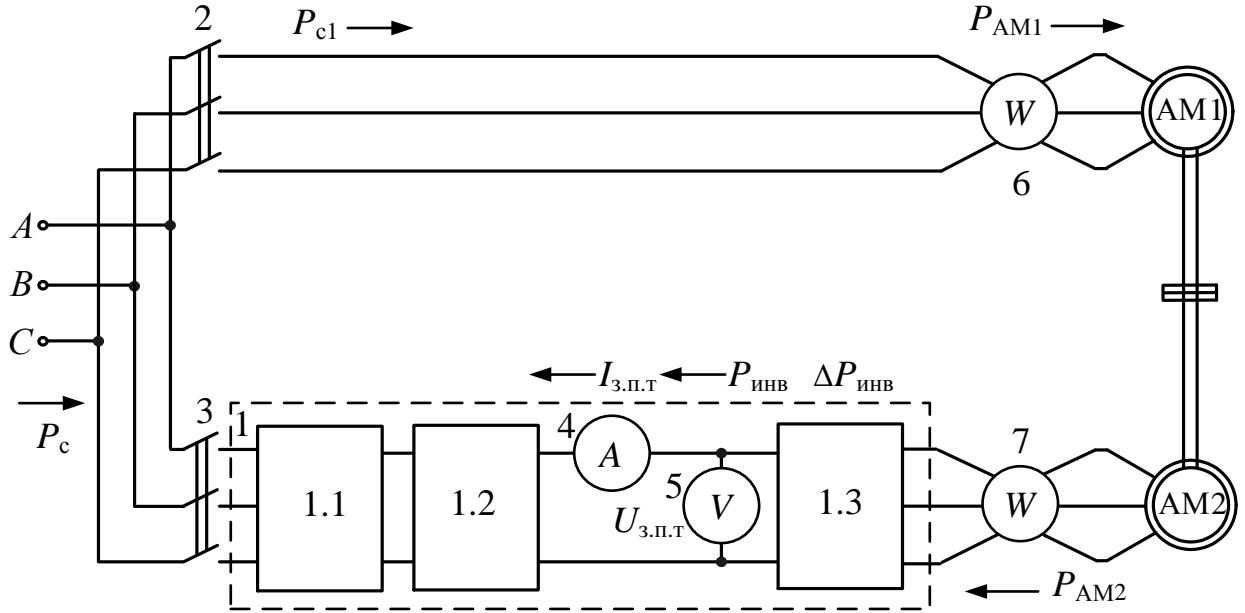


Рис. 6.6. Схема подключения измерительных приборов при определении мощности и потерь в основных элементах электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки с использованием одного ПЧ

Для данной схемы (см. рис. 6.6) отличие на первом этапе определения потерь и мощностей заключается в следующем:

вместо определения потерь в ПЧ необходимо определить потери в выпрямителе-инверторе 1.3 по выражению:

$$\Delta P_{\text{inv}} = |P_{\text{inv}} - P_{\text{AM2}}|, \quad (6.4)$$

где  $P_{\text{inv}}$  – мощность в звене постоянного тока ПЧ;

$$P_{\text{inv}} = U_{\text{3.p.t}} I_{\text{3.p.t}}, \quad (6.5)$$

где  $I_{\text{3.p.t}}$  – ток в звене постоянного тока ПЧ;

$U_{\text{3.p.t}}$  – напряжение в звене постоянного тока ПЧ;

каждому из значений  $\Delta P_{\text{inv}}$  ставится в соответствие значение  $P_{\text{inv}}$ , в результате чего можем вывести зависимость  $\Delta P_{\text{inv}} = f(P_{\text{inv}})$ .

Тогда на втором этапе мощность, вырабатываемую машиной АМ2, можно определить по выражению:

$$P_{\text{AM2}} = P_{\text{inv}} + \Delta P_{\text{inv}}. \quad (6.6)$$

Ваттметр 7 на втором этапе также не нужен. Следовательно, на втором этапе схема сводится к виду, приведенному на рис. 6.7.

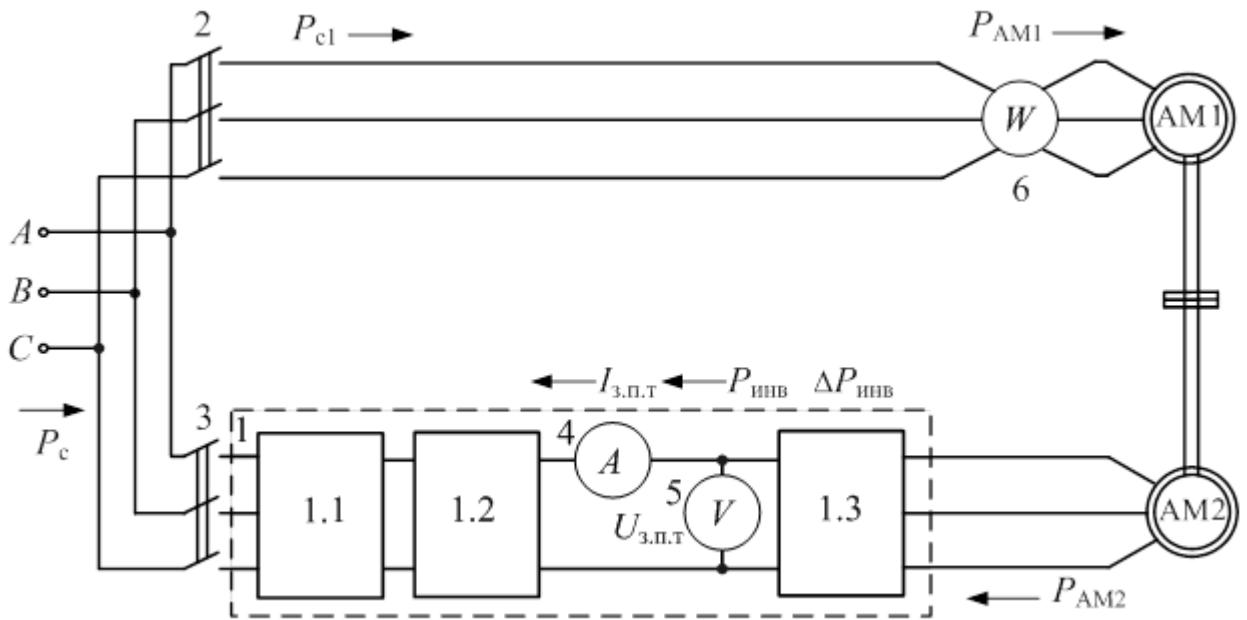


Рис. 6.7. Схема на втором этапе испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки с использованием одного преобразователя частоты

Практическая ценность данного варианта измерений заключается в том, что на втором этапе можно отказаться от измерения мощности в цепи с несинусоидальными напряжениями, а проводить более простые измерения в звене постоянного тока.

Рассмотрим способ определения мощностей и потерь в основных элементах электротехнического комплекса для испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки, идея которого изложена в [161]. Основные элементы данной схемы приведены на рис. 6.8.

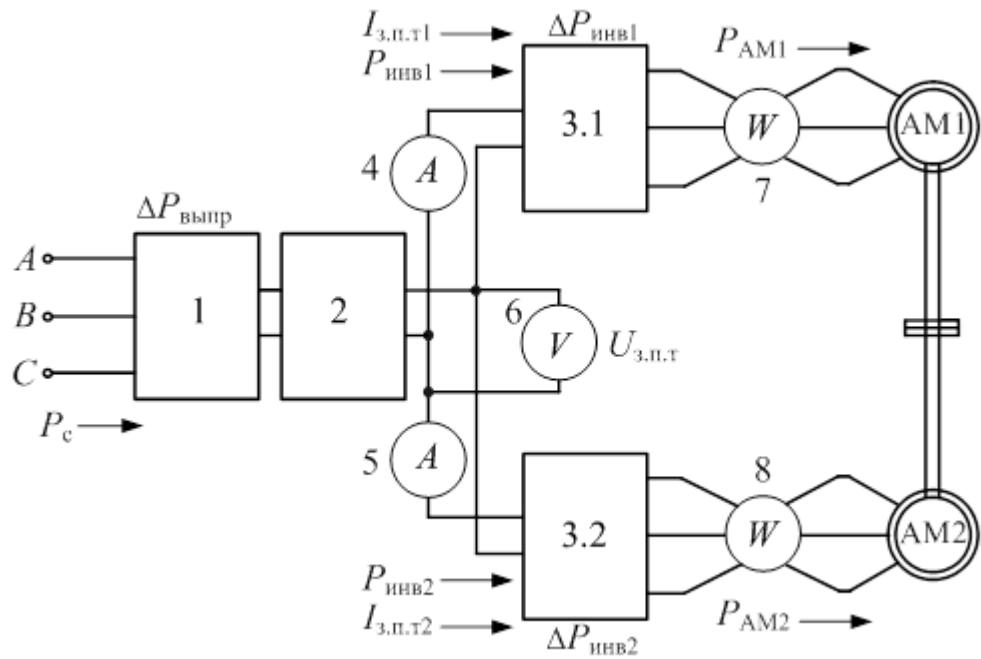


Рис. 6.8. Схема для определения мощности и потерь в основных элементах электротехнического комплекса для испытания асинхронных машин с общим выпрямителем, работающим на два управляемых выпрямителя-инвертора

Данная схема является симметричной и, следовательно, может без изменений и переключений применяться для испытания в двигательном режиме как машины АМ1, так и машины АМ2.

На схеме (см. рис. 6.8) обозначены следующие элементы: 1 – неуправляемый выпрямитель, 2 – звено постоянного тока (ЗПТ), 3.1 и 3.2 – управляемые выпрямители-инверторы; АМ1 и АМ2 – испытуемая и нагрузочная асинхронные машины; 4 и 5 – амперметры постоянного тока; 6 – вольтметр постоянного тока; 7 – 8 – измерители мощности (ваттметры), подходящие для измерений в цепях с несинусоидальным напряжением с ШИМ с частотой в несколько килогерц.

Вместо двух приборов 7 и 8 возможно применение одного измерителя мощности 7 с возможностью его переключения на место измерителя мощности 8 без изменения режима работы АМ1 и АМ2.

На данной схеме (см. рис. 6.8) указаны мощности и токи, проходящие по ее участкам, и потери в выпрямителе ( $\Delta P_{вып}$ ) и обоих выпрямителях-инверторах ( $\Delta P_{инв1}$ ,  $\Delta P_{инв2}$ ).

Мощности и токи на участках схемы считают положительными, если их направление совпадает с направлением соответствующих стрелок.

Определение электрической мощности, потребляемой или вырабатываемой асинхронными машинами в процессе испытания, для схемы, приведенной на рис. 6.8, следует выполнять в два этапа.

На первом этапе:

подается питание на неуправляемый выпрямитель 1;

осуществляется запуск электрических машин без нагрузки на валу путем подачи на их обмотки статора напряжения с номинальной частотой;

при неизменной номинальной частоте напряжения на выходе управляемого выпрямителя-инвертора 3.1, ступенчато уменьшается частота напряжения на выходе управляемого выпрямителя-инвертора 3.2, за счет чего машина АМ2 нагружается в генераторном режиме, а машина АМ1 – в двигательном режиме;

далее на каждой из ступеней нагрузки машины АМ1 при установившимся режиме работы проводится ряд измерений и вычислений:

при помощи прибора 7 проводится измерение мощности  $P_{AM1}$ , которая подается на машину АМ1 от управляемого выпрямителя-инвертора 3.1;

при помощи прибора 8 проводится измерение мощности  $P_{AM2}$ , которая передается от машины АМ2 к управляемому выпрямителю-инвертору 3.2;

проводится определение мощности, передаваемой по ЗПТ к выпрямителю-инвертору 3.1, как произведение величины постоянного тока  $I_{3.p.t1}$ , измеряемого амперметром 4 и напряжения в ЗПТ  $U_{3.p.t}$ , измеряемого вольтметром 6:

$$P_{inv1} = I_{3.p.t1} \cdot U_{3.p.t}, \quad (6.7)$$

каждому из значений  $P_{inv1}$  ставится в соответствие значение  $P_{AM1}$ , в результате чего можем вывести зависимость  $P_{inv1} = f(P_{AM1})$ ;

проводится определение мощности, передаваемой по ЗПТ выпрямителю-инвертору 3.2, как произведение значения тока  $I_{3.p.t2}$ , измеряемого амперметром 5 и напряжения в ЗПТ, измеряемого вольтметром 6:

$$P_{inv2} = I_{3.p.t2} \cdot U_{3.p.t}, \quad (6.8)$$

каждому из значений  $P_{inv2}$  ставится в соответствие значение  $P_{AM2}$ , в результате чего можем вывести зависимость  $P_{inv2} = f(P_{AM2})$ ;

строится зависимость потерь мощности в инверторе 3.1 от мощности на входе машины АМ1:

$$\Delta P_{\text{инв}1} = |P_{\text{инв}1} - P_{\text{AM1}}|, \quad (6.9)$$

каждому из значений  $\Delta P_{\text{инв}1}$  ставится в соответствие значение  $P_{\text{инв}1}$ , в результате чего можем вывести зависимость  $\Delta P_{\text{инв}1} = f(P_{\text{инв}1})$ ;

строится зависимость потерь мощности в инверторе 3.2 от мощности на выходе нагрузочной машины АМ2:

$$\Delta P_{\text{инв}2} = |P_{\text{инв}2} - P_{\text{AM2}}|; \quad (6.10)$$

каждому из значений  $\Delta P_{\text{инв}2}$  ставится в соответствие значение  $P_{\text{инв}2}$ , в результате чего можем вывести зависимость  $\Delta P_{\text{инв}2} = f(P_{\text{инв}2})$ ;

зависимости  $\Delta P_{\text{инв}1} = f(P_{\text{инв}1})$  и  $\Delta P_{\text{инв}2} = f(P_{\text{инв}2})$  необходимо также получить при неизменной номинальной частоте напряжения на выходе управляемого выпрямителя-инвертора 3.2, ступенчато уменьшая частоту напряжения на выходе управляемого выпрямителя-инвертора 3.1, за счет чего машина АМ1 нагружается в генераторном режиме, а машина АМ2 – в двигательном режиме;

Первый этап проводится единожды с целью получения и дальнейшего многократного использования зависимостей  $\Delta P_{\text{инв}1} = f(P_{\text{инв}1})$  и  $\Delta P_{\text{инв}2} = f(P_{\text{инв}2})$ .

На втором этапе измерители мощности 7 и 8 не требуются.

При определенном статическом режиме работы измеряют значения  $I_{3.\text{п.т}1}$ ,  $I_{3.\text{п.т}2}$ ,  $U_{3.\text{п.т}}$  после чего определяют величины:

- $P_{\text{инв}1}$ ,  $P_{\text{инв}2}$  определяются из выражений (6.7), (6.8);
- $\Delta P_{\text{инв}1}$ ,  $\Delta P_{\text{инв}2}$  – из зависимостей  $\Delta P_{\text{инв}1} = f(P_{\text{инв}1})$ ,  $\Delta P_{\text{инв}2} = f(P_{\text{инв}2})$ ;
- $P_{\text{AM1}}$ ,  $P_{\text{AM2}}$  – из выражений:

$$P_{\text{AM1}} = P_{\text{инв}1} - \Delta P_{\text{инв}1}, \quad (6.11)$$

$$P_{\text{AM2}} = P_{\text{инв}2} - \Delta P_{\text{инв}2}. \quad (6.12)$$

Практическая ценность приведенного выше способа определения мощности состоит в том, что для выполняемых измерений необходимо использовать измерительные приборы, спроектированные для работы на частоте напряжения 50 Гц с небольшими допусками по несинусоидальности измеряемых напряжений и токов, что существенно удешевляет и упрощает измерительную часть ЭТК для испытаний тяговых электрических машин.

Приведенный способ определения мощностей и потерь в основных элементах схемы испытания асинхронных машин с общим выпрямителем, работающим на два управляемых выпрямителя-инвертора приведен в [161].

Рассмотрим способ определения мощности и потерь в элементах ЭТК для испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки. Основные элементы данной схемы приведены на рис. 6.9.

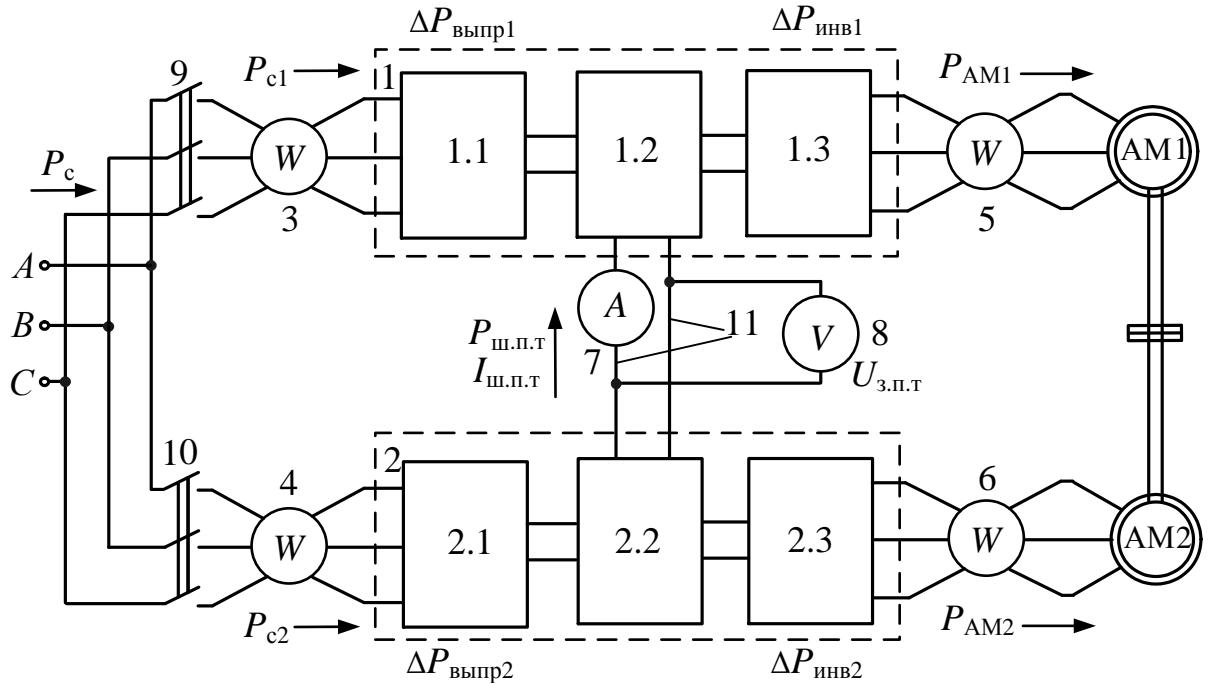


Рис. 6.9. Схема (с применением двух ПЧ) для определения мощности и потерь в элементах электротехнического комплекса для испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки

Данный способ определения мощностей и потерь не применим к схеме испытания асинхронных машин с общим выпрямителем, работающим на два управляемых выпрямителя-инвертора (см. рис. 6.8).

На схеме (см. рис. 6.9) обозначены:

AM1, AM2 – асинхронные машины; 1, 2 – ПЧ; 1.1, 1.2 – неуправляемые выпрямители; 1.2, 2.2 – ЗПТ; 1.3, 2.3 – управляемые выпрямители-инверторы; 3 – 6 – измерители мощности; 7 – амперметр постоянного тока; 8 – вольтметр постоянного тока; 9, 10 – контакторы; 11 – ШПТ. При этом измерители мощности 5 и 6 должны быть подходящими для измерений в цепях с несинусоидальным напряжением с ШИМ с частотой в несколько килогерц.

Вместо двух приборов 5 и 6 возможно применение одного измерителя мощности 5 с возможностью его переключения на место измерителя мощности 6 без изменения режима работы АМ1 и АМ2.

На данной схеме (см. рис. 6.9) указаны мощности, проходящие по ее участкам, и потери, учитываемые в элементах преобразователя частоты (ПЧ). Мощности на участках схемы считают положительными, если их направление совпадает с направлением соответствующих стрелок.

Следует отметить, что в данной схеме для подключения к питанию обоих преобразователей частоты (ПЧ1 и ПЧ2) достаточно включить хотя бы один из контакторов 9 или 10. При этом преобразователь частоты, выпрямитель которого оказывается не подключенным к сети, получает питание от другого ПЧ через шину постоянного тока 11.

Данная схема также как и предыдущая является симметричной и, следовательно, может без изменений и переключений применяться для испытания в двигательном режиме как машины АМ1, так и машины АМ2.

Для определения электрической мощности, потребляемой или вырабатываемой асинхронными машинами в процессе испытания, для схемы, приведенной на рис. 6.9, необходимо выполнить три этапа.

Первый этап включает в себя:

при замкнутом контакторе 9 и разомкнутом контакторе 10 ( $P_{c2} = 0$ ,  $\Delta P_{выпр2} = 0$ ,  $P_{выпр2} = 0$ ) с выбранным шагом задают определенное количество различных ступеней нагрузки машины АМ1, на каждой из которых измеряют  $I_{ш.п.т}$ ,  $U_{з.п.т}$ ,  $P_{c1}$ ,  $P_{AM1}$ ,  $P_{AM2}$  и определяют следующие величины:

- мощности проходящей по ШПТ:

$$P_{ш.п.т} = I_{ш.п.т} U_{з.п.т}, \quad (6.13)$$

- потерю в управляемом выпрямителе-инверторе 2.3:

$$\Delta P_{инв2} = |P_{ш.п.т} - P_{AM2}|, \quad (6.14)$$

- мощности, подводимой к выпрямителю-инвертору 2.3:

$$P_{инв2} = P_{ш.п.т}, \quad (6.15)$$

каждому из значений  $\Delta P_{\text{инв}2}$  ставится в соответствие значение  $P_{\text{инв}2}$ , в результате чего можем вывести зависимость  $\Delta P_{\text{инв}2} = f(P_{\text{инв}2})$ .

На втором этапе при замкнутых контакторах 9 и 10 определяют следующие величины:

- мощность на выходе выпрямителя 2.1:

$$P_{\text{выпр}2} = P_{\text{инв}2} + P_{\text{ш.п.т}}, \quad (6.16)$$

- потери мощности в выпрямителе 2.1:

$$\Delta P_{\text{выпр}2} = |P_{c2} - P_{\text{выпр}2}|, \quad (6.17)$$

каждому из значений  $\Delta P_{\text{выпр}2}$  ставится в соответствие значение  $P_{c2}$ , в результате чего можем вывести зависимость  $\Delta P_{\text{выпр}2} = f(P_{c2})$ .

Первые два этапа необходимо повторить для определения зависимостей  $\Delta P_{\text{инв}1} = f(P_{\text{инв}1})$  и  $\Delta P_{\text{выпр}1} = f(P_{c1})$  для элементов первого преобразователя частоты. Для этого при повторении первого этапа необходимо замкнуть kontaktor 10 и разомкнуть kontaktor 9. При этом выражения (6.16) и (6.17) соответственно примет вид:

$$P_{\text{выпр}1} = P_{\text{инв}1} - P_{\text{ш.п.т}}, \quad (6.18)$$

$$\Delta P_{\text{выпр}1} = |P_{c1} - P_{\text{выпр}1}|. \quad (6.19)$$

Однократно полученные на первых двух этапах зависимости многократно применяют на третьем этапе, который проводится при каждом испытании электрических машин.

На третьем этапе измеряются величины  $P_{c1}$  и  $P_{c2}$  в цепи с синусоидальным напряжением и  $I_{\text{ш.п.т}}$ ,  $U_{\text{з.п.т}}$ , в шине постоянного тока, по которым находятся следующие величины:

- $\Delta P_{\text{выпр}1}$ ,  $\Delta P_{\text{выпр}2}$  из зависимости  $\Delta P_{\text{выпр}1} = f(P_{c1})$  и  $\Delta P_{\text{выпр}2} = f(P_{c2})$ ;
- $P_{\text{выпр}1}$ ,  $P_{\text{выпр}2}$  из выражения (6.19) и (6.17);
- $P_{\text{ш.п.т}}$ , из выражения (6.13);
- $P_{\text{инв}1}$ ,  $P_{\text{инв}2}$  могут быть выражены из формул (6.18) и (6.16);
- $\Delta P_{\text{инв}1}$ ,  $\Delta P_{\text{инв}2}$  из зависимостей  $\Delta P_{\text{инв}1} = f(P_{\text{инв}1})$  и  $\Delta P_{\text{инв}2} = f(P_{\text{инв}2})$ ;

-  $P_{AM2}$  может быть выражена из формулы (6.14) с учетом направления мощности;

-  $P_{AM1}$  может быть рассчитана аналогично  $P_{AM2}$ .

При определении мощности испытуемых машин недостатком последних двух приведенных способов является большое количество измерений и вычислений для определения функциональных зависимостей между мощностями и потерями в элементах схемы.

Кроме этого, несмотря на синусоидальность напряжения сети (при допущении бесконечной мощности сети, что далеко не всегда допустимо), ток, проходящий к преобразователям частоты от сети, будет несинусоидальный.

Все это приводит к возникновению дополнительной погрешности при определении мощности, потребляемой двигателями при испытаниях.

При косвенном определении мощностей потребляемых (вырабатываемых) асинхронными машинами при испытаниях требуется проведение предварительных измерений для нахождения рабочих характеристик, отражающих зависимости потерь в элементах преобразователей частоты (ПЧ) от их нагрузки.

В ПЧ следует выделить следующие виды потерь:

- 1) потери в выпрямителях ( $\Delta P_{вып1}, \Delta P_{вып2}$ );
- 2) потери в управляемых выпрямителях-инверторах ( $\Delta P_{инв1}, \Delta P_{инв2}$ );
- 3) потери в системах управления (СУ) выпрямителями-инверторами ( $\Delta P_{СУ1}, \Delta P_{СУ2}$ ).

Обозначим:  $P_c$  – мощность сети,  $P_{AM1}$  и  $P_{AM2}$  – мощности асинхронных машин, подключенных к ПЧ.

Способы определения потерь в двух предыдущих способах не учитывают потери на питание систем управления ( $\Delta P_{СУ1}, \Delta P_{СУ2}$ ).

Кроме того, в последнем рассмотренном способе имеется избыточное количество измерительных приборов (см. рис. 6.9): по одному ваттметру на входе каждого ПЧ (на стороне сети).

Модернизированная схема для определения потерь в элементах испытательного комплекса с необходимым набором измерительных приборов приведена на рис. 6.10 [162].

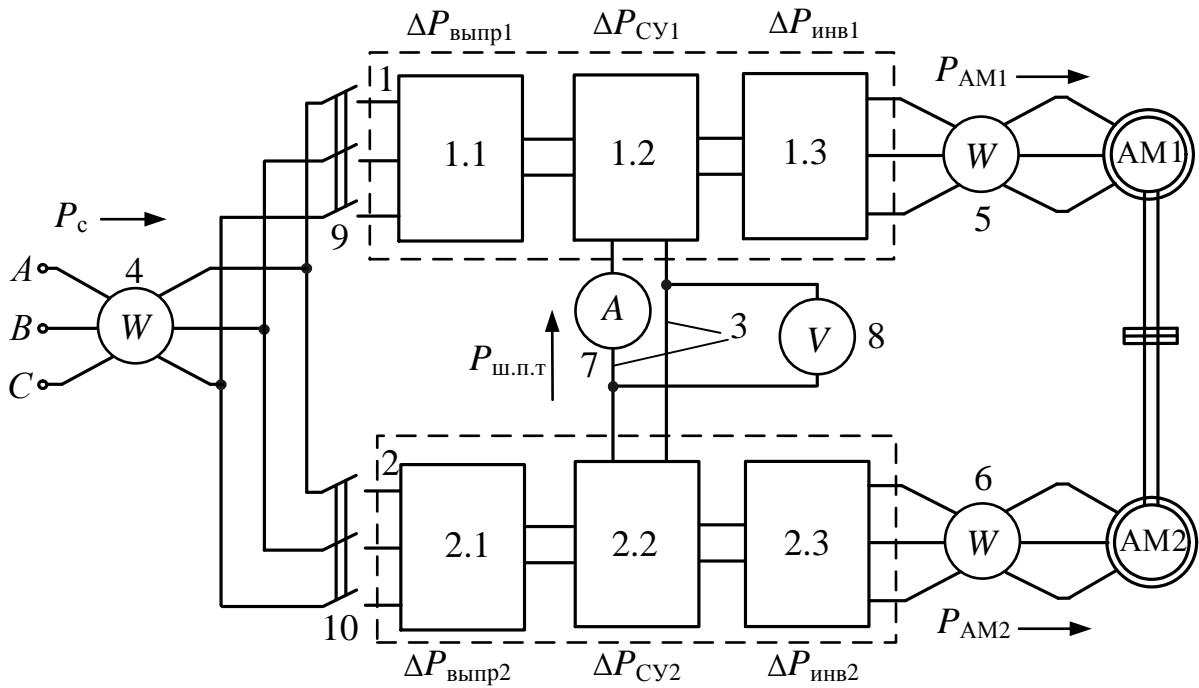


Рис. 6.10. Схема для определения потерь в элементах ПЧ

На схеме (см. рис. 6.10) обозначены: 1 и 2 – ПЧ, 1.1 и 1.2 – диодные выпрямители, 1.2 и 2.2 – ЗПТ, 1.3 и 2.3 – управляемые выпрямители-инверторы, 3 – шина постоянного тока, 4, 5 и 6 – измерители мощности (ваттметры), 7 – амперметр, 8 – вольтметр, 9 и 10 – контакторы (или автоматы).

В отличие от схемы, приведенной на рис. 6.9, на выходе представленной схемы (см. рис. 6.10) имеется только один ваттметр 4.

Снижения погрешности при определении мощности в рассматриваемом типе схем испытания (см. рис. 6.8, 6.9) можно добиться путем применения следующего подключения измерительных приборов, приведенного на рис. 6.11 и 6.12, и представленных далее алгоритмов.

Схема испытания асинхронных машин путем их взаимной нагрузки, представленная на рис. 6.11, состоит из преобразователей частоты 1 и 2, состоящих соответственно из неуправляемых выпрямителей 1.1 и 2.1, ЗПТ 1.2 и 2.2 и выпрямителей-инверторов напряжения 1.3 и 2.3, коммутатора 4, амперметров (датчиков тока) 5 и 6, вольтметра (датчика напряжения) 7 и асинхронных машин AM1 и AM2 [126]. Данная схема соответствует устройству, приведенному в [129].

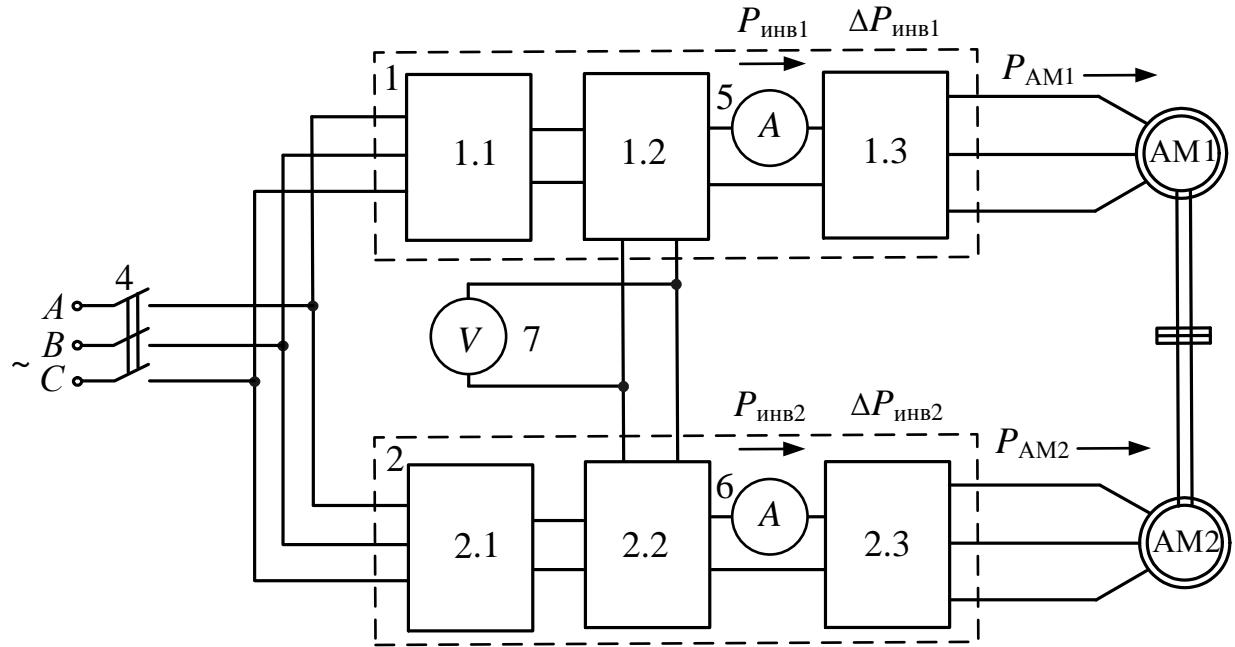


Рис. 6.11. Схема с двумя преобразователями частоты, обеспечивающая предлагаемый способ определения мощности

Для испытательного комплекса с одним выпрямителем и двумя выпрямителями-инверторами, приведенного в [116], схема, обеспечивающая предлагаемый способ определения мощности, должна иметь вид, приведенный на рис. 6.12.

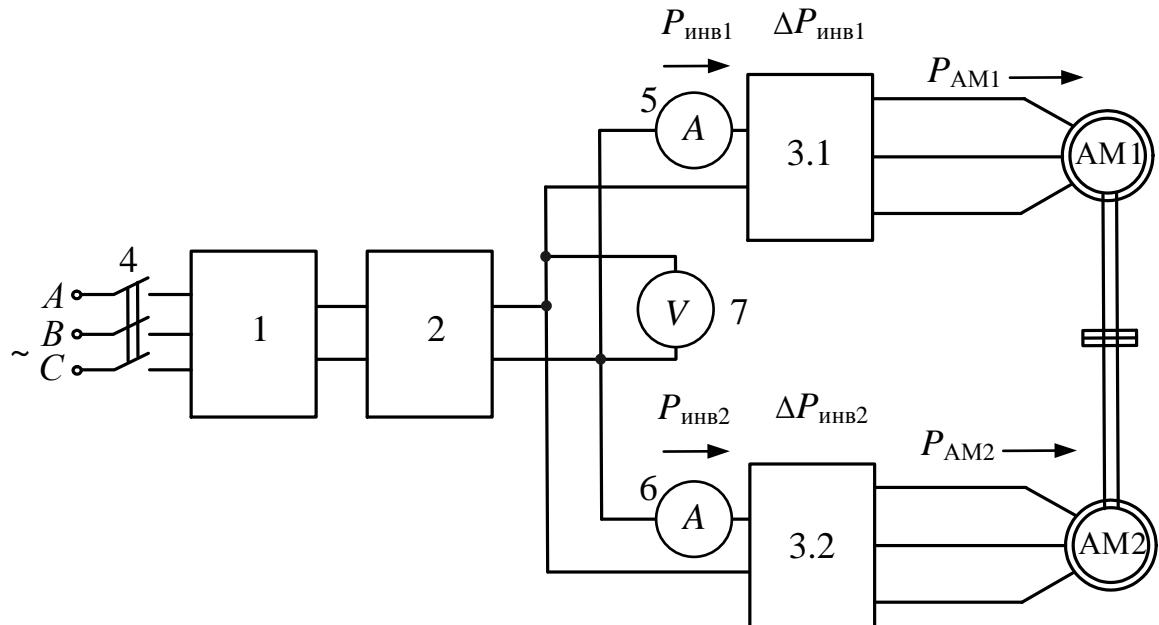


Рис. 6.12. Схема с одним выпрямителем и двумя выпрямителями-инверторами, обеспечивающая предлагаемый способ определения мощности

Данная схема (см. рис. 6.12) имеет состав оборудования практически аналогичный предыдущей схеме (см. рис. 6.11), за исключением того, что в ней не применяются преобразователи частоты. Вследствие этого схема упрощена за счет того, что имеет общее ЗПТ, а вместо двух параллельно работающих выпрямителей применяется один общий.

Представленные на рис. 6.11 и 6.12 схемы позволяют осуществить определение электрической мощности асинхронных машин в два этапа. Алгоритм, осуществления первого этапа для обеих схем, приведен на рис. 6.13.

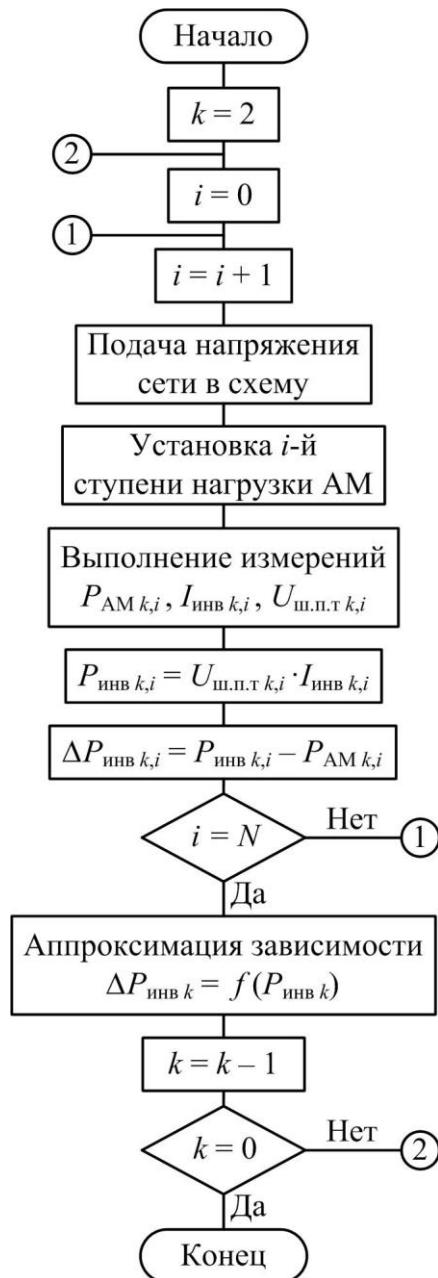


Рис. 6.13. Алгоритм первого этапа определения мощности (предварительный этап перед испытаниями асинхронных двигателей)

На первом этапе предлагаемого способа необходимо так же как и на первом этапе предыдущего способа выполнить ряд измерений и определить зависимости  $\Delta P_{\text{инв}1} = f(P_{\text{инв}1})$  и  $\Delta P_{\text{инв}2} = f(P_{\text{инв}2})$ . Данные зависимости для испытательного комплекса необходимо получить только один раз. Повторное их получение необходимо только при замене статических преобразователей, входящих в состав комплекса. Далее полученные зависимости можно применять на втором этапе, который проводится при каждом испытании асинхронных машин методом взаимной нагрузки на испытательном комплексе. В отличие от предыдущего способа определения мощности для реализации данного способа благодаря наличию амперметров (датчиков тока) 5 и 6 в звене постоянного тока на входе каждого управляемого выпрямителя-инвертора отпадает необходимость подключения то одного, то другого преобразователя частоты к сети. В предлагаемых схемах (см. рис. 6.11 и 6.12) достаточно иметь только один общий коммутатор (контактор или автомат) 4 на стороне сети.

Алгоритм, описывающий процесс осуществления второго этапа предлагаемого способа для обеих схем (см. рис. 6.11 и 6.12), приведен на рис. 6.14.



Рис. 6.14. Алгоритм второго этапа определения мощности (этап испытаний асинхронных двигателей)

На втором этапе при проведении испытаний (см. рис. 6.14) измеряются напряжение постоянного тока  $U_{\text{ш.п.т}}$  (вольтметром 7) и токи со стороны ЗПТ на входах соответствующих управляемых выпрямителей-инверторов  $I_{\text{инв1}}$  (амперметром 5) и  $I_{\text{инв2}}$  (амперметром 6).

Вычисление мощностей  $P_{\text{инв1}}$  и  $P_{\text{инв2}}$  осуществляется по произведению напряжения  $U_{\text{ш.п.т}}$  и соответствующего тока.

Далее по зависимостям  $\Delta P_{\text{инв1}} = f(P_{\text{инв1}})$  и  $\Delta P_{\text{инв2}} = f(P_{\text{инв2}})$ , полученным на первом этапе, вычисляются потери в инверторах, исходя из которых, находится мощность потребляемая или вырабатываемая асинхронными машинами АМ1 и АМ2 по выражениям:

$$P_{\text{AM1}} = P_{\text{инв1}} + \Delta P_{\text{инв1}}. \quad (6.20)$$

$$P_{\text{AM2}} = P_{\text{инв2}} + \Delta P_{\text{инв2}}. \quad (6.21)$$

Таким образом, предложенный способ определения мощности имеет меньшее количество промежуточных измерений (в пяти электрических цепях) по сравнению со способом, проиллюстрированным на рис. 6.9 (в шести электрических цепях). Также исключается погрешность, связанная с аппроксимацией зависимостей  $\Delta P_{\text{выпр1}} = f(P_{c1})$ ,  $\Delta P_{\text{выпр2}} = f(P_{c2})$ , полученных по экспериментальным данным. Следовательно, предложенный способ определения мощности имеет меньшую погрешность по сравнению с ближайшими аналогами, сохраняя все их преимущества.

Упрощение предложенной схемы (см. рис. 6.11) по сравнению с аналогом (см. рис. 6.9) обусловлено полным отказом от применения двух ваттметров на входе преобразователей частоты, а также двух контакторов (коммутаторов) взамен одного, но при этом вместо одного амперметра в шине постоянного тока необходимо наличие двух амперметров, подключенных к входам управляемых выпрямителей-инверторов. Такое изменение схемы снижает ее себестоимость и повышает надежность.

#### *6.1.2. Обоснование применимости предложенных способов определения мощностей, потребляемых и вырабатываемых асинхронными машинами в схемах испытания методом взаимной нагрузки*

В предложенных косвенных способах определения мощностей, потребляемых и вырабатываемых асинхронными машинами в схемах испытания методом взаимной нагрузки в п. 6.1.2 предложено проводить измерения в цепях постоян-

ного тока. Данные измерения предлагается проводить стандартными общепромышленными приборами либо с применением датчиков тока и напряжения, не предназначенными для измерений пульсирующих токов и напряжений, и использовать их для определения мощностей передаваемых через выпрямители-инверторы в цепи переменного тока обмоток статора асинхронных машин. Однако постоянное напряжение и токи в ЗПТ рассмотренных схем помимо постоянной имеют переменную составляющую, наличие которой обусловлено работой неуправляемых выпрямителей и ШИМ выпрямителей-инверторов. В связи с этим предложенные способы определения мощностей будут обладать дополнительной методической погрешностью.

Для оценки величины методической погрешности предложенных способов, обусловленной переменными составляющими токов и напряжения в ЗПТ выполнено математическое моделирование физических процессов в испытательных комплексах.

При математическом моделировании приняты следующие допущения:

- в схеме все полупроводниковые элементы являются идеальными;
- сеть имеет бесконечную мощность;
- напряжение на выходе неуправляемых выпрямителей не зависит от их нагрузки.

Примененные математические модели приведены в разд. 3 данной работы.

Для асинхронных двигателей типа 5А трех номинальных мощностей (0,37 кВт, 5,5 кВт и 250 кВт) по каталожным данным [66] найдены параметры схемы замещения по методике из [186] и смоделирована работа схемы испытания при различных значениях емкости  $C$  в ЗПТ (см. рис. 6.15). Примеры графиков с расчётными действующими значениями напряжения в ЗПТ для двигателей номинальной мощностью 5,5 кВт, работающих в установившемся режиме, приведены на рис. 6.15 [192].

Положительные значения тока на рис. 6.16, а соответствуют потреблению мощности электрической машиной, подключенной к данному выпрямителю-инвертору, отрицательные значения – генерации мощности с отдачей ее в ЗПТ.

Анализ приведенных графиков (см. рис. 6.15) показывает, что при уменьшении емкости  $C$  происходит усиление пульсаций напряжения. Анализ результатов моделирования также показывает, что значительное увеличение емкости позволяет добиваться полного нивелирования высокочастотных пульсаций, вызванных ШИМ.

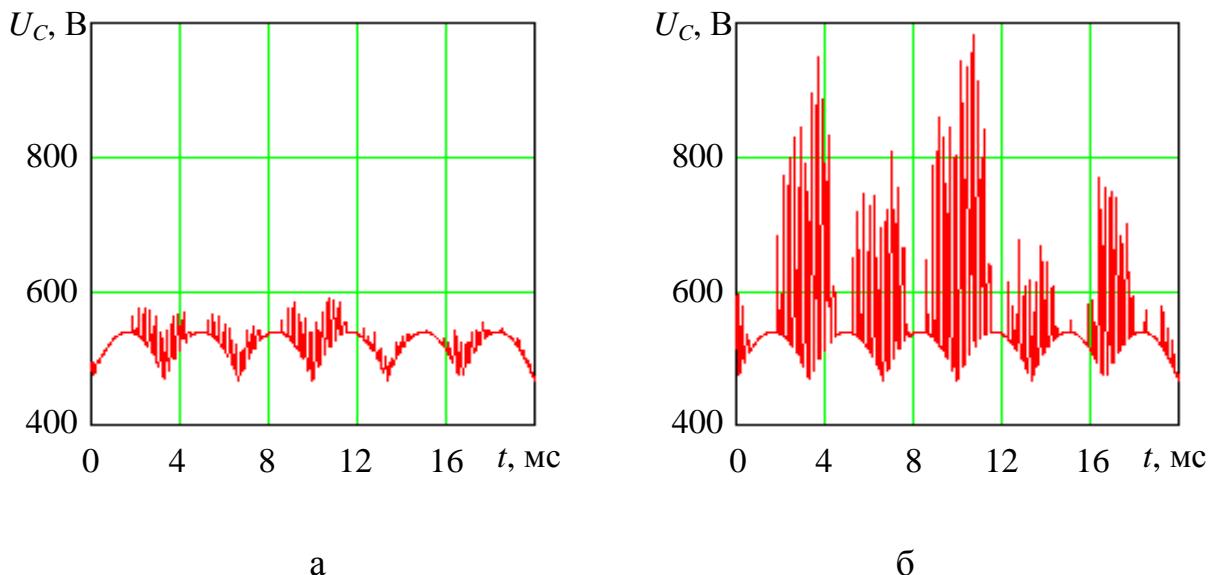


Рис. 6.15. Расчетные осцилограммы напряжения в ЗПТ при различных значениях емкости конденсатора

Примеры графиков с расчётными значениями токов в ЗПТ для двигателя той же номинальной мощности представлены на рис. 6.16.

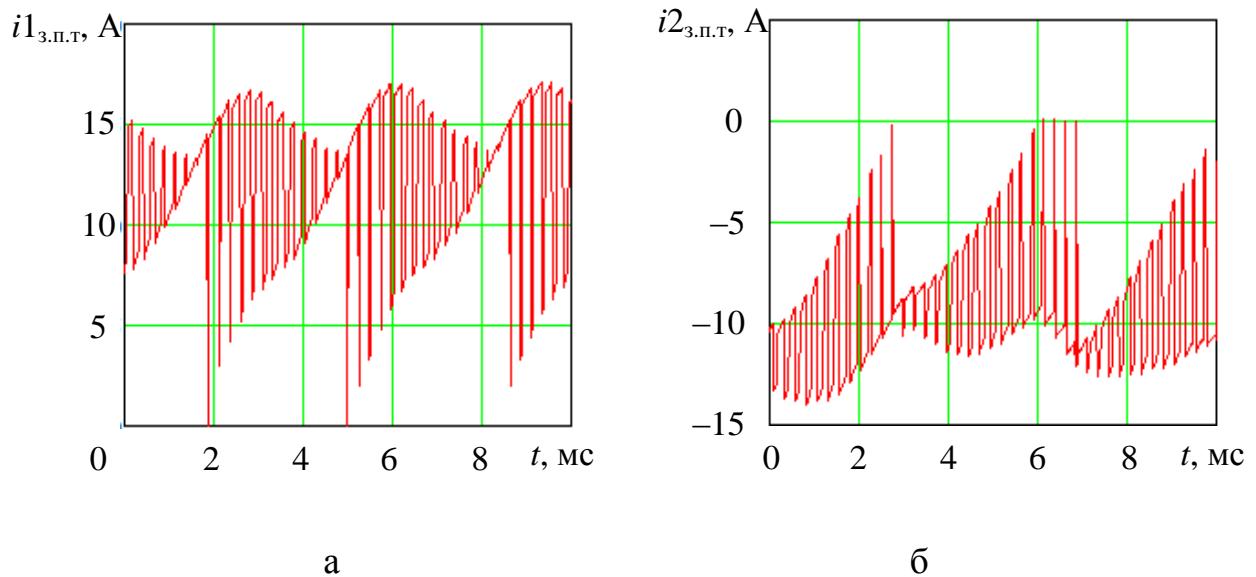


Рис. 6.16. Расчетные осциллограммы токов, поступающих от ЗПТ на вход управляемых инверторов

Анализ полученных результатов моделирования (см. рис. 6.15, 6.16) работы схемы взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя инверторами показывает, что напряжение и токи в ЗПТ имеют значительную переменную составляющую.

Расчет методической погрешности предложенных способов определения мощности выполнен в установившемся режиме работы по величинам мощности в ЗПТ, определяемой действующими значениями напряжения и тока, и средней мощности, определяемой по мгновенным значениям напряжения и тока.

Мощность на входе первого управляемого инвертора, определяемая измерительным прибором, специализированным для измерений в цепях с пульсирующими токами и напряжениями, вычисляется по выражению:

$$P1_{3.p.t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_{3.p.t_i} \cdot i1_{3.p.t_i})^2}{N}}, \quad (6.22)$$

где  $N$  – количество расчетных точек, полученных при моделировании установившегося режима работы испытуемых электрических машин.

Та же мощность, определяемая по произведению действующих значений напряжения и тока, может быть найдена следующим образом:

$$P1'_{3.p.t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_{3.p.t_i})^2}{N}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (i1_{3.p.t_i})^2}{N}}. \quad (6.23)$$

Относительная методическая погрешность измерения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗПТ:

$$\varepsilon = \frac{P1_{3.p.t} - P1'_{3.p.t}}{P1_{3.p.t}}. \quad (6.24)$$

Аналогичным образом можно вычислить мощности и погрешность по второму управляемому инвертору.

Для машин трех различных мощностей выполнен расчет относительной методической погрешности измерения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗПТ, результаты которого приведены на рис. 6.17. Анализ результатов расчета показывает, что при уменьшении емкости  $C$  вследствие усиления пульсаций напряжения и тока в ЗПТ возрастает величина относительной погрешности  $\varepsilon$ . С увеличением емкости  $C$  выше некоторых значений величина погрешности не превышает значений: 0,9 % при номинальной мощности асинхронных машин равной 0,37 кВт; 0,3 % – при мощности 5,5 кВт; 0,2 % – при мощности 250 кВт.

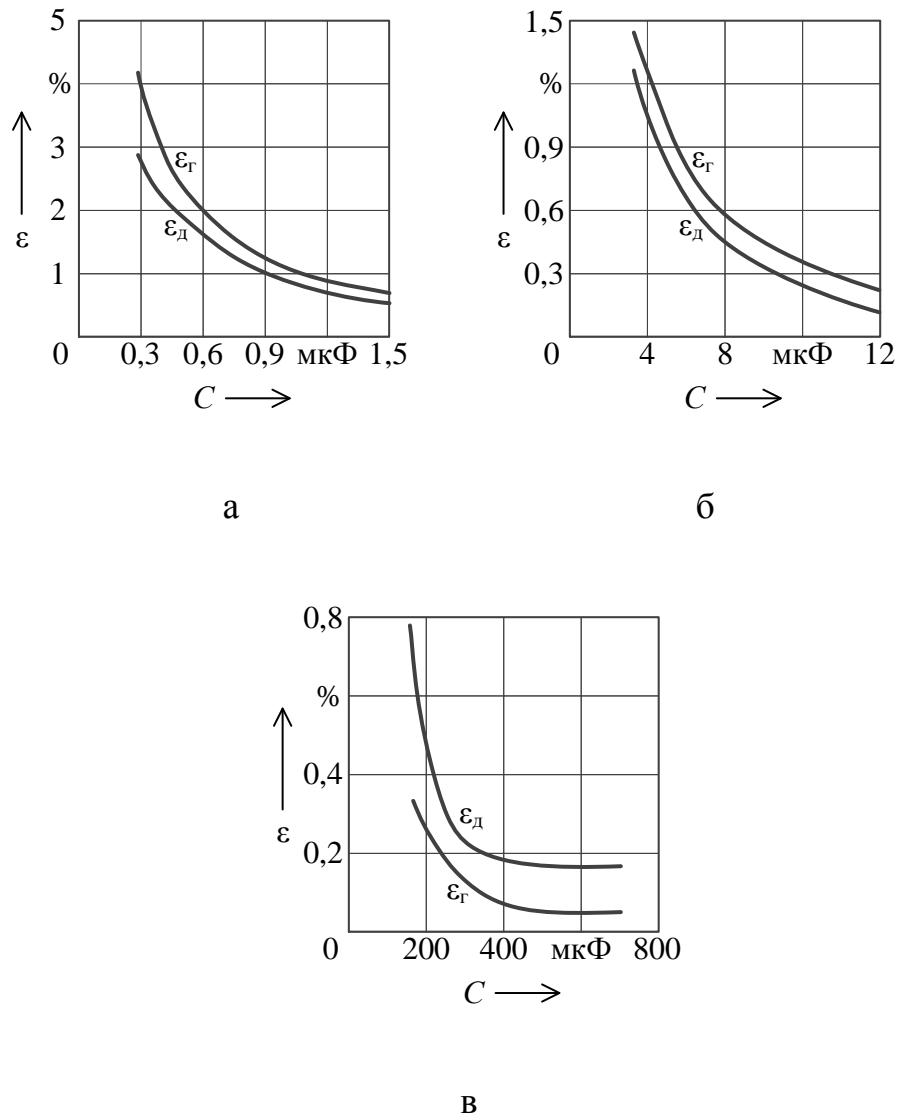


Рис. 6.17. Зависимости методической погрешности измерения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗПТ для испытуемых двигателей различной мощности:  
а – 0,37 кВт; б – 5,5 кВт; в – 250 кВт

Зависимости, приведенные на рис. 6.17 для асинхронных машин, работающих в двигательном ( $\epsilon_{\text{д}}$ ) и генераторном режимах ( $\epsilon_{\text{г}}$ ), не имеют точного совпадения, однако имеют схожую с гиперболической форму кривых, которые расположены относительно близко друг к другу.

Подбирая значения емкости  $C$  необходимые для ограничения максимальных значений пульсации напряжения в ЗПТ ( $U_{\text{п max}}$ ) до величин от 600 до 1000 В получены зависимости, приведенные на рис. 6.18.

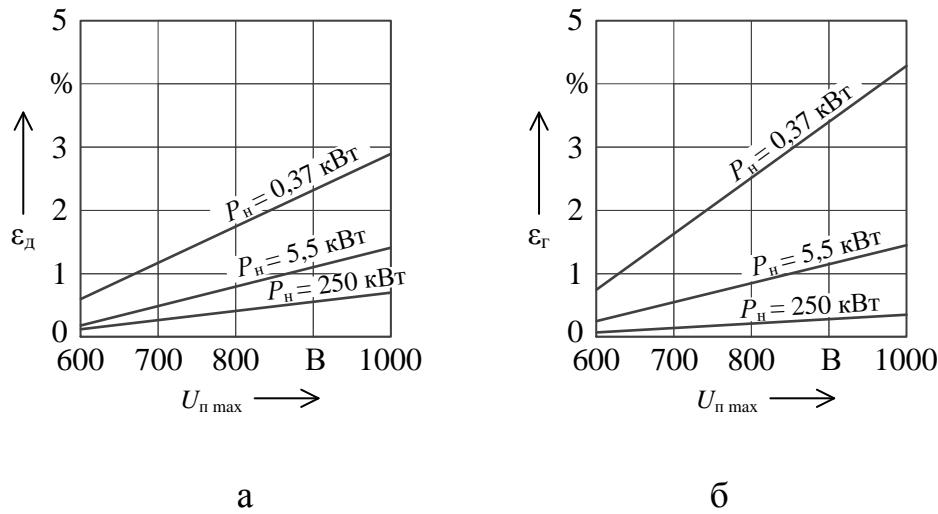


Рис. 6.18. Зависимости методической погрешности определения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗПТ от величины максимальных пульсаций напряжения в установившемся режиме

Анализ данных, приведенных на рис. 6.18 показывает, что если емкость  $C$  в ЗПТ подобрана таким образом, что величина пульсаций напряжения не превышает значения 600 В, то погрешность определения мощности по действующим значениям напряжения и тока в ЗПТ не превышает значений: 0,9 % при номинальной мощности испытуемых асинхронных машин 0,37 кВт; 0,3 % при мощности 5,5 кВт; 0,2 % при мощности 250 кВт.

Таким образом, величина максимальных пульсаций в ЗПТ ( $U_{n \max}$ ) может быть выбрана в качестве критерия, по которому можно относительно просто определить применимость рассмотренного метода определения мощности.

Выводы: в результате выполненного исследования показано, что в звене постоянного тока схем взаимной нагрузки асинхронных двигателей напряжение и ток имеют значительные пульсации. Данные пульсации приводят к наличию методической погрешности при определении мощности в ЗПТ по произведению действующих значений напряжения и тока. Анализ расчетных данных позволил оценить величину методической погрешности и ввести критерий применимости данного метода определения мощности. Резкое снижение данной погрешности наблюдается при пульсации напряжения в ЗПТ не превышающем 600 В для асинхронных двигателей в рассмотренном диапазоне номинальных мощностей от 0,37 кВт до 250 кВт.

### 6.1.3. Экспериментальное апробирование способа определения потерь мощности на участках схем испытательных комплексов электрических машин

Для проведения исследований с целью оценки характеристик элементов схемы взаимной нагрузки асинхронных машин собран стенд в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6.10 [162]. В состав данного стенда входят асинхронные двигатели АИС71В4 с номинальными КПД  $\eta_h = 65\%$ , мощностью  $P_h = 370$  Вт и коэффициентом мощности  $\cos\phi_h = 0,74$ , преобразователи частоты *Emerson Unidrive SP0401* и цифровые электроизмерительные приборы. Номинальные частоты вращения машин АМ1 и АМ2 равны 1370 об/мин и 1350 об/мин соответственно.

Потери в СУ ПЧ примем постоянными, тогда их можно определить при поданном от сети питании на ПЧ1 и ПЧ2 и отсутствии напряжения на обмотках статора асинхронных машин АМ1 и АМ2.

Измерения показали, что суммарные потери ( $\Delta P_{СУ1} + \Delta P_{СУ2}$ ) равны 32,5 Вт. Исходя из того, что ПЧ1 и ПЧ2 однотипные, потери в системе управления каждого из них приняты равными половине от суммарных потерь в обоих СУ:  $\Delta P_{СУ1} = \Delta P_{СУ2} = \Delta P_{СУ} = 16,25$  Вт.

Измерения для определения характеристик КПД и потерь в элементах испытательного комплекса выполнены при двух вариантах включения схемы: первый вариант – контактор 9 включен, контактор 10 выключен, второй вариант – контактор 9 выключен, контактор 10 включен. При различных вариантах включения схемы различаются только значения тока в ШПТ ( $I_{ш.п.т.}$ ). Результаты измерений приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

#### Результаты измерений

$f_2$ , Гц	$P_{AM1}$ , Вт	$P_{AM2}$ , Вт	$P_c$ , Вт	$U_{з.п.т.}$ , В	$I_{ш.п.т1}$ , А	$I_{ш.п.т2}$ , А
43,40	509,0	-172,0	390,5	500	0,300	1,080
44,83	410,0	-132,0	329,0	502	0,220	0,875
46,20	316,5	-84,5	280,0	504	0,125	0,680
47,50	228,5	-37,0	239,0	505	0,030	0,503
48,50	163,5	0,0	211,0	508	-0,045	0,370
50,00	65,5	76,5	189,5	508	-0,197	0,175

Для создания нагрузки машинам на обмотку статора АМ1 подавалось напряжение частотой равной 50 Гц, на обмотку статора АМ2 – с частотой  $f_2$ . При этом первая машина нагружалась в двигательном режиме, а вторая – в генераторном режиме.

При включенном контакторе 9 и выключенном контакторе 10 (см. рис. 6.10) можно определить потери во втором инверторе по выражению:

$$\Delta P_{\text{инв}2} = -P_{\text{AM2}} - P_{\text{ш.п.т1}} - \Delta P_{\text{СУ}}, \quad (6.25)$$

где  $P_{\text{ш.п.т1}}$  – мощность, передаваемая по ШПТ при данной схеме.

$$P_{\text{ш.п.т1}} = U_{\text{з.п.т}} I_{\text{ш.п.т1}}, \quad (6.26)$$

где  $U_{\text{з.п.т}}$  – напряжение в ЗПТ преобразователей частоты ,

$I_{\text{ш.п.т1}}$  – ток в ШПТ при данной схеме.

При включенном контакторе 10 и выключенном контакторе 9 (см. рис. 6.10) можно определить потери в первом инверторе по выражению:

$$\Delta P_{\text{инв1}} = P_{\text{ш.п.т2}} - P_{\text{AM1}} - \Delta P_{\text{СУ}}, \quad (6.27)$$

где  $P_{\text{ш.п.т2}}$  – мощность, передаваемая по ШПТ при данной схеме.

$$P_{\text{ш.п.т2}} = U_{\text{з.п.т}} I_{\text{ш.п.т2}}, \quad (6.28)$$

где  $I_{\text{ш.п.т2}}$  – ток в ШПТ при данной схеме.

По найденным потерям в инверторах, подключенных к машинам АМ1 и АМ2, получена характеристика, приведенная на рис. 6.19 (сплошная линия), на которой по горизонтальной оси отложена мощность на выходе соответствующего инвертора. Кривые  $\Delta P_{\text{инв1}} = f(P_{\text{AM1}})$  и  $\Delta P_{\text{инв2}} = f(P_{\text{AM2}})$  образуют одну непрерывную характеристику потерь инвертора  $\Delta P_{\text{инв}}$  от мощности  $P_{\text{AM}}$  на стороне подключения обмоток статора асинхронных машин.

На рис. 6.19 помимо характеристики  $\Delta P_{\text{инв}} = f(P_{\text{AM}})$  нанесены зависимости суммарного среднего тока в транзисторах трех фаз от мощности инвертора  $\Sigma I_{VTcp} = f(P_{\text{AM}})$  и суммарного среднего тока подключенных к ним обратных диодов от мощности инвертора  $\Sigma I_{VDcp} = f(P_{\text{AM}})$ . Данные токи получены путем математического моделирования работы электрических машин АМ1 и АМ2 по формулам, приведенным в разд. 3. Потери в инверторе складываются из электрических потерь в его транзисторах и обратных диодах. Анализ полученных кривых (см. рис. 6.19) показывает выраженную зависимость потерь в инверторе именно от тока транзисторов. Это можно объяснить тем, что частота переключений транзисто-

ров имеет порядок килогерц, в то время как частота срабатывания обратных диодов в данной схеме 50 Гц, т.е. на два порядка ниже.

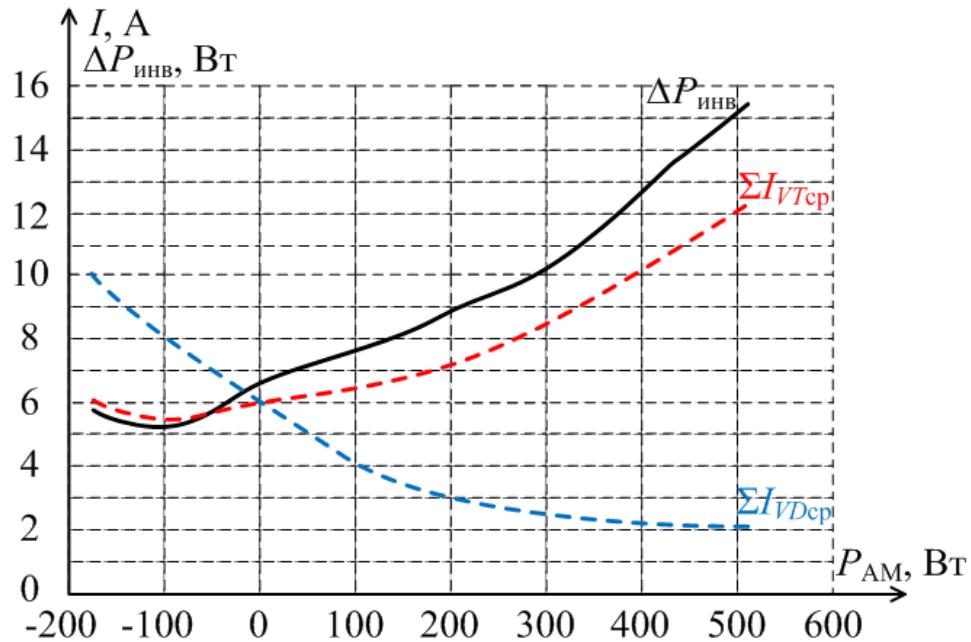


Рис. 6.19. Экспериментальные значения потерь в инверторах и расчетные значения средних суммарных токов транзисторов и диодов

По полученным потерям и мощностям в инверторах рассчитан КПД инверторов в составе стенда по выражению:

$$\eta_{\text{инв}} = \frac{|P_{\text{AM}}|}{|P_{\text{AM}}| + \Delta P_{\text{инв}}}, \quad (6.29)$$

где  $|P_{\text{AM}}|$  — абсолютное значение мощности потребляемой машиной АМ1 во всем диапазоне измерений и вырабатываемой машиной АМ2 в диапазоне от 0 до –172 Вт (см. табл. 6.1).

Расчеты по выражению (6.29) позволили получить зависимость КПД инверторов от мощности на стороне подключения к ним асинхронных машин. Полученная зависимость  $\eta_{\text{инв}} = f(P_{\text{AM}})$  приведена на рис. 6.20.

Суммарные потери в обеих машинах могут быть найдены как алгебраическая сумма мощностей измеренных в цепях обмоток статора:

$$\sum P_{\text{AM}} = \Delta P_{\text{AM}1} + \Delta P_{\text{AM}2} = P_{\text{AM}1} + P_{\text{AM}2}. \quad (6.30)$$

Суммарные потери в преобразователях частоты:

$$\sum P_{\text{ПЧ}} = \Delta P_{\text{ПЧ}1} + \Delta P_{\text{ПЧ}2} = P_{\text{c}} - \sum P_{\text{AM}}. \quad (6.31)$$

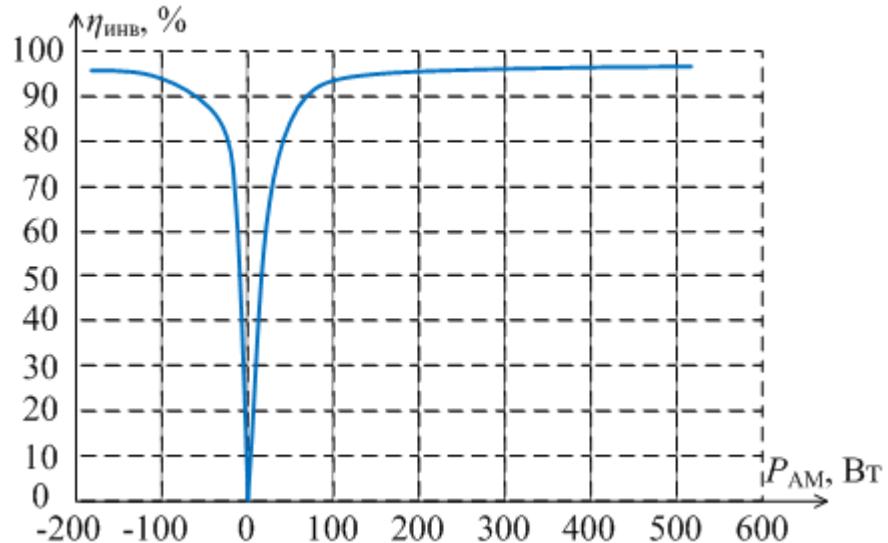


Рис. 6.20. Рабочая характеристика КПД инвертора

Зависимости  $P_c = f(P_{AM1})$ ,  $\sum P_{AM} = f(P_{AM1})$ ,  $\sum P_{ПЧ} = f(P_{ПЧ1})$  полученные по данным табл. 6.1 и выражениям (6.30) и (6.31) проиллюстрированы на рис. 6.21.

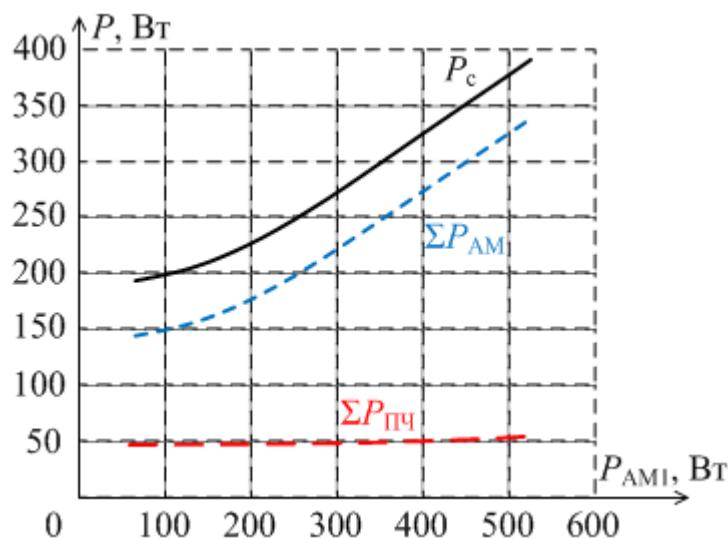


Рис. 6.21. Потребляемая мощность и потери в схеме

Мощность, потребляемая схемой взаимной нагрузки из сети, равна сумме всех потерь в схеме:

$$P_c = \sum P_{AM} + \sum P_{PЧ} + 2\Delta P_{вып} + 2\Delta P_{CY}, \quad (6.32)$$

где  $\Delta P_{вып}$  – потери в неуправляемом выпрямителе одного из ПЧ (приняты равными в обоих ПЧ).

Следовательно, относительные значения потерь в двигателях и преобразователях частоты могут быть найдены по следующим выражениям:

$$\sum P_{AM}^* = \frac{\sum P_{AM}}{P_c}, \quad (6.33)$$

$$\sum P_{PЧ}^* = \frac{\sum P_{PЧ}}{P_c}. \quad (6.34)$$

Зависимости  $\sum P_{AM}^* = f(P_{AM1})$  и  $\sum P_{PЧ}^* = f(P_{AM1})$ , рассчитанные по (6.33) и (6.34), приведены на рис. 6.22.

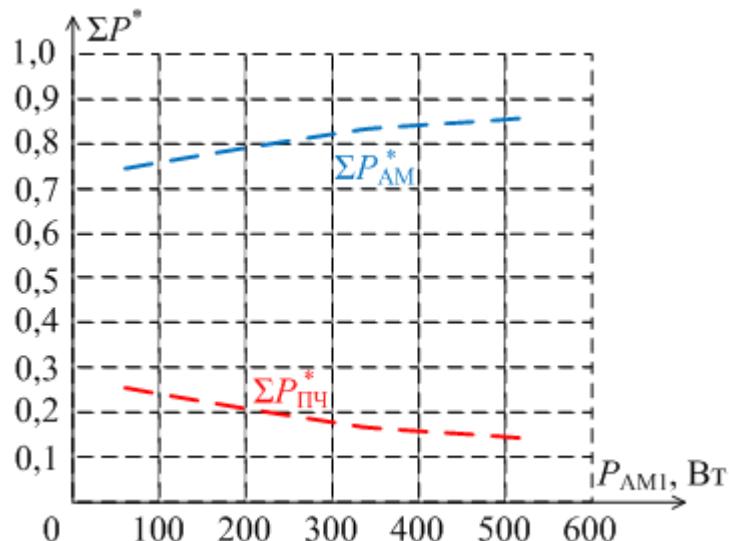


Рис. 6.22. Потребляемая мощность и потери в схеме

Анализ результатов расчета, приведенных на рис. 6.21 и 6.22, показывает, что потери в преобразователях частоты с увеличением нагрузки АМ1 до номинальной слабо возрастают в абсолютном выражении и при этом снижаются с 0,25 до 0,15 по отношению к полным потерям в схеме.

Если принять потери в АМ1, работающей в двигательном режиме с номинальной нагрузкой, равными номинальным потерям  $\Delta P_{AMn}$ , то потери в АМ2, работающей в это время в генераторном режиме, можно найти следующим образом:

$$\Delta P_{AM\text{ген}} = \sum P_{AM} - \Delta P_{AMn}. \quad (6.36)$$

Тогда при номинальном режиме работы машины АМ1 диаграмма распределения потерь в элементах схемы при введенных ранее допущениях принимает вид, представленный на рис. 6.23, а.

Наибольшие потери в схеме приходятся на машину, работающую в двигательном режиме, меньшие потери имеет машина, работающая в генераторном режиме, в преобразователях частоты малой мощности высоки потери на СУ ПЧ, а потери в инверторах значительно превосходят потери в неуправляемых выпрямителях. Величина потерь в выпрямителях на экспериментальной установке по расчетам составила менее 1 Вт, что соразмерно погрешности ее определения на данном стенде и примерно на один порядок ниже потерь в инверторах.

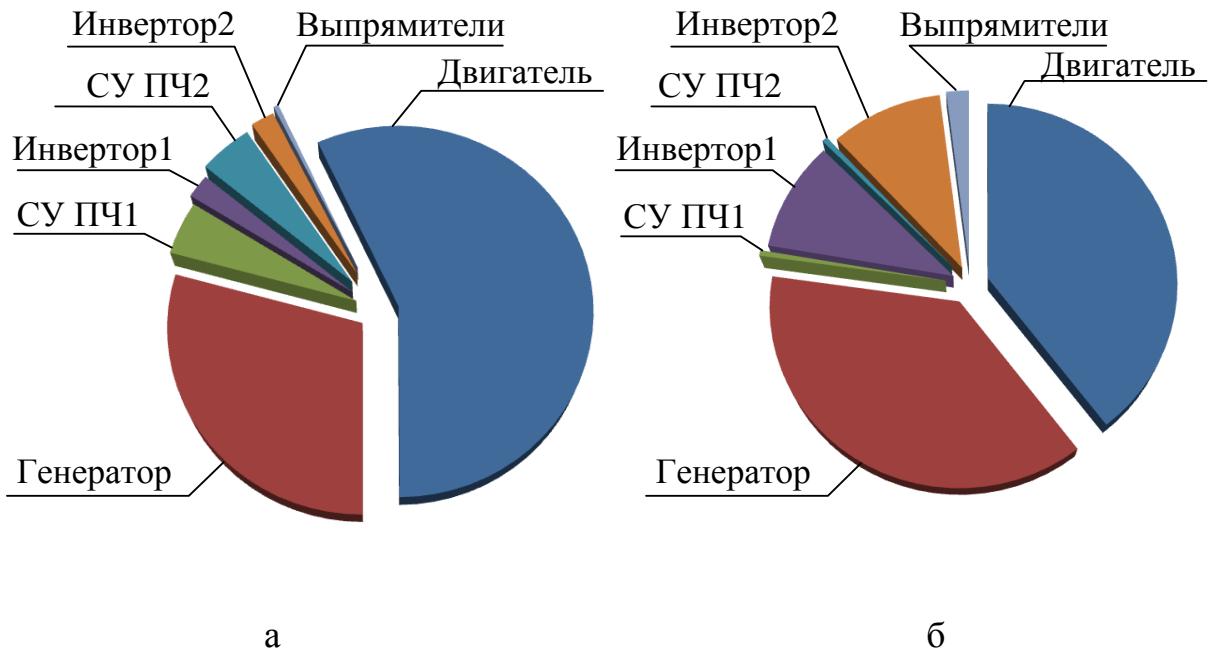


Рис. 6.23. Соотношение потерь мощности в элементах схемы в номинальном режиме работы испытуемого асинхронного двигателя:  
а – малой мощности, б – большой мощности

При больших номинальных мощностях асинхронных машин при номинальном режиме работы диаграмма, аналогичная приведенной на рис. 6.23, а, будет отличаться тем, что разность потерь в двигателе и генераторе будет меньше за-

счет их более высоких КПД, а доля потерь в СУ ПЧ будет ниже, т.к. с ростом номинальных мощностей оборудования потери в СУ растут в значительно меньшей степени. Например, тяговый двигатель тепловоза 2ТЭ25А имеет номинальный КПД 92 %, а его преобразователь частоты – 98 %, т.е. вчетверо меньшие потери, чем у двигателя. Исходя из приведенных номинальных данных, примерное соотношение потерь в схеме испытаний тяговых двигателей данного тепловоза по аналогичной схеме будет иметь вид, приведенный на рис. 6.23, б.

## **6.2. Разработка интегрированных схем испытаний электрических машин различного типа**

Внедрение новых производственных мощностей, предназначенных для проведения испытаний асинхронных двигателей на таких предприятиях, как, например, локомотивные ремонтные депо, требует достаточно крупных капиталовложений. Это является существенным препятствием к внедрению нового оборудования.

Значительно снизить капитальные затраты при решении данной задачи может подход, объединяющий оборудование испытательного комплекса, предназначенного для двигателей постоянного тока и комплекса для испытания асинхронных двигателей.

У испытательных комплексов двух обозначенных типов, использующих метод взаимной нагрузки, дублирование функций имеет место в системе управления. Так, у комплексов по испытанию двигателей постоянного тока (ДПТ) система управления необходима для двух управляемых выпрямителей, выполняющих функции линейного и вольтодобавочного преобразователя [5, 14, 53]. Комплексы по испытанию асинхронных двигателей (АД) имеют систему управления преобразователями частоты. Обе названные системы управления используются для регулировки нагрузки, задаваемой испытуемой машине.

Таким образом, на предприятиях, осуществляющих испытания МПТ и АД, возможно получение экономического эффекта за счет объединения двух испытательных комплексов в один с исключением некоторых составляющих элементов.

При этом следует отметить, что такой подход не позволяет проводить одновременное (параллельное) испытание двух типов электрических машин [61]. Следовательно, при выборе того или иного подхода к проектированию испытательного комплекса необходимо руководствоваться как текущей статистикой поступления машин на испытания, так и на перспективу.

Идея унификации стенда для испытания электрических машин постоянного тока и асинхронных реализована в виде следующего технического решения, приведенного на рис. 6.24. Данная схема защищена патентом на полезную модель (прил. А) [120].

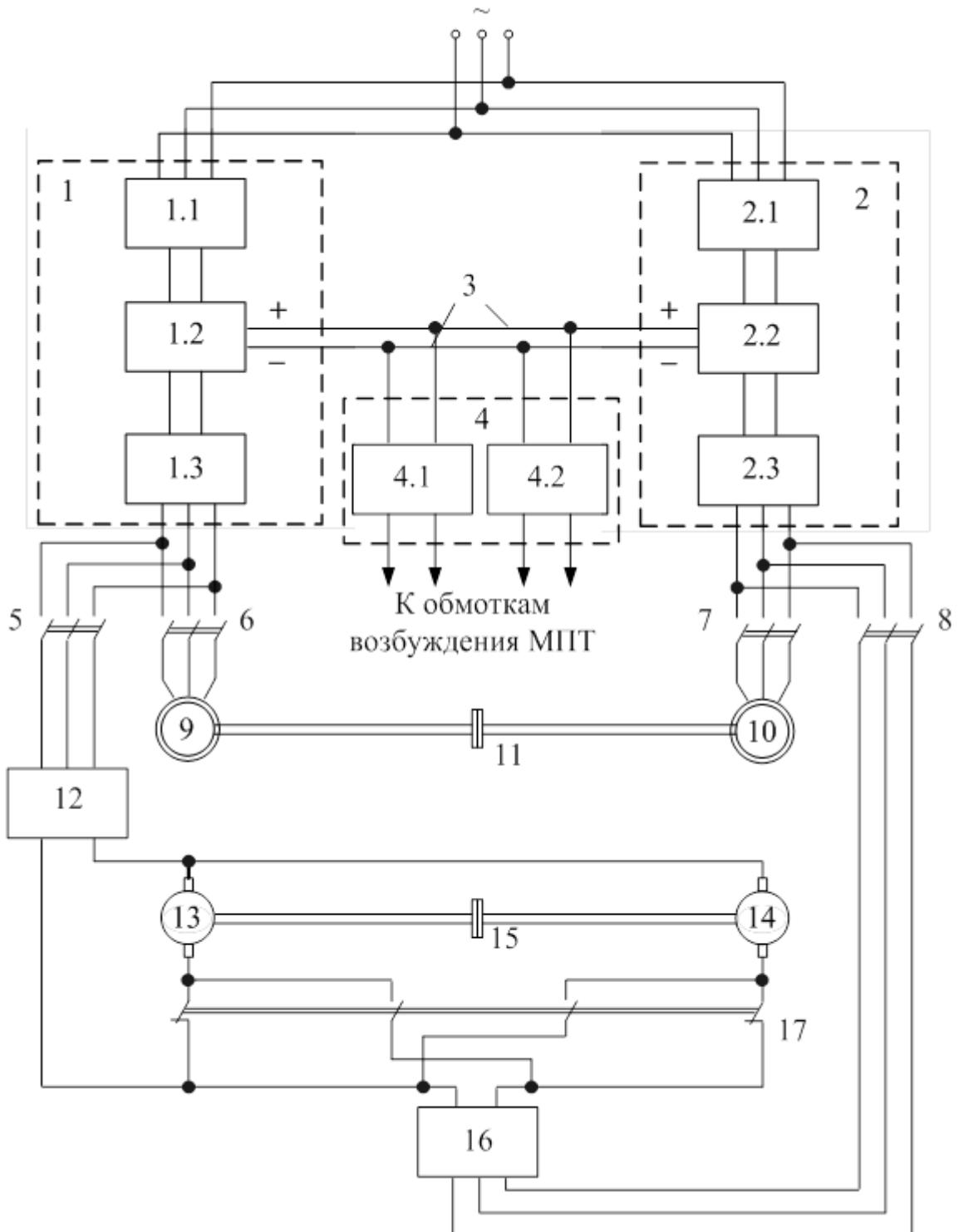


Рис. 6.24. Силовая часть интегрированной схемы электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин и МПТ с параллельным (независимым) возбуждением

Схема, приведенная на рис. 6.24, позволяет отказаться от тиристорных преобразователей, осуществляющих питание якорной цепи обеих МПТ и вольтодобавку в цепи нагрузочной машины, как это реализовано на существующих испытательных станциях [4]. На замену таким преобразователям использованы устройства, выполненные на базе неуправляемых выпрямителей [202].

В качестве устройства для регулирования параметров испытуемой и нагрузочной машин использованы преобразователи частоты. Стенд позволяет проводить испытания наиболее экономичным методом – методом взаимной нагрузки двигателей как постоянного, так и переменного тока.

Использование преобразователей частоты в составе стенда позволяет осуществить не только наиболее экономичный способ регулирования режимов работы асинхронных двигателей, но и приблизить условия питания асинхронных двигателей к условиям эксплуатации за счет питания от преобразователей частоты.

Стенд для испытания асинхронных машин и машин постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением (см. рис. 6.24) состоит из следующих элементов: 1 и 2 – ПЧ; 1.1, 2.1 – диодные выпрямители; 1.2, 2.2 – ЗПТ; 1.3, 2.3 – управляемые инверторы напряжения; 3 – ШПТ, соединяющая звенья постоянного тока двух ПЧ; 4 – блок питания обмоток возбуждения машин постоянного тока; 4.1, 4.2 – управляемые источники питания; 5, 6, 7, 8 – контакторы; 9, 10 – испытуемая и нагрузочная АМ; 13, 14 – испытуемая и нагрузочная МПТ; 11, 15 – соединительные муфты; 12, 16 – неуправляемые выпрямители; 17 – группа контакторов.

Следует отметить, что часть схемы, предназначенная для проведения испытаний асинхронных двигателей, состоит из следующих элементов: 1 – 3, 6, 7, 9 – 11. А часть схемы, предназначенная для проведения испытаний двигателей постоянного тока, включает в себя следующий набор элементов: 1 – 5, 8, 12 – 17.

Подведенное от сети напряжение подается на ПЧ 1 и 2, где оно выпрямляется посредством неуправляемых выпрямителей 1.1 и 2.1, передается в звенья постоянного тока 1.2 и 2.2 и далее преобразуется в переменное напряжение с помощью инверторов напряжения 1.3 и 2.3.

Полученное таким образом напряжение имеет требуемые действующее значение и частоту.

При испытаниях асинхронных двигателей 9 и 10 их обмотки статора подключаются к выходам управляемых инверторов 1.3 и 2.3 через контакторы 6 и 7. При этом контакторы 5 и 8 отключены.

Для осуществления взаимной нагрузки асинхронных машин требуется снизить частоту вращения магнитного потока одной из асинхронных машин (например, асинхронной машины 9) по отношению к частоте вращения ее вала. Для этого, необходимо осуществить пуск асинхронных машин 9 и 10 без нагрузки на валу до заданной частоты вращения, и далее уменьшить частоту выходного напряжения на ПЧ1. Электрическая машина 9, питающаяся от ПЧ с меньшей частотой выходного напряжения, перейдет в режим генератора. Вырабатываемая ей мощность поступит в ЗПТ 1.2 и далее через ШПТ 3 – в ЗПТ 2.2 второго преобразователя, питающего электрическую машину 10.

При испытаниях двигателей постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением неуправляемый выпрямитель 12 подключается через контактор 5 к частотному преобразователю 1, а вольтодобавочный преобразователь 16 подключается через контактор 8 к частотному преобразователю 2. При этом контакторы 6 и 7 отключены. Обмотки возбуждения обоих двигателей получают питание от блока преобразования постоянного напряжения 4. Постоянное напряжение, подаваемое в якорные цепи двигателей 13 и 14 с выхода неуправляемого выпрямителя 12, определяется параметрами переменного напряжения на его входе, которое, в свою очередь, регулируется с помощью частотного преобразователя 1.

Для осуществления взаимной нагрузки электрических машин необходимо увеличить напряжение в якорной цепи одного двигателя по сравнению с другим с помощью вольтодобавочного преобразователя 16. При этом двигатель, в якорной цепи которого напряжение оказалось выше, нагружается в двигательном режиме, а другой двигатель переходит в генераторный режим. Постоянное напряжение на выходе вольтодобавочного преобразователя 16 определяется параметрами переменного напряжения на его входе, которое, в свою очередь, регулируется с помощью частотного преобразователя 2.

Однако анализ особенностей конструкции разработанной схемы показывает наличие следующего недостатка: схема имеет избыточный состав оборудования. Управляемые источники постоянного тока 4.1, 4.2 обусловливают необоснованную сложность данной схемы.

С целью упрощения конструкции и повышения надежности представленной выше схемы (см. рис. 6.24) проведена ее модернизация. Новая схема изображена на рис. 6.25. Данная схема защищена патентом на полезную модель (прил. А) [121].

Данное устройство работает следующим образом [200]. Подведенное от сети трехфазное напряжение поступает к частотным преобразователям 1 и 2, где оно выпрямляется посредством неуправляемых выпрямителей 1.1 и 2.1, передается в звенья постоянного тока 1.2 и 2.2 и далее преобразуется в переменное напряжение с помощью инверторов напряжения 1.3 и 2.3.

Полученное таким образом напряжение имеет требуемые действующее значение и частоту.

При испытаниях асинхронных машин 8 и 9 их обмотки статора подключаются к выходам управляемых инверторов 1.3 и 2.3 через контакторы 5 и 6. При этом контакторы 4 и 7 отключены. Для осуществления взаимной нагрузки необходимо задать частоту вращения магнитного потока одной из асинхронных машин (например, на асинхронной машине 8) ниже частоты вращения ротора. Для этого, разогнав асинхронные машины 8 и 9 без нагрузки на валу до заданной частоты вращения, требуется уменьшить частоту выходного напряжения ПЧ 1. АМ 8, получающая питание от ПЧ с меньшей частотой, переходит в режим генератора, а мощность на ее выходе поступает в ЗПТ 1.2 и далее через электрическое соединение 3 поступает в ЗПТ 2.2 преобразователя частоты, питающего электрическую машину 9, работающую в двигательном режиме.

При испытаниях машин постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением управляемый выпрямитель 11 подключается через контактор 4 к частотному преобразователю 1, а управляемый выпрямитель 12 подключается через контактор 7 к частотному преобразователю 2. При этом контакторы 5 и 6 отключены. Обмотка возбуждения 13.2 МПТ 13 питается от диодного выпрямителя 11, а обмотка возбуждения 14.2 МПТ 14 – от выпрямителя 12. Постоянное напряжение, подаваемое в якорные цепи двигателей 13 и 14 с выхода управляемого выпрямителя 11, определяется параметрами переменного напряжения на его входе, которое, в свою очередь, регулируется с помощью частотного преобразователя 1.

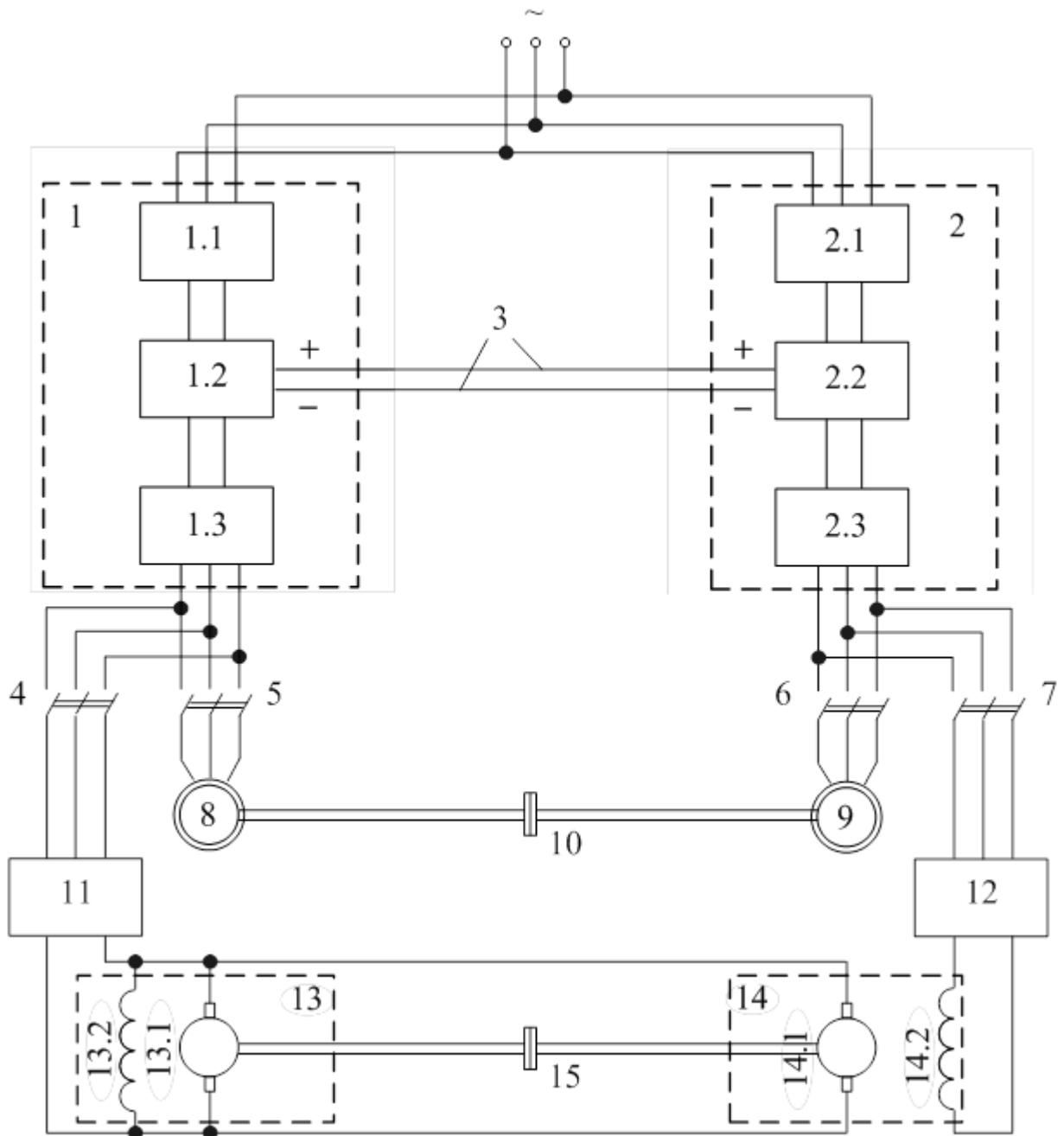


Рис. 6.25. Силовая часть интегрированной схемы модернизированного электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин и МПТ с параллельным (независимым) возбуждением

Для осуществления режима нагрузки необходимо сначала разогнать машины постоянного тока 13 и 14 на холостом ходу, плавно подняв напряжение на их обмотках до номинального значения с помощью частотных преобразователей 1 и 2.

Далее с помощью частотного преобразователя 2 необходимо уменьшить напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя 12 и тем самым ослабить

возбуждение машины постоянного тока 14. При ослаблении возбуждения уменьшится электродвижущая сила обмотки якоря 14.1 и машина постоянного тока 14 перейдет в режим двигателя, а машина постоянного тока 14 перейдет в режим генератора. Степень ослабления возбуждения машины постоянного тока 14 будет обуславливать величину ее нагрузки в двигательном режиме.

Аналог схемы, приведенной на рис. 6.25, может быть получен на основе испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с общим выпрямителем, работающим на два управляемых выпрямителя-инвертора (см. рис. 1.22). Данная схема приведена на рис. 6.26.

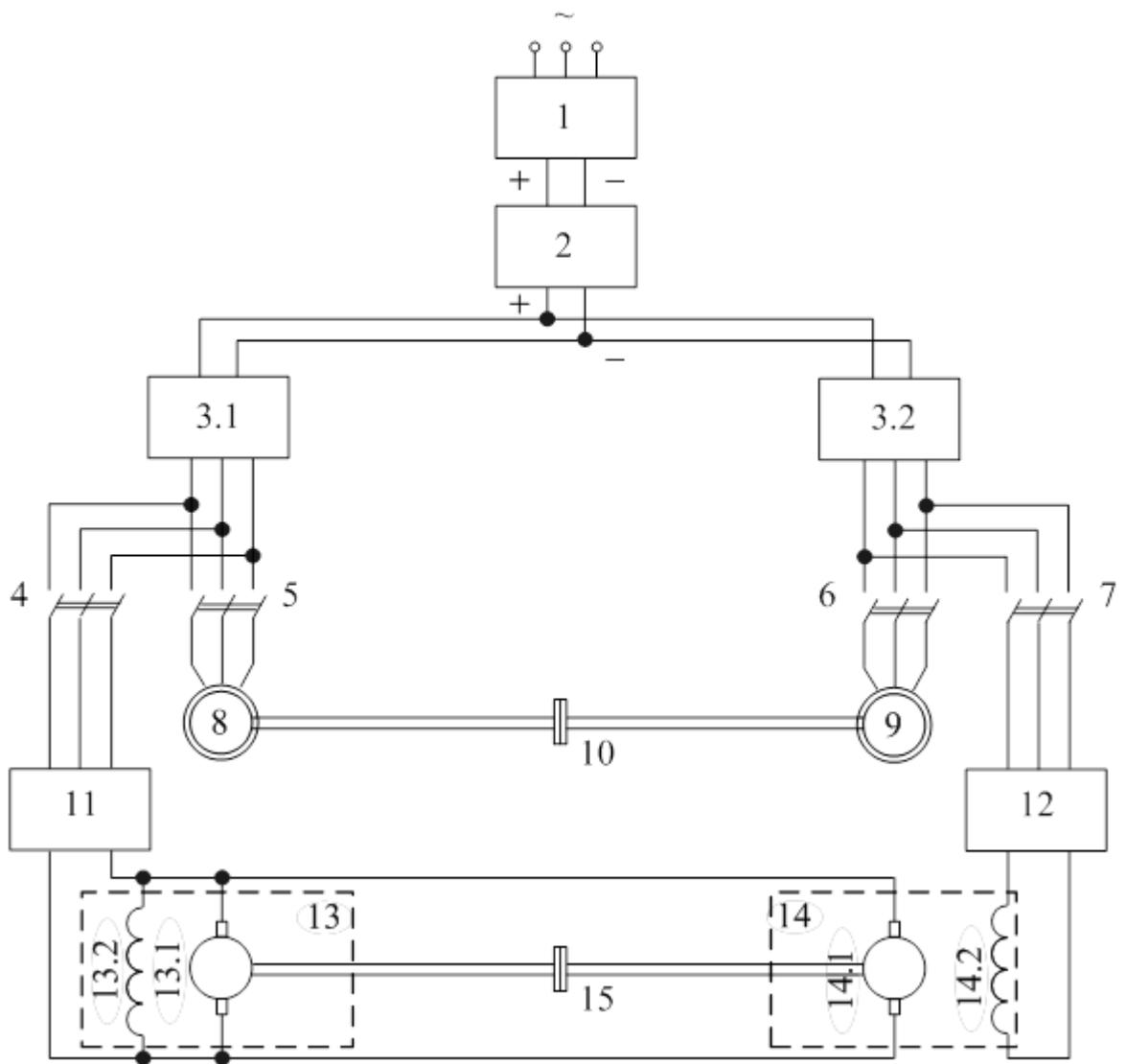


Рис. 6.26. Силовая часть интегрированной схемы электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин и МПТ с параллельным (независимым) возбуждением

Отличие схемы, приведенной на рис. 6.26, от схемы, приведенной на рис. 6.25, заключается в том, что вместо двух неуправляемых выпрямителей 1.1 и 1.2 и ЗПТ 2.1 и 2.2 (см. рис. 6.25) на схеме, представленной на рис. 6.26 имеются общий неуправляемый выпрямитель 1 и общее звено постоянного тока 2, выпрямители-инверторы обозначены 3.1 и 3.2, шина постоянного тока отсутствует.

В случае необходимости испытания на предприятии асинхронных машин и машин постоянного тока с последовательным возбуждением схема должна быть изменена и должна иметь вид, представленный на рис. 6.26. Данная схема защищена патентом на полезную модель (прил. А) [119].

Стенд для испытания асинхронных машин и машин постоянного тока с последовательным возбуждением (см. рис. 6.27) состоит из тех же элементов, что приведены на рис. 6.25, за исключением управляемых источников постоянного тока для питания обмоток возбуждения.

В схеме данного электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин обмотки возбуждения испытуемой МПТ включены последовательно с ее обмоткой якоря. В соответствии с этим нумерация элементов схемы несколько изменена по сравнению с предыдущей схемой (см. рис. 6.25).

Устройство работает следующим образом.

Переменное напряжение, подведенное от сети, подается на частотные преобразователи 1 и 2, где оно выпрямляется посредством диодных выпрямителей 1.1 и 2.1, передается в звенья постоянного тока 1.2 и 2.2 и далее преобразуется в переменное напряжение с помощью инверторов 1.3 и 2.3.

Полученное таким образом напряжение имеет требуемые действующее значение и частоту.

При испытаниях асинхронных двигателей 8 и 9 их обмотки статора подключаются к выходам управляемых инверторов 1.3 и 2.3 через контакторы 5 и 6. При этом контакторы 4 и 7 отключены.

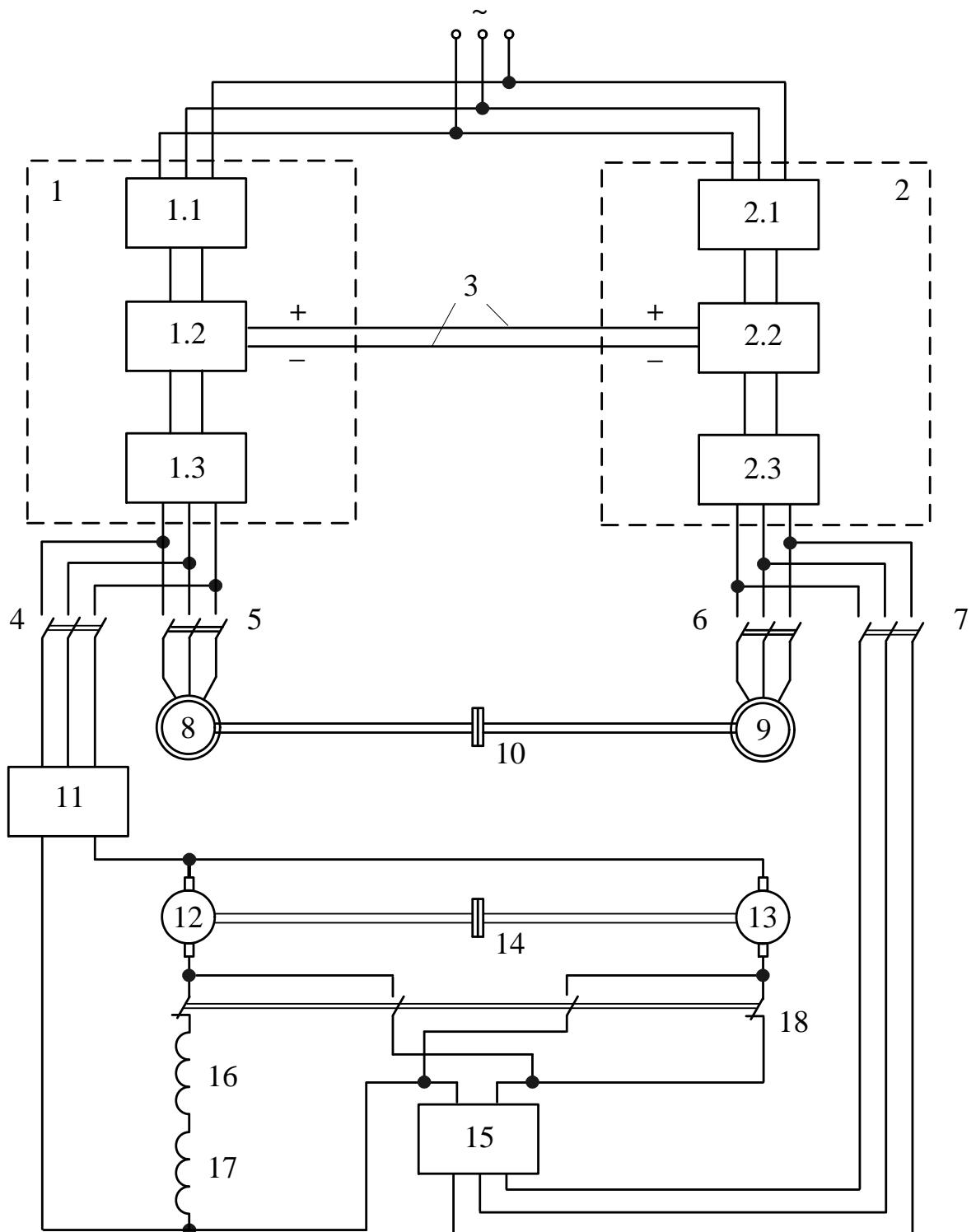


Рис. 6.27. Силовая часть интегрированной схемы электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин и МПТ с последовательным возбуждением

Для реализации режима взаимной нагрузки необходимо уменьшить частоту вращения магнитного поля на одном из асинхронных двигателей (например, на

асинхронном двигателе 9) по сравнению с частотой вращения вала. Для этого, разогнав асинхронные двигатели 8 и 9 на холостом ходу до определенной частоты вращения, необходимо снизить частоту вырабатываемого напряжения на одном из частотных преобразователей 1. Электродвигатель 8, получающий напряжение от преобразователя 1 с меньшей частотой, переходит в генераторный режим, а вырабатываемая им электрическая энергия поступает в звено постоянного тока 1.2 и далее через электрическое соединение 3 поступает в звено постоянного тока 2.2 преобразователя частоты 2, который осуществляет питание двигателя 9.

При испытаниях двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением неуправляемый выпрямитель 11 подключается через контактор 4 к частотному преобразователю 1, а вольтодобавочный преобразователь 15 подключается через контактор 7 к частотному преобразователю 2. При этом контакторы 5 и 6 отключены. Обмотки возбуждения обоих двигателей включены последовательно в якорную цепь двигателя 12. Постоянное напряжение, подаваемое в якорные цепи двигателей 12 и 13 с выхода неуправляемого выпрямителя 11, определяется параметрами переменного напряжения на его входе, которое, в свою очередь, регулируется с помощью частотного преобразователя 1.

Для осуществления взаимной нагрузки требуется увеличить напряжение в якорной цепи одного двигателя по сравнению с другим с помощью вольтодобавочного преобразователя 15. При этом двигатель, в якорной цепи которого напряжение оказалось выше, нагружается в двигательном режиме, а другой двигатель переходит в генераторный режим.

Постоянное напряжение на выходе вольтодобавочного преобразователя 15 определяется параметрами переменного напряжения на его входе, которое, в свою очередь, регулируется с помощью преобразователя частоты 2.

Аналог схемы, приведенной на рис. 6.27, может быть получен на основе испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с общим выпрямителем, работающим на два управляемых выпрямителя-инвертора, аналогично тому, как это сделано в схеме, приведенной на рис 6.26. Данный аналог приведен на рис. 6.28.

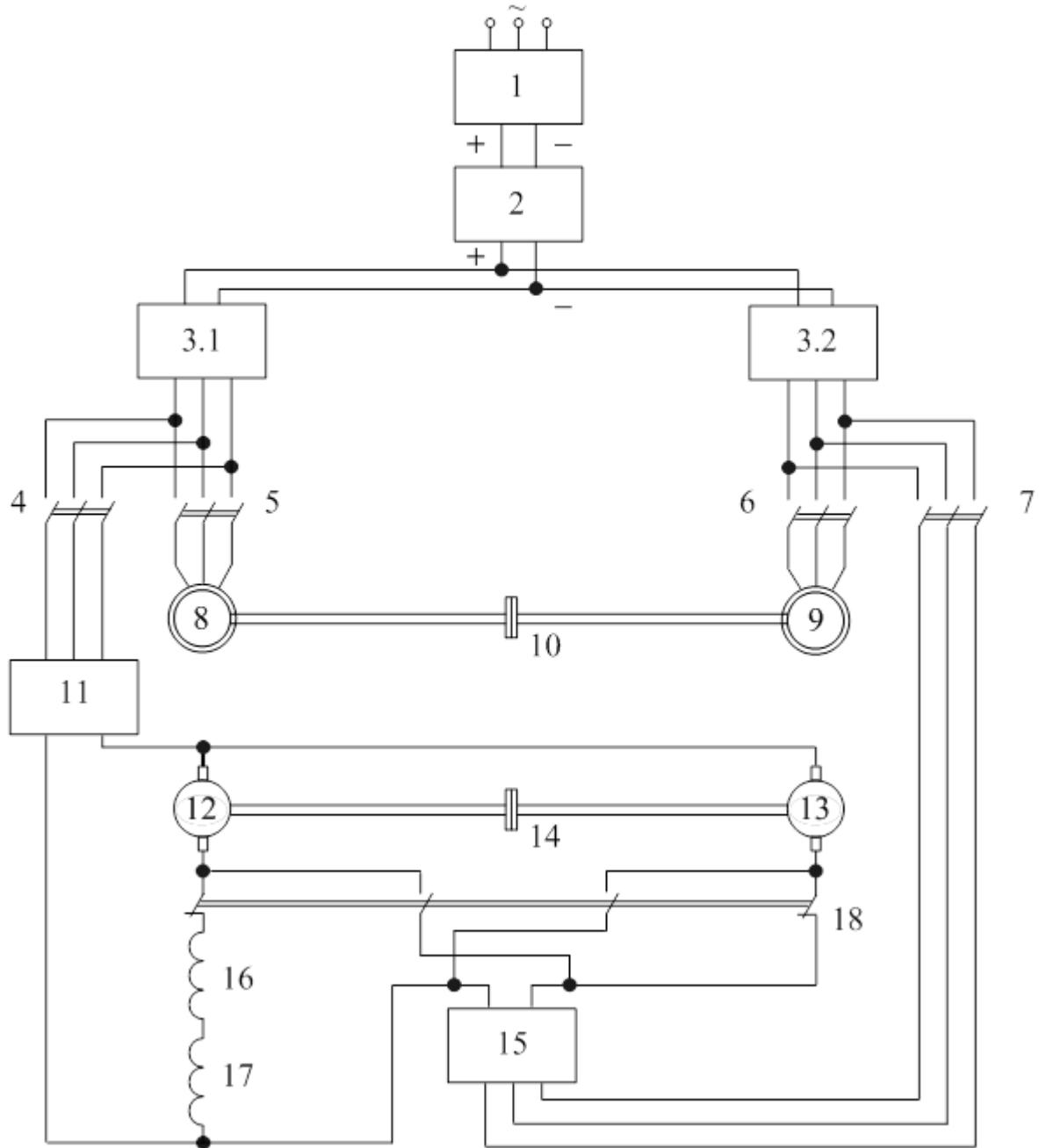


Рис. 6.28. Силовая часть интегрированной схемы электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин и машин постоянного тока с последовательным возбуждением

В случае необходимости испытания на предприятии асинхронных машин и машин постоянного тока с последовательным и параллельным (независимым) возбуждением схема должна быть изменена и должна иметь вид, представленный на рис. 6.29 [239]. Данная схема защищена патентом на полезную модель (прил. А) [124].

Стенд для испытания асинхронных машин и машин постоянного тока с последовательным и параллельным (независимым) возбуждением (см. рис. 6.29) состоит из тех же элементов, что приведены на рис. 6.25, за исключением того, что в схему добавлен коммутатор (или группа контакторов) 13, а машины постоянного тока обозначены номерами 14 и 15.

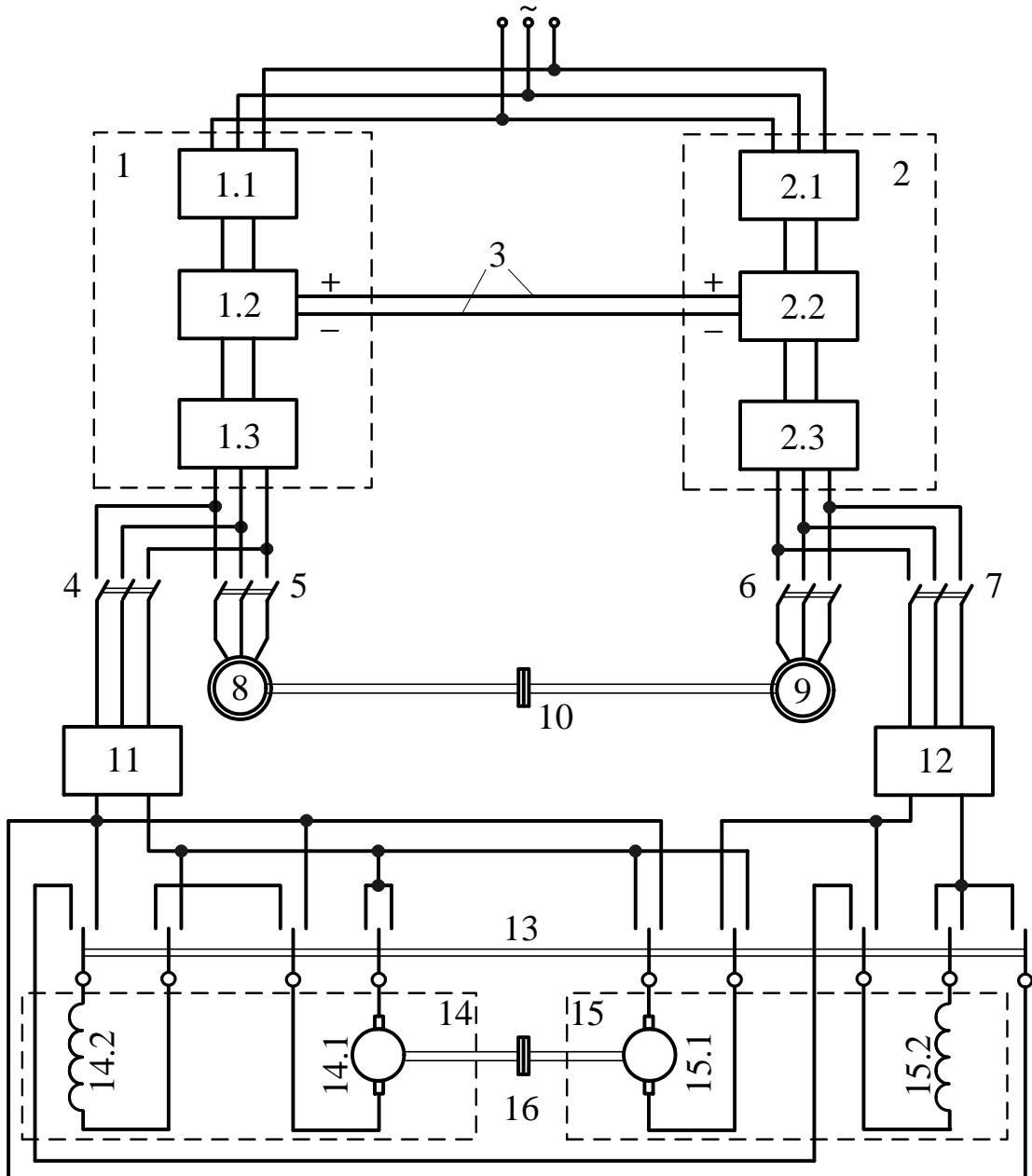


Рис. 6.29. Силовая часть интегрированной схемы электротехнического комплекса для испытаний асинхронных машин и МПТ с последовательным и параллельным (независимым) возбуждением

Особенность работы стенда состоит в том, что коммутатор 13 имеет «правое» и «левое» рабочие положения. В первом случае данная схема (см. рис. 6.29)

оказывается тождественна схеме, приведенной на рис. 6.25, во втором – тождественна схеме, приведенной на рис. 6.27.

Таким образом, предложенная схема (см. рис. 6.29) представляет собой интеграцию идей, примененных в схемах, приведенных на рис. 6.25, 6.27, предназначенных для совместных испытаний асинхронных машин и машин постоянного тока с различными типами возбуждения.

Аналог схемы, приведенной на рис. 6.29, может быть получен на основе испытательного комплекса с системой «асинхронный двигатель – асинхронный генератор» с общим выпрямителем, работающим на два управляемых выпрямителя-инвертора, аналогично тому, как это сделано в схеме, приведенной на рис. 6.26 и 6.28. Данный аналог приведен на рис. 6.30.

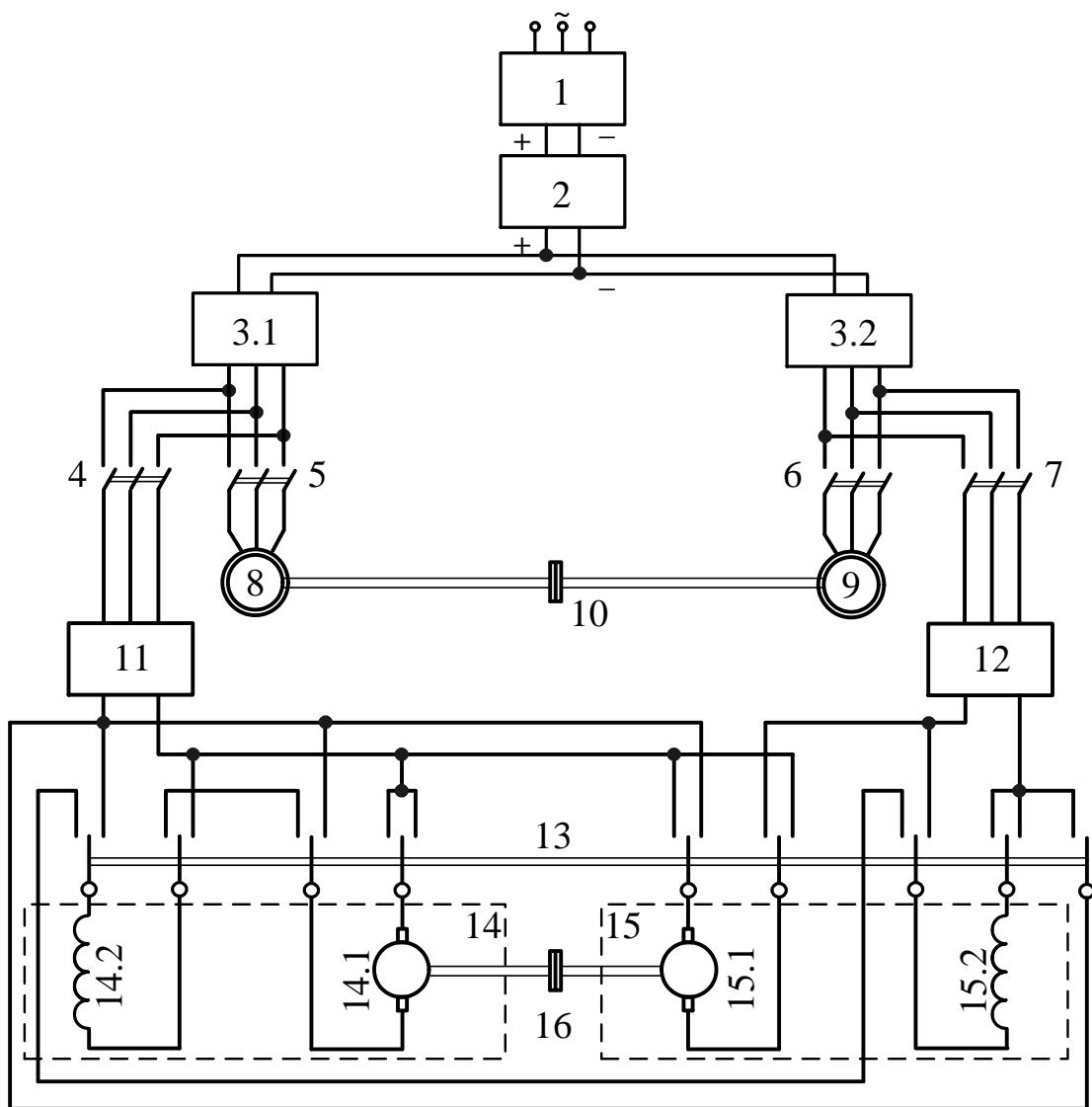


Рис. 6.30. Стенд для нагрузочных испытаний асинхронных машин и МПТ с последовательным и параллельным (независимым) возбуждением

Данная схема (см. рис. 6.30) предпочтительна для применения при разработке испытательного комплекса в том случае, если нет необходимости применения в его составе двух отдельных преобразователей частоты.

Воспользуемся разработанным подходом к математическому моделированию электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки, при составлении математической модели испытательного комплекса с системой «двигатель постоянного тока – генератор постоянного тока». В рассмотренных в данном разделе схемах необходимо учесть то, что питание обмоток испытуемой и нагрузочной машин осуществляется от выпрямителя, на вход которого подается напряжение от преобразователя частоты.

Математическая модель напряжения, моделируемого инвертором преобразователя частоты, состоит из уравнений (2.2), (2.4) – (2.10). При этом задающие сигналы, формируемые в соответствии с выражениями (2.5) – (2.7), позволяют регулировать частоту и амплитуду первой гармоники напряжений, формируемых на выходе преобразователей частоты (ПЧ), которые подаются на вход трехфазных выпрямителей 12 и 16 (см. рис. 6.24), 11 и 12 (см. рис. 6.25, 6.27), 11 и 15 (см. рис. 6.26).

Как известно, при соединении диодов по схеме Ларионова из диодов катодной группы в любой момент времени будет открыт тот, на аноде которого оказался наиболее высокий положительный потенциал. Из диодов анодной группы в любой момент времени будет открыт тот, на катоде которого оказался наибольший по модулю отрицательный потенциал.

Исходя из сказанного для выпрямителей, подключенных к силовым цепям МПТ, можно записать следующие выражения для определения их выходных напряжений:

$$\begin{cases} u1_{\text{в}}(t) = \max(u1_{1a}(t), u1_{1b}(t), u1_{1c}(t)) - \min(u1_{1a}(t), u1_{1b}(t), u1_{1c}(t)); \\ u2_{\text{в}}(t) = \max(u2_{1a}(t), u2_{1b}(t), u2_{1c}(t)) - \min(u2_{1a}(t), u2_{1b}(t), u2_{1c}(t)). \end{cases} \quad (6.37)$$

Пример расчета напряжений на выходе выпрямителей, питающих МПТ при  $U_{3 \text{ max}} = 0,9U_{\text{п max}}$  приведен на рис. 6.31, а, расчет при  $U_{3 \text{ max}} = 0,5U_{\text{п max}}$  – на рис. 6.31, б.

Анализ полученных напряжений показывает, что частота импульсов напряжения на выходе выпрямителя приближенно соответствует удвоенной частоте пилообразного напряжения в системе управления ПЧ (см. п.п. 2.1.1), а среднее значение выпрямленного напряжения является функцией отношения  $U_{3 \text{ max}} / U_{\text{п max}}$ .

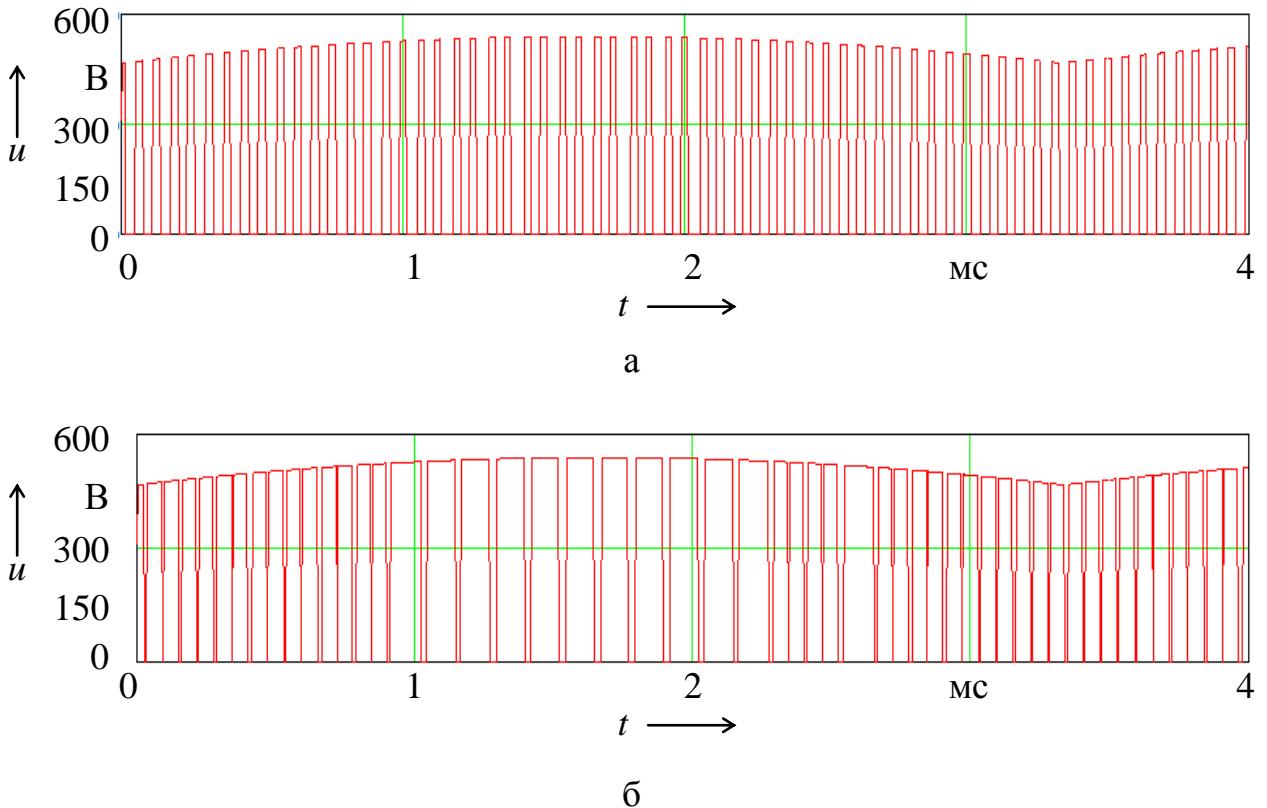


Рис. 6.31. Напряжения на выходе выпрямителей, питающих МПТ

При испытании МПТ при независимом возбуждении электрические цепи обмоток испытуемой и нагрузочной машин имеют схему, представленную на рис. 6.32.

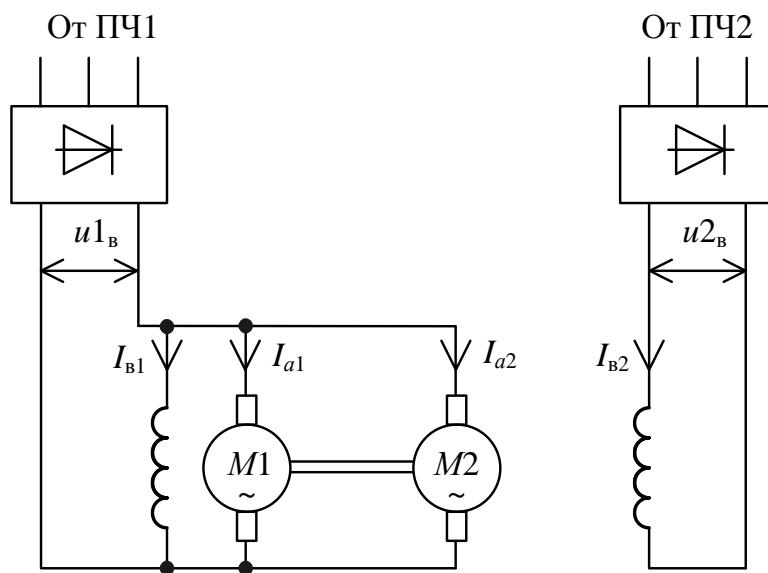


Рис. 6.32. Фрагмент схемы испытательного комплекса при независимом возбуждении МПТ

Для данной схемы можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dI_{a1}}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_{a1}} \left( -uI_B + I_{a1}\Sigma R_{a1} + \omega\Phi_1^* \frac{U_{h1}}{\omega_{h\text{мп1}}} \right); \\ \Phi_1^* = f(I_{B1}^*); \\ I_{B1}^* = \frac{uI_B}{R_{B1}I_{Bh1}}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{(J_1 + J_2)} \left( \frac{I_{a1}\Phi_1^* M_{h1}}{I_{ah1}} - \frac{I_{a2}\Phi_2^* M_{h2}}{I_{ah2}} - M_{\text{нот}} \text{sign}(\omega) \right); \\ \frac{dI_{a2}}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_{a2}} \left( -uI_B - I_{a2}\Sigma R_{a2} + \omega\Phi_2^* \frac{U_{h2}}{\omega_{h\text{мп2}}} \right); \\ \Phi_2^* = f(I_{B2}^*); \\ I_{B2}^* = \frac{uI_B}{R_{B2}I_{Bh2}}, \end{cases} \quad (6.38)$$

где  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ ,  $I_{B1}^*$ ,  $I_{B2}^*$  – токи якоря и относительные токи возбуждения испытуемой и нагруженной машин;

$M_{h1}$ ,  $M_{h2}$  – номинальные моменты испытуемой и нагруженной машин;

$U_{h1}$ ,  $U_{h2}$  – номинальные напряжения испытуемой и нагруженной машин;

$I_{ah1}$ ,  $I_{ah2}$  – номинальные токи якоря испытуемой и нагруженной машин;

$I_{Bh1}$ ,  $I_{Bh2}$  – номинальные токи возбуждения испытуемой и нагруженной машин;

$\Sigma L_{a1}$ ,  $\Sigma L_{a2}$  – суммарные индуктивности цепей якоря;

$\Sigma R_{a1}$ ,  $\Sigma R_{a2}$ ,  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  – суммарные сопротивления цепей якоря и возбуждения;

$J_1$ ,  $J_2$  – моменты инерции испытуемой и нагруженной машин;

$\omega_{h\text{мп1}}$ ,  $\omega_{h\text{мп2}}$  – номинальная угловая частота вращения испытуемой и нагруженной машин;

$\Phi_1^* = f(I_{B1}^*)$ ,  $\Phi_2^* = f(I_{B2}^*)$  – аппроксимации кривых намагничивания испытуемой и нагруженной машин.

Полученная математическая модель, состоящая из систем уравнений (6.37), (6.38), с учетом выражений (2.2), (2.4) – (2.10), описывающих напряжения,

сформированные преобразователем частоты, позволяет изучать физические процессы в испытательном комплексе при независимом возбуждении испытуемой и нагрузочной МПТ.

При испытании ДПТ при последовательном возбуждении электрические цепи обмоток испытуемой и нагрузочной машин выполнены по схеме, представленной на рис. 6.33.

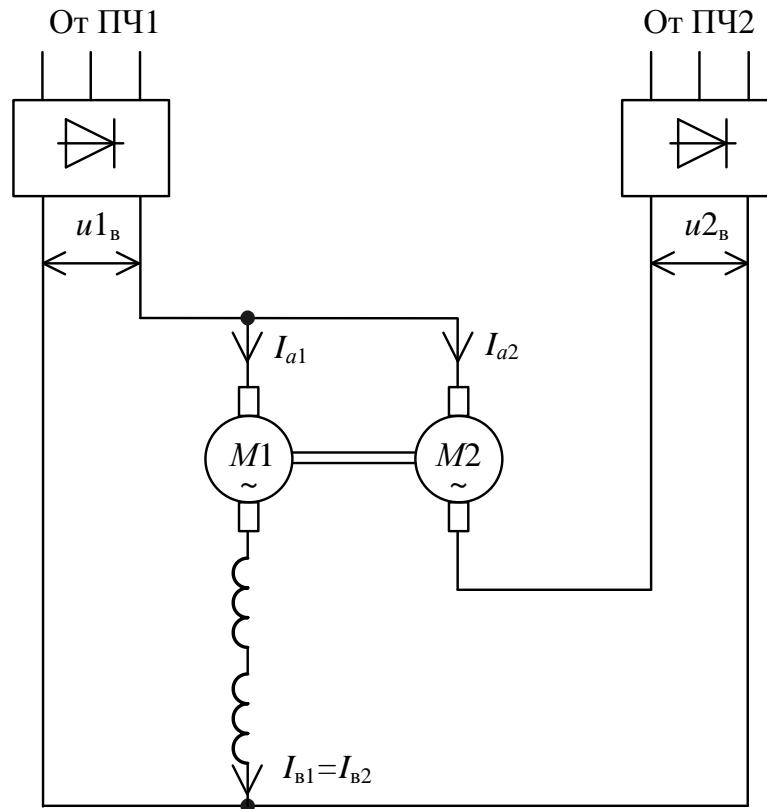


Рис. 6.33. Фрагмент схемы испытательного комплекса при последовательном возбуждении МПТ

Система уравнений, описывающая работу данной схемы, по сравнению с системой (6.38) будет изменена в части определения тока возбуждения обеих машин и примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dI_{a1}}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_{a1}} \left( -u I_B + I_{a1} \Sigma R_{a1} + \omega \Phi_1^* \frac{U_{h1}}{\omega_{h \text{ МПТ1}}} \right); \\ \Phi_1^* = f \left( \frac{I_{a1}}{I_{Bh1}} \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{(J_1 + J_2)} \left( \frac{I_{a1} \Phi_1^* M_{h1}}{I_{ah1}} - \frac{I_{a2} \Phi_2^* M_{h2}}{I_{ah2}} - M_{\text{нот}} \text{sign}(\omega) \right); \\ \frac{dI_{a2}}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_{a2}} \left( -u I_B - I_{a2} \Sigma R_{a2} + \omega \Phi_2^* \frac{U_{h2}}{\omega_{h \text{ МПТ2}}} \right); \\ \Phi_2^* = f \left( \frac{I_{a2}}{I_{Bh2}} \right). \end{cases} \quad (6.39)$$

Полученная математическая модель, состоящая из уравнений (6.37), (6.39), с учетом выражений (2.2), (2.4) – (2.10), описывающих напряжения, сформированные преобразователем частоты, позволяет изучать физические процессы в испытательном комплексе при последовательном возбуждении испытуемой и нагружочной МПТ.

### 6.3. Выводы по шестому разделу

1. Разработаны новые технические решения (принципиальные схемы) для косвенного определения мощности, потребляемой испытуемым двигателем и вырабатываемой нагружочной машиной. Новые схемы позволяют упростить и сократить состав измерительного оборудования и тем самым повысить технологичность и экономическую эффективность внедрения электротехнических комплексов для испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки.

2. Определена зависимость методической погрешности косвенных способов определения мощностей, потребляемых и вырабатываемых асинхронными машинами в схемах испытания методом взаимной нагрузки, от емкости конденсатора и пульсаций напряжения в звене постоянного тока для машин различной мощности. Полученные зависимости позволили дать обоснование возможности применения разработанных технических решений для определения мощности и выявить необходимые для этого параметры электротехнических комплексов для испытания электрических машин.

3. Выполнено экспериментальное апробирование методики определения потерь мощности на участках схем испытательных комплексов электрических машин, которое позволило выявить соотношение потерь мощности в элементах схем в номинальном режиме работы испытуемых асинхронных двигателей малой (0,37 кВт) и большой (250 кВт) мощности.

4. Разработаны интегрированные схемы испытаний методом взаимной нагрузки асинхронных двигателей и машин постоянного тока с различными типами возбуждения в рамках одного испытательного комплекса. В предложенных схемах исключено дублирование оборудования, выполняющего одинаковые функции, осуществляемые при испытаниях машин различного типа. Применение данных схем при разработке новых испытательных комплексов позволяет снизить материальные затраты на их внедрение.

5. На основании общих принципов к формированию математических моделей электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки, определены совокупности математических выражений, формирующих математические модели, учитывающие работу машин постоянного тока в предложенных интегрированных схемах испытаний.

## 7. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Одним из способов повышения эффективности эксплуатации электротехнических комплексов, предназначенных для испытания электрических машин, является не только применение в них наиболее энергоэффективных силовых схем, но и включение в их состав наиболее современных технических решений, основанных на идеях, позволяющих на высоком техническом уровне выполнять отдельные технические операции.

Ниже представлены разработки, направленные на совершенствование структурных компонентов комплексов испытаний электрических машин различного типа.

### **7.1. Разработка новых технических решений, направленных на совершенствование подсистемы измерений механических параметров на валу электрических машин**

Для обеспечения процесса испытаний электрических машин требуются приборы, позволяющие измерять скорость вращения ротора и вращающий момент на валу испытуемой машины. Ниже приведены разработки, позволяющие осуществить данные измерения с учетом особенностей существующих систем испытания электрических машин.

#### *7.1.1. Разработка устройства для измерения вращающего момента на валу*

Известно множество различных типов устройств, предназначенных для измерения частоты вращения вала электрических машин. Одним из наиболее широко распространенных принципов, реализуемых в приборах измерения частоты вращения вала, является метод измерения, предусматривающий преобразование датчиком измеряемой частоты вращения в частоту электрических импульсов, измеряемых частотомером (рис. 7.1).

Данное устройство работает следующим образом. Двигатель 1 вращает вал, а нагрузочное устройство 2 (например, нагрузочный генератор) создает момент сопротивления вращению вала. На валу расположены два идентичных друг другу диска 5 с единообразными сквозными отверстиями, находящимися на одинаковом расстоянии от оси вращения. Данные диски находятся между источником излучения и фотоприемным устройством так, что их сквозные отверстия в процессе вращения вала периодически оказываются на одной оси с фотоприемным устройством 4 и источником излучения 3. Это позволяет излучению проходить через данные отверстия от фотоприемного устройства 4 к источнику излучения 3. Фотоприемное устройство 4 и источник излучения 3 являются составными частями оптико-электронного преобразователя, который формирует развернутую во времени последовательность электрических импульсов. Период следования данных импульсов используют для вычисления частоты вращения ротора двигателя.

Известен метод измерения момента на валу электрической машины основанный на измерении угла скручивания концов упругого вала, на котором закреплены оптические отражатели.

Такое устройство, в состав которого входят фотоприемные устройства и источники излучения, формирует электрических импульсы. Данные импульсы имеют с некоторым интервалом по времени, который несет в себе информацию о моменте на валу [72].

Существуют и другие способы измерения частоты вращения и момента на валу, однако все они требуют наличия целого набора дополнительных приспособлений и устройств.

Достаточно перспективной представляется идея объединения средств измерения частоты вращения и момента в одном устройстве, использующем широко

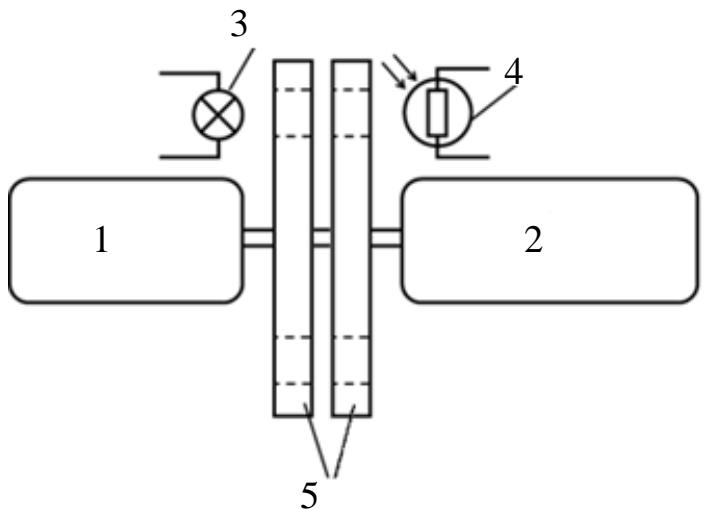


Рис. 7.1. Широко распространенный тип устройств для измерения частоты вращения вала

применяемые конструктивные элементы и требующем минимального набора специфических устройств.

Исходя из сказанного разработана конструкция такого устройства, приведенная на рис. 7.2 [131].

Предлагаемый способ измерения момента на валу двигателя и частоты вращения его ротора реализуется устройством следующим образом.

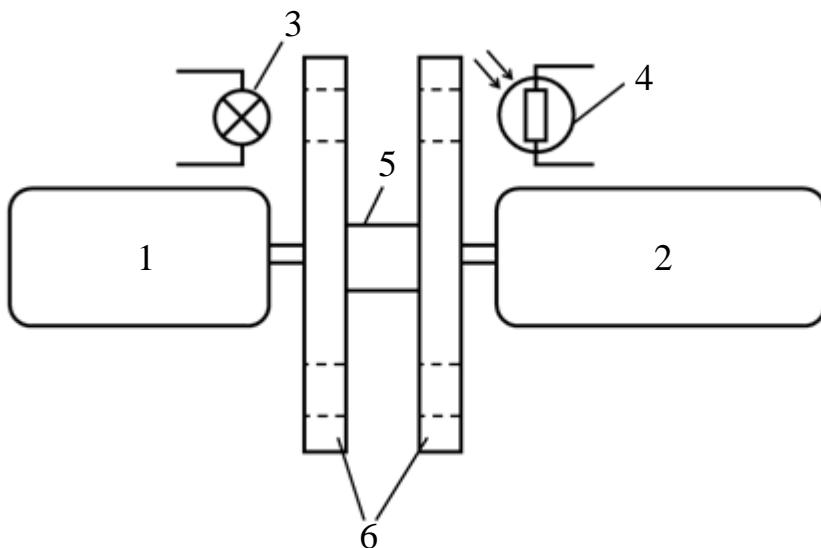


Рис. 7.2. Устройство измерения момента на валу двигателя и частоты вращения его ротора

Двигатель 1 создает на валу момент, приводящий его во вращение, а нагрузочное устройство 2 создает момент сопротивления вращению вала. Действие данных моментов, приложенных к упругому валу 5, приводит к его деформации (скручиванию). На концах базового участка упругого вала 5 расположены два идентичных друг другу диска 6 с единообразными сквозными отверстиями, находящимися на одинаковом расстоянии от оси вращения. Данные диски находятся между источником излучения и фотоприемным устройством так, что их сквозные отверстия в процессе вращения вала периодически оказываются на одной оси с фотоприемным устройством 4 и источником излучения 3. Это позволяет излучению проходить через данные отверстия от фотоприемного устройства 4 к источнику излучения 3. Фотоприемное устройство 4 и источник излучения 3 являются составными частями оптико-электронного преобразователя, который формирует развернутую во времени последовательность электрических импульсов. Период следования данных импульсов используют для вычисления частоты вращения ротора двигателя. За счет скручивания упругого вала 5 под действием приложенных к нему моментов диски 6 смещаются друг относительно друга и, следовательно, смещаются друг относительно друга отверстия в дисках, через которые проходит излучение от источника 3 к фотоприемному устройству 4. За счет изменения степени перекрытия пути прохождения излучения от источника 3 к фотоприемному устройству 4 изменяется длительность импульсов, формируемых фотоприемным устройством. Значения

участка упругого вала 5 расположены два идентичных друг другу диска 6 с единообразными сквозными отверстиями, находящимися на одинаковом расстоянии от оси вращения. Данные диски находятся между источником излучения и фотоприемным устройством так, что их сквозные отверстия в процессе вращения вала периодически оказываются на одной оси с фотоприемным устройством 4 и источником излучения 3. Это позволяет излучению проходить через данные отверстия от фотоприемного устройства 4 к источнику излучения 3. Фотоприемное устройство 4 и источник излучения 3 являются составными частями оптико-электронного преобразователя, который формирует развернутую во времени последовательность электрических импульсов. Период следования данных импульсов используют для вычисления частоты вращения ротора двигателя. За счет скручивания упругого вала 5 под действием приложенных к нему моментов диски 6 смещаются друг относительно друга и, следовательно, смещаются друг относительно друга отверстия в дисках, через которые проходит излучение от источника 3 к фотоприемному устройству 4. За счет изменения степени перекрытия пути прохождения излучения от источника 3 к фотоприемному устройству 4 изменяется длительность импульсов, формируемых фотоприемным устройством. Значения

длительности импульсов, формируемых фотоприемным устройством, используют в качестве меры измеряемого крутящего момента.

Параметры электрических импульсов, сформированных одним оптико-электронным преобразователем, могут быть применены для определения как крутящего момента на валу двигателя, так и частоты вращения его ротора.

*7.1.2. Разработка способа измерения частоты вращения вала асинхронных машин, работающих по схеме взаимной нагрузки, с применением спектр-токового анализа*

При нагрузочных испытаниях асинхронного двигателя измеряют температуру после часового номинального режима работы, определяют КПД, производят вибродиагностику и т.д. Для точного определения КПД и частот гармоник при вибродиагностике необходимо осуществлять определение скорости вращения ротора с высокой точностью [25]. Для этой цели разработаны устройства, использующие метод спектр-токового анализа, позволяющий также повысить технологичность процесса измерения скорости вращения ротора за счет исключения специальных датчиков и необходимости их монтажа [59, 89, 204, 215, 223]. Данные устройства основаны на выявлении в спектре тока, потребляемого асинхронным двигателем, зубцовых гармоник, и определении их частот, которые функционально связаны с частотой вращения ротора по выражению:

$$f_Z = \frac{f'_1 Z_2 (1-s)}{p} \pm f'_1 k, \quad (7.1)$$

где  $f'_1$  – частота тока в обмотке статора двигателя;

$Z_2$  – количество зубцов ротора;

$s$  – скольжение;

$p$  – число пар полюсов асинхронного двигателя;

$k$  – целое нечетное число [189].

Исследование процесса образования зубцовых гармоник в спектре тока асинхронного двигателя, питающегося от сети с синусоидальным напряжением, выполнено в работе [204]. Однако в схемах испытания АМ методом взаимной нагрузки преобразователь частоты, питающий обмотку статора, генерирует множество высших гармоник с относительно высокими амплитудами [153]. Следовательно, для проверки возможности выявления существующими методами пазовых

гармоник в зашумленном спектре тока необходимо выполнить соответствующие исследования.

Исследование процесса появления зубцовых гармоник ротора в токе статора выполнено с использованием известной математической модели, приведенной в [153]. Принятая математическая модель дополнительно учитывает пульсацию коэффициента взаимной индуктивности между фазами обмоток статора и ротора по выражению:

$$L'_m = L_m + A \sin(Z_2 \omega t), \quad (7.2)$$

где  $L_m$  – среднее значение коэффициента взаимной индуктивности;  $A$  – амплитуда пульсаций;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Для исследования выбраны асинхронные двигатели типов АИР63В4, 5АМ112М4 и 5АМН315М4 с номинальными мощностями 0,37; 5,5 и 250 кВт соответственно. Параметры их схем замещения приближенно определены, исходя из каталожных данных, по известной методике, приведенной в [186]. Число зубцов ротора при расчете принято  $Z_2 = 24$ . Математическое моделирование выполнено в системе компьютерной алгебры *Mathcad*.

Моделирование работы произведено на промежутке времени 2,58 с для асинхронных двигателей типа АИР63В4, 5АМ112М4 и 5,16 с для асинхронного двигателя типа 5АМН315М4 (ввиду его больших момента инерции и постоянной времени переходного электромеханического процесса). Количество расчетных точек на секунду для всех рассматриваемых типов двигателей принято равным 409600. Начальная скорость вращения вала в расчете задавалась равной величине синхронной скорости. Частота питающего напряжения на входе обмотки статора двигателя задана равной 50 Гц. На входе обмотки статора генератора подобрана такая величина частоты питающего напряжения, соответствующая номинальному скольжению.

Ввиду наличия относительно небольших незатухающих колебаний скорости вращения вала после завершения основного переходного электромеханического процесса, обусловленного заданием номинальной нагрузки, установившаяся частота вращения принята как средняя арифметическая величина от всех значений, соответствующих второй половине рассчитываемого промежутка времени.

Над напряжением и током одной фазы статора, найденными в результате моделирования, произведено быстрое преобразование Фурье и получены спектры их гармоник. Расчетный фрагмент спектра гармоник напряжения на выходе ПЧ, работающего с частотой модуляции 4 кГц, приведен на рис. 7.3.

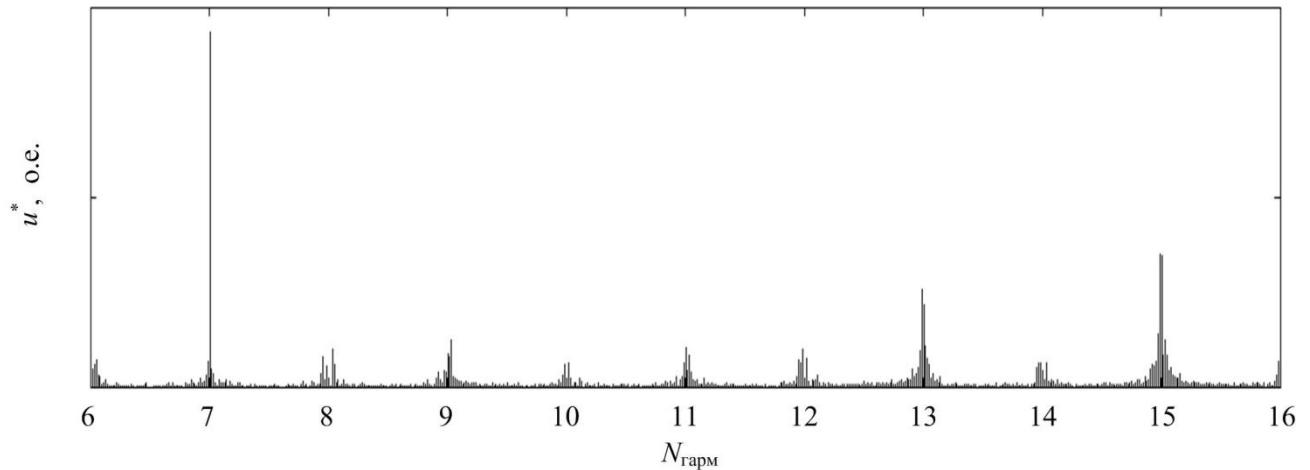


Рис. 7.3. Фрагмент спектра гармоник напряжения, подаваемого на обмотку статора асинхронного двигателя от преобразователя частоты

Для исключения влияния гармоник напряжения на спектр тока выполнено деление амплитуд гармоник тока на амплитуды соответствующих гармоник напряжения. Результат данной операции для асинхронных двигателей трех рассматриваемых типов приведен на рис. 7.4.

Поиск зубцовых гармоник рационально осуществлять в определенных границах, за которыми они в принципе оказаться не могут.

Определим эти границы.

В алгоритме задания режима нагрузки в известных способах асинхронные двигатели сначала разгоняются без нагрузки на валу путем одновременного увеличения частоты питающих напряжений, подаваемых на обе машины [220, 251, 256].

На этом этапе измерение частоты вращения не требуется. Далее снижается частота напряжения, питающего нагруженную машину, за счет чего она переходит в режим рекуперативного торможения, и частота вращения ротора снижается.

С одной стороны, частота вращения ротора не может быть выше частоты вращения магнитного поля, что может служить для определения верхней границы диапазонов поиска зубцовых гармоник:

$$f_{Z_{\text{гр1}}} = f_1' \frac{Z_2}{p} \pm f_1' k . \quad (7.3)$$

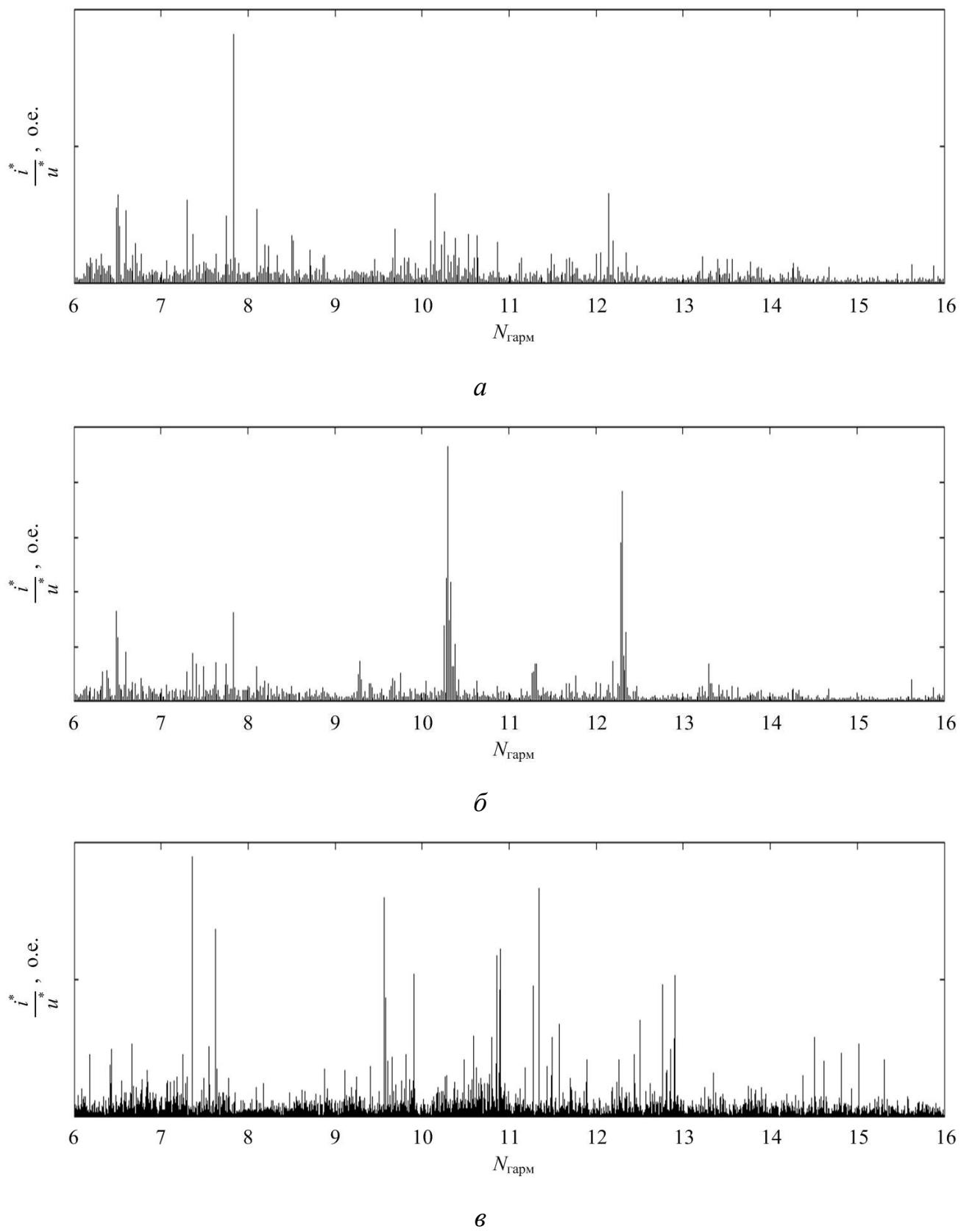


Рис. 7.4. Фрагмент спектра, полученного в результате деления амплитуд гармоник тока на амплитуды соответствующих гармоник напряжения одной фазы обмотки статора асинхронного двигателя мощностью:  
*a* – 0,37 кВт; *б* – 5,5 кВт; *в* – 250 кВт

Значение частоты вращения вала, установившееся по окончанию переходного электромеханического процесса, можно приблизенно определить по формуле:

$$n_2 \approx \frac{n'_1 + n''_1}{2}, \quad (7.4)$$

где  $n'_1$ ,  $n''_1$  – частоты вращения магнитного поля испытуемого асинхронного двигателя и нагрузочной асинхронной машины соответственно.

Отсюда следует, что скольжение машины, работающей в двигательном режиме:

$$s \approx \frac{f'_1 - f''_1}{2f'_1}, \quad (7.5)$$

где  $f''_1$  – частота тока в обмотке статора генератора.

В том случае, если оба асинхронных двигателя получают питание от статических преобразователей, для расчета скольжения могут быть использованы значения  $f'_1$  и  $f''_1$  полученные от вычислителей частоты питающего напряжения, интегрированных в данные преобразователи. Если в схеме один из двигателей питается от статического преобразователя, а другой – от сети, то значение  $f'_1$  известно и равняется 50 Гц. В последнем случае рациональнее анализировать спектр тока, того двигателя, который подключен непосредственно к сети.

Для учета некоторого отклонения частоты вращения от величины, найденной по формуле (7.5) и наличия погрешности при определении величин  $f'_1$  и  $f''_1$  при вычислении нижней границы диапазонов поиска зубцовых гармоник введем коэффициент  $K_\Delta < 1$ . Тогда данная граница может быть найдена по формуле:

$$f_{Z_{\text{гр2}}} = \frac{(f'_1 + f''_1)Z_2}{2} K_\Delta \pm f'_1 k. \quad (7.6)$$

Фрагменты спектров, соответствующие расчетным диапазонам поиска зубцовых гармоник приведены на рис. 7.5–7.7, а, б.

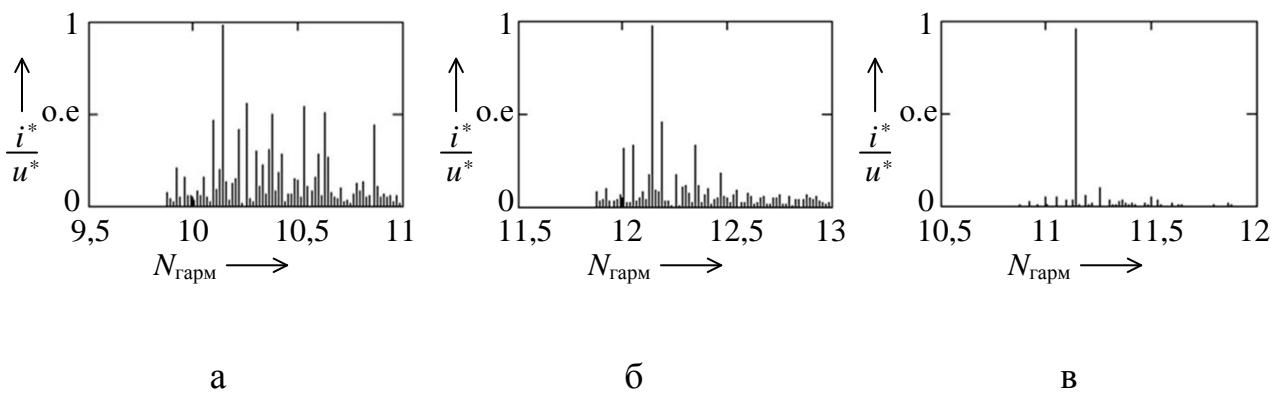


Рис. 7.5. Диапазоны поиска зубцовых гармоник для двигателя мощностью 0,37 кВт: а – первый диапазон; б – второй диапазон; в – произведение соответствующих амплитуд двух диапазонов

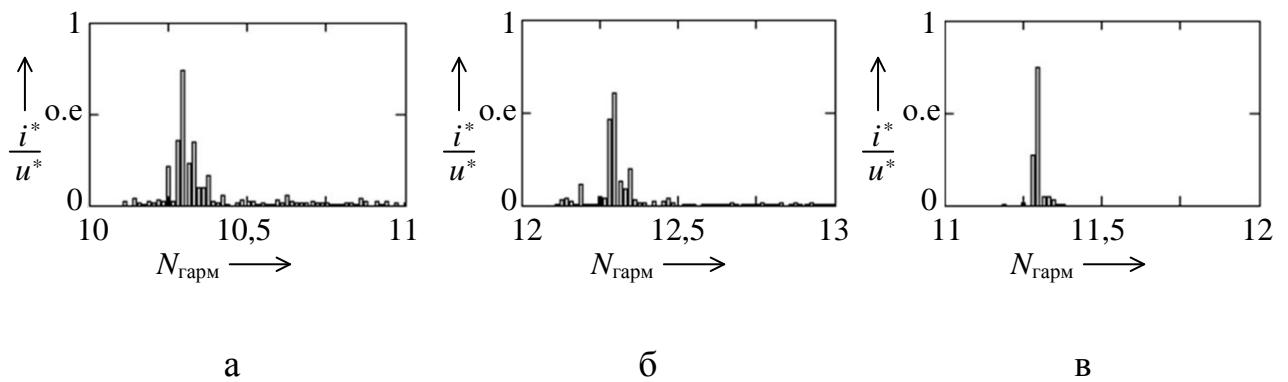


Рис. 7.6. Диапазоны поиска зубцовых гармоник для двигателя мощностью 5,5 кВт: а – первый диапазон; б – второй диапазон; в – произведение соответствующих амплитуд двух диапазонов

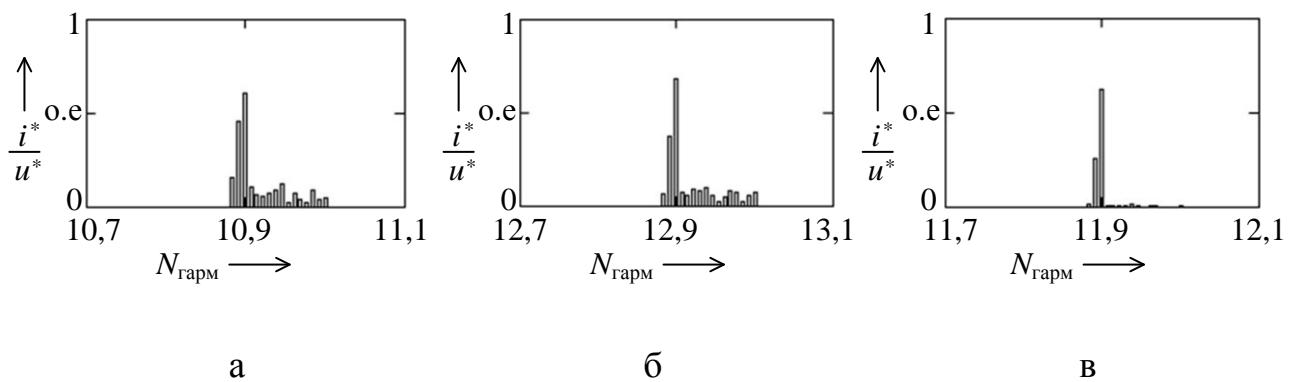


Рис. 7.7. Диапазоны поиска зубцовых гармоник для двигателя мощностью 250 кВт: а – первый диапазон; б – второй диапазон; в – произведение соответствующих амплитуд двух диапазонов

Для подавления шумов в диапазонах поиска зубцовых гармоник произведено перемножение соответствующих амплитуд первого и второго диапазона. Результаты данной операции представлены на рис. 7.5–7.7, в, на которых номера гармоникам присвоены средние арифметические от номеров перемножаемых гармоник. В полученном спектре явно выделяется зубцовая гармоника порядка  $N_Z$ , имеющая частоту

$$f_Z = f_1' N_Z. \quad (7.7)$$

После нахождения зубцовой гармоники может быть определено скольжение асинхронного двигателя по выражению:

$$s = 1 - \frac{p}{Z_2} N_Z. \quad (7.8)$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- 1) при испытании АМ по схемам взаимной нагрузки с питанием от статических преобразователей частоты возможно применение метода спектр-токового анализа для определения угловой скорости вращения асинхронных машин, как малой, так и большой мощности;
- 2) в схемах взаимной нагрузки возможно сужение границ диапазонов поиска зубцовых гармоник за счет использования известных в данном случае частот напряжений, подаваемых на обмотки статора обеих машин;

3) применение метода спектр-токового анализа для определения угловой скорости вращения асинхронных машин позволяет осуществлять определение скорости вращения ротора с высокой точностью, а также повысить технологичность процесса измерения скорости вращения ротора за счет исключения специальных датчиков и необходимости их монтажа.

На основании полученных результатов предлагается следующий способ измерения частоты вращения вала асинхронных машин, работающих по схеме взаимной нагрузки, с применением спектр-токового анализа, поясняющийся блок-схемой, приведенной на рис. 7.8.

На блок-схеме показана последовательность действий при осуществлении предлагаемого способа определения частоты вращения ротора асинхронных двигателей.

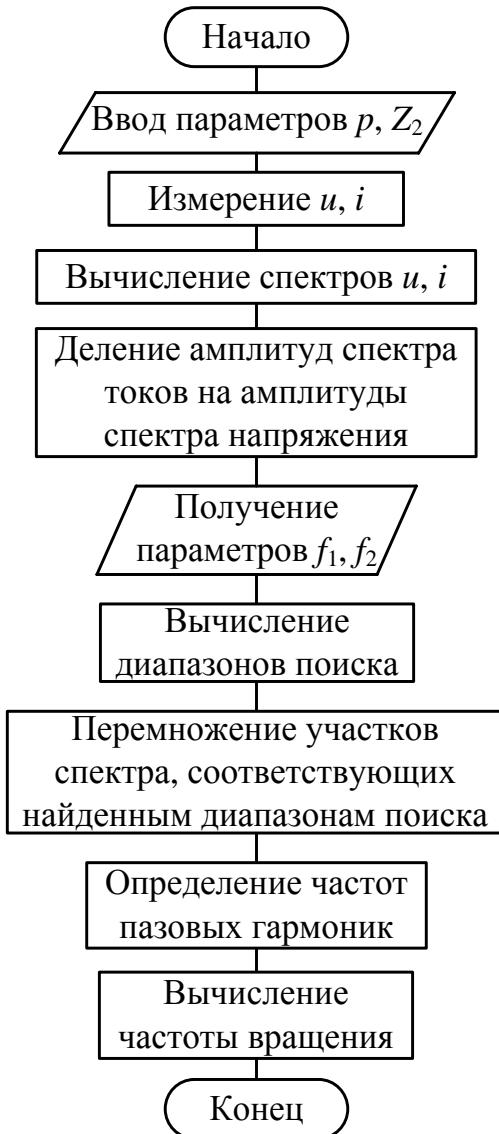


Рис. 7.8. Алгоритм осуществления способа измерения частоты вращения вала асинхронных машин, работающих по схеме взаимной нагрузки, с применением спектр-токового анализа

Предлагаемый способ определения частоты вращения асинхронных машин применим в схеме взаимной нагрузки при питании обмоток статора от преобразователей частоты (например, см. рис. 1.21 и др.) и реализуется следующим образом.

Определение частот зубцовых гармоник, присутствующих в спектре тока, позволяет вычислить скольжение асинхронного двигателя.

Зависимость частот зубцовых гармоник от скольжения имеет следующий вид (7.1).

Таким образом, для вычисления скольжения и частоты вращения асинхронного двигателя необходимо задание числа пазов ротора  $Z_2$  и пар полюсов  $p$  асинхронного двигателя.

После этого с помощью датчиков напряжения и тока, подключенных к одной из фаз статора асинхронного двигателя, производится измерение мгновенных значений напряжения ( $u$ ) и тока ( $i$ ) и разложение их на соответствующие спектры  $A_u$  и  $A_i$  с помощью быстрого преобразования Фурье.

Далее производится деление спектров: амплитуды гармоник тока делятся на амплитуды соответствующих им гармоник напряжения, в результате чего получаем спектр  $A_{i/u}$ .

После этого для полученного спектра  $A_{i/u}$  осуществляется вычисление четырех одинаковых по ширине диапазонов поиска зубцовых гармоник ротора  $A_{i/u_n}$  с номерами  $n = 1, 2, 3, 4$ .

Верхняя граница  $n$ -го диапазона поиска определяется по выражению (7.3). Нижняя граница  $n$ -го диапазона поиска определяется исходя из того, что частота вращения ротора асинхронных двигателей, работающих по схеме взаимной нагрузки, приблизительно равна среднему арифметическому значению частот вращения их магнитных полей, т.е.  $n_2 = \frac{(n_{11} + n_{12})}{2}$ , отсюда  $n_2 = \frac{60(f_1 + f_2)}{2p}$ .

Исходя из этого, нижнюю границу диапазонов поиска можно принять в соответствии с выражением (7.6).

Частоты  $f_1$  и  $f_2$  напряжений, питающих обмотки статора асинхронных двигателей, работающих по методу взаимной нагрузки, могут быть получены с помощью штатных средств (определителей частоты питающего напряжения), входящих в состав преобразователей частоты.

После определения границ диапазонов поиска зубцовых гармоник амплитуды гармоник первого диапазона поиска  $A_{i/u_1}$  умножаются на соответствующие амплитуды гармоник второго  $A_{i/u_2}$ , третьего  $A_{i/u_3}$  и четвертого  $A_{i/u_4}$  диапазонов поиска. В результате имеем спектр  $A_{i/u_{1234}}$ , имеющий такую же ширину, как и четыре диапазона поиска зубцовых гармоник  $A_{i/u_1}, A_{i/u_2}, A_{i/u_3}$  и  $A_{i/u_4}$ .

В полученном спектре  $A_{i/u_{1234}}$  определяется гармоника с максимальной амплитудой и соответствующие ей частоты зубцовых гармоник  $f_{Zn}$ , попадающих в диапазоны поиска  $A_{i/u_1}, A_{i/u_2}, A_{i/u_3}$  и  $A_{i/u_4}$ .

Зная частоты  $f_{Zn}$  и воспользовавшись выражением (7.1) можно определить скольжение  $s$  асинхронного двигателя. По найденному скольжению вычисляется частота вращения ротора.

Таким образом, применение предлагаемого способа за счет сужения диапазона поиска зубцовых гармоник позволит снизить затраты вычислительных ресурсов и ве-

роятность ошибочного определения номеров зубцовых гармоник при обеспечении высокого уровня автоматизации в процессе определения частоты вращения ротора асинхронных машин при их испытании с применением метода взаимной нагрузки и питанием от преобразователей частоты [136].

## **7.2. Разработка новых технических решений, направленных на совершенствование структурных компонентов комплексов испытаний тяговых машин постоянного тока**

Как известно из статистики отказов коллекторных тяговых двигателей постоянного тока, работающих в наиболее тяжелых условиях эксплуатации, наиболее проблемным узлом в плане надежности является коллекторно-щеточный узел [8, 10, 45, 99, 101, 177]. Подвижные электрические контакты в принципе имеют более низкую надежность, чем неподвижные, что обусловлено повышенным износом их контактирующих поверхностей, механическими воздействиями (вibration) и др. [6, 46, 52, 91, 144]. Низкая надежность КЩУ дополнитель но усугубляется тем, что его элементы участвуют в процессе коммутации секций якорной обмотки [44, 205, 234, 245]. При этом, чем хуже настройка коммутации, тем сильнее искрение в скользящем контакте и тем значительно быстрее изнашиваются и выходят из строя электрические щетки и коллектор [164, 203, 249, 252, 253].

Для обеспечения своевременной замены изношенных электрических щеток необходимо иметь информацию о прогнозируемом времени их износа до критического уровня, что в свою очередь требует наличия информации о степени искрения щеток в эксплуатации, показателях режимов работы (тока щеток, скорости вращения коллектора) и др.

Ниже рассмотрены вопросы объективной оценки интенсивности искрения, позволяющей получить массив данных необходимых для проведения испытаний электрических щеток и определения их остаточного ресурса.

### *7.2.1. Обоснование необходимости учета параметров режимов эксплуатации при испытаниях тяговых электродвигателей*

В настоящее время в соответствии с ГОСТ 2582-2013 оценку коммутационной устойчивости работы тяговых электродвигателей (ТЭД) при проведении приемосдаточных испытаний производят в стационарном режиме нагрузки [35]. При этом уровень искрения под щетками ТЭД зависит не только от постоянной составляющей тока якоря, но и от его производной по времени, которая воздействует на магнитный поток в зоне коммутации, что приводит к появлению неидентич-

ности коммутационных циклов в секциях обмотки якоря и, следовательно, к значительному ухудшению условий коммутации [2].

Для возможности детального анализа данной проблемы проведено математическое моделирование переходных процессов в цепи обмотки якоря ТЭД, которое позволяет получить необходимые данные для определения режимов, устанавливаемых при выполнении испытаний [7]. В качестве исходных данных для математического моделирования переходных режимов послужили измерения, выполненные на перегоне Ишим – Московка Западно-Сибирской железной дороги, и параметры эксплуатируемых на данном перегоне электровозов ВЛ-10 и тяговых двигателей ТЛ-2К. Данные измерений параметров по одному из участков выбранного перегона приведены на рис. 7.9.

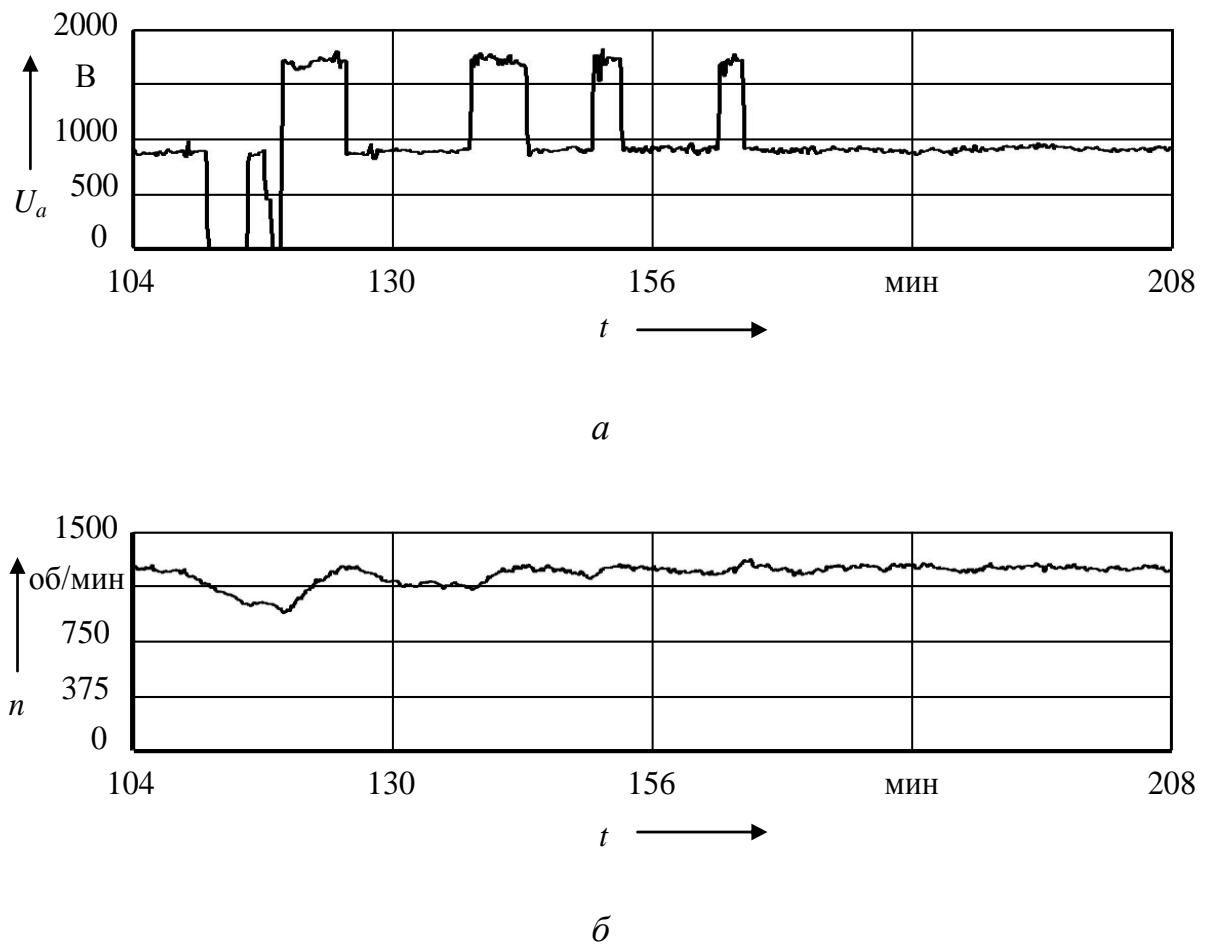


Рис. 7.9. Измерения, выполненные на участке перегона Ишим – Московка:  
а – напряжение, приходящееся на один ТЭД, с учетом схемы соединения  
(серийное, серийс-параллельное, параллельное); б – скорость вращения  
якоря ТЭД

Помимо напряжения контактной сети, схемы соединения силовых цепей ТЭД и скорости движения электровоза регистрировалась степень ослабления возбуждения.

На основании электрической схемы соединений электровоза ВЛ-10 [93] составлена схема замещения, приведенная на рис. 7.10.

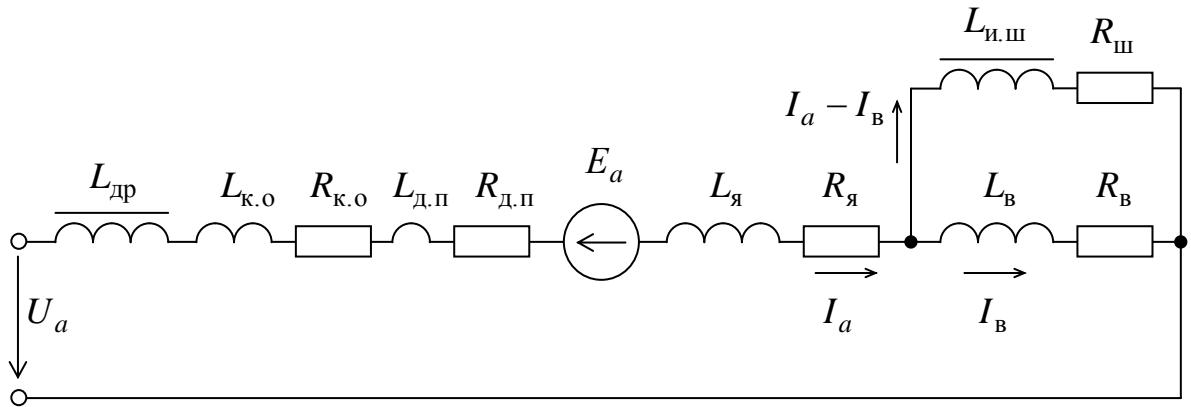


Рис. 7.10. Схема замещения силовой цепи электровоза ВЛ-10

Исходя из рис. 7.10 сформирована следующая система дифференциальных уравнений, описывающая переходные процессы в якорной цепи ТЭД:

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{\Sigma L_a + L_{dp}(t)} \cdot [U_a(t) - n(t) \cdot C_e \cdot \Phi(I_B) - I_a \cdot \Sigma R_a]; \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{1}{L_B + L_{i.sh}} \cdot \left[ (U_a(t) - n(t) \cdot C_e \cdot \Phi(I_B)) \cdot \frac{L_{i.sh}}{\Sigma L_a + L_{dp}(t)} - \dots \right. \\ \left. \dots - I_B(R_B + R_{sh}(t)) + I_a \left[ R_{sh}(t) - \Sigma R_a \cdot \frac{L_{i.sh}}{\Sigma L_a + L_{dp}(t)} \right] \right], \end{cases} \quad (7.9)$$

где  $I_a, I_B$  – ток якоря и возбуждения, А;

$t$  – время, с;

$U_a(t)$  – напряжение, приходящееся на один ТЭД, равное отношению напряжения сети к коэффициенту, учитывающему схему соединения двигателей (серийное, серийс-параллельное, параллельное), В;

$n(t)$  – частота вращения якоря, об/мин;

$C_e \cdot \Phi(I_B) = E_a/n$  – отношение ЭДС обмотки якоря к частоте вращения, В·мин/об;

$R_{\text{ш}}(t)$  – суммарное сопротивление в цепи, шунтирующей обмотку возбуждения, задающее степень ослабления возбуждения, Ом;

$\Sigma R_a$  – сумма сопротивлений обмоток якоря  $R_a$ , добавочных полюсов  $R_{\text{д.п.}}$ , компенсационной  $R_{\text{к.о.}}$  и возбуждения  $R_B$ , Ом;

$\Sigma L_a$  – сумма индуктивностей обмоток якоря  $L_a$ , добавочных полюсов  $L_{\text{д.п.}}$ , компенсационной  $L_{\text{к.о.}}$  и возбуждения  $L_B$ , Гн;

$L_B$ ,  $L_{\text{и.ш.}}$ ,  $L_{\text{др.}}(t)$  – индуктивности обмотки возбуждения, индуктивного шунта и дросселя, Гн.

При этом следует учитывать, что индуктивность  $L_{\text{и.ш.}}$  является функцией, зависящей от тока, протекающего по индуктивному шунту  $I_{\text{и.ш.}} = I_a - I_B$ , т. е.  $L_{\text{и.ш.}} = f(I_a - I_B)$ .

В случае переключения схемы соединения ТЭД (серийное, серийно-параллельное, параллельное), которое происходит при полном возбуждении, необходимо решить только одно (первое) дифференциальное уравнение из системы (7.9). При этом в сумму сопротивлений  $\Sigma R_a$  необходимо включить сопротивление добавочных резисторов  $R_d(t)$ , вводимых в цепь якоря в промежуточных положениях контроллера машиниста.

При решении представленной системы дифференциальных уравнений с нелинейными коэффициентами (7.9) использованы программа *Mathcad* и реализованный в ней численный метод решения систем дифференциальных уравнений Рунге – Кутта, позволяющий с необходимой точностью найти численные решения и визуализировать их в виде графиков зависимости тока якоря от времени  $I_a = f(t)$ .

По расчетным кривым получен ряд значений производной тока якоря по времени  $dI_a/dt$ .

Статистическая обработка результатов, полученных на расчетном перегоне для переходных процессов при переключениях в силовой цепи, позволила получить гистограммы распределения скорости изменения тока якоря. Одна из характерных гистограмм, соответствующих переходу с полного на ослабленное возбуждение, приведена на рис. 7.11.

Количество интервалов группирования на гистограмме (см. рис. 7.12) выбрано в соответствии с формулой Стерджеса [179].

Полученная гистограмма наглядно отображает распределение значений производной тока якоря для рассмотренного перегона.

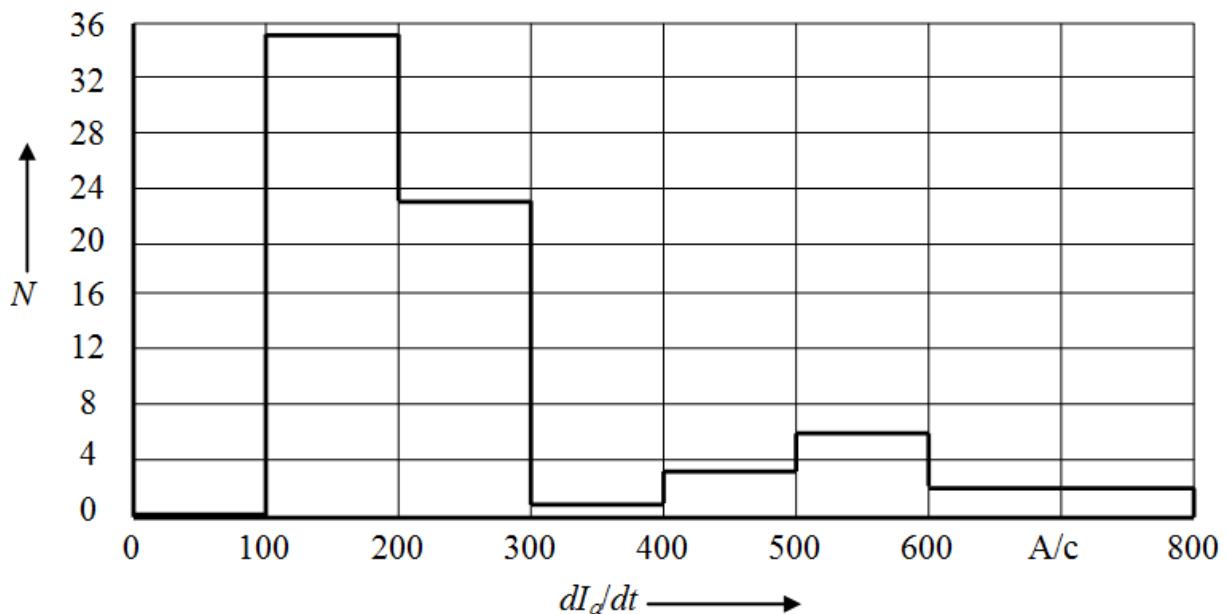


Рис. 7.11. Гистограмма распределения скорости изменения тока  $dI_a/dt$ , рассчитанная для перегона Ишим – Московка

Анализ результатов, полученных на примере перегона Ишим – Московка, показывает, что щетки тяговых электродвигателей в процессе эксплуатации испытывают многочисленные изменения режима работы с достаточно высокой интенсивностью данных изменений [7].

#### 7.2.2. Разработка способа определения остаточного ресурса электрощеток и метода настройки тяговых электродвигателей

Решение задачи обеспечения надежного функционирования подвижного состава (электровозов, тепловозов, автосамосвалов и др.) невозможно без контроля его технического состояния и осуществления своевременного технического обслуживания и ремонта.

Анализ статистических данных по отказам подвижного состава с коллекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД) показал, что повышенный износ щеток и неисправности, связанные с коллекторно-щеточным узлом наряду с повреждениями подшипниковых узлов и изоляции токопроводящих частей являются наиболее частыми [146, 163, 243].

С точки зрения возможной тяжести последствий выхода из строя коллекторно-щеточный узел может быть назван критическим элементом [38, 176].

Известны различные способы определения ресурса работы щеток коллекторных электродвигателей, которые сводятся к сравнению текущей ( $l_{\text{щ}}$ ) и допустимой высоты щетки  $l_{\text{щ, д}}$  и вычислению интенсивности ее изнашивания ( $\Delta l / t$ )

[67, 130, 132, 245]. Зная данные величины можно определить ресурс щеток по выражению:

$$T_{щ.р} = \left( l_{щ} - l_{щ.д} \right) / \left( \frac{\Delta I}{\Delta t} \right). \quad (7.10)$$

Математическая модель процесса изнашивания электрощетки представляет собой выражение, в котором интенсивность износа складывается из трех составляющих – фрикционной ( $\frac{\Delta I_\phi}{\Delta t}$ ), электрокоррозионной ( $\frac{\Delta I_k}{\Delta t}$ ) и электроэрозион-

ной ( $\frac{\Delta I_{эр}}{\Delta t}$ ) [11-13]:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = K_\phi \cdot n \cdot N_{к.ср} + K_k \cdot n^{\frac{3}{4}} \cdot I_{щ}^{\frac{1}{2}} \cdot N_{к.ср} + K_{эр} \cdot n \cdot P_i, \quad (7.11)$$

где  $z, y$  – обобщенные координаты щетки по вертикальной и горизонтальной осям;

$M$  – масса щетки с учетом массы рычага щеткодержателя;

$F_{трр}, F_{трк}$  – сила трения между щеткой и рычагом щеткодержателя и между щеткой и коллектором;

$N_p$  – сила нажатия на щетку;

$g$  – ускорение свободного падения на поверхности Земли;

$\eta$  – массив значений высот всех коллекторных пластин (профиль коллектора);

$F_{тщд1}, F_{тщд2}$  – силы трения между щеткой и стенками щеткодержателя;

$Y_1, Y_2$  – горизонтальные упругие силы в местах контакта щетки со стенками щеткодержателя.

Различные способы определения ресурса работы электрощеток имеют свои недостатки [68, 145]. Наиболее обоснованным с точки зрения простоты и точности практического определения коэффициентов  $K_\phi, K_k, K_{эр}$  является способ, приведенный в [94, 193]. В соответствии с данным способом в связи с нелинейной зависимостью электрокоррозионной составляющей от силы нажатия ( $N_k$ ) предложено учитывать колебания данной силы, обусловленные воздействием профиля коллектора, путем математического моделирования движения щетки в щеткодержателе [57, 69]. При описании данного способа в [94] обосновано применение математической модели механического взаимодействия щетки с коллектором в двух степенях свободы, представляющее собой систему из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + F_{тщд1}(y, \dot{z}) + F_{тщд2}(y, \dot{z}) - N_p - Mg \cos(\alpha) + N_k(y, z, \eta) = 0; \\ M\ddot{y} + F_{трр}(N_p, \dot{y}) + F_{трк}(N_k, \dot{y}) - Y_1(y) + Y_2(y) + Mg \sin(\alpha) = 0, \end{cases} \quad (7.12)$$

где  $z, y$  – обобщенные координаты щетки по вертикальной и горизонтальной осям;

$M$  – масса щетки с учетом массы рычага щеткодержателя;

$F_{\text{трр}}, F_{\text{трк}}$  – сила трения между щеткой и рычагом щеткодержателя и между щеткой и коллектором;

$N_p$  – сила нажатия на щетку;

$g$  – ускорение свободного падения на поверхности Земли;

$\eta$  – одномерная матрица со значениями высот всех коллекторных пластин (профиль коллектора);

$F_{\text{тщд1}}, F_{\text{тщд2}}$  – силы трения между щеткой и стенками щеткодержателя;

$Y_1, Y_2$  – горизонтальные упругие силы в местах контакта щетки со стенками щеткодержателя [78, 107].

Приведенная математическая модель механического взаимодействия щетки с коллектором позволяет получить массивы данных со значениями силы воздействия профиля коллектора на щётку  $N_k$ , изменяющейся в процессе вращения якоря и построить диаграмму плотности вероятности распределения данной силы по заданным интервалам [27, 190].

С учетом механического взаимодействия щетки с коллектором электрокоррозионная составляющая интенсивности износа принимает вид:

$$\Delta I_k = K_k \cdot n^{\frac{3}{4}} \cdot I_{\text{ш}}^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \sum_j (N_{kj} \cdot P(N_{kj})) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7.13)$$

где  $P(N_{kj})$  – плотность вероятности нахождения значения силы  $N_k$  в  $j$ -ом диапазоне.

Известные способы позволяют определить ресурс работы щеток коллекторных электродвигателей только для усредненных показателей режимов работы, влияющих на износ (сила тока  $I_{\text{ш}}$ , частота вращения якоря  $n$ , мощность искрения  $P_i$ ) [221, 241, 222]. Однако, исходя из представленной выше математической модели процесса изнашивания электрощетки зависимость ее износа ( $\Delta I$ ) от силы проходящего по ней тока ( $I_{\text{ш}}$ ) и частоты вращения якоря ( $n$ ) является нелинейной [221]. Следовательно, при эксплуатации тяговых электродвигателей с варьированием данных показателей с большими отклонениями в широком диапазоне применение усредненных значений показателей  $I_{\text{ш}}$  и  $n$  при моделировании процесса изнашивания не приемлемо.

В настоящее время самосвалы и новый подвижной состав железных дорог оснащаются системами мониторинга показателей режимов работы. Данные системы в режиме реального времени осуществляют измерение и запись широкого набора показателей режимов работы, в число которых у карьерных самосвалов

входят ток якоря, скорость вращения якоря и интенсивность искрения, у локомотивов – ток якоря и скорость движения.

При известных параметрах коллекторно-щеточного узла, зная ток якоря, можно рассчитать силу тока  $I_{\text{щ}}$ , проходящего по щетке. По известным диаметру колеса, передаточному числу тягового редуктора и скорости движения может быть найдена частота вращения якоря  $n$ . Интенсивность искрения, измеренная в баллах по ГОСТ 2582-2013 [35] может быть переведена в мощность искрения в относительных единицах. Функциональную зависимость данных величин можно получить после обработки результатов коммутационных испытаний на соответствующем тяговом двигателе с применением прибора контроля коммутации [3].

Таким образом, массивы данных, формируемые системами мониторинга, могут быть применены для формирования прогноза по износу электрощеток с учетом режимов работы тяговых электродвигателей в реальных условиях эксплуатации [247].

Массивы данных, полученные с применением бортовых систем мониторинга, позволяют получить диаграммы распределения показателей режимов работы. Примеры полученных распределений мощности искрения под щетками тяговых двигателей карьерных самосвалов, приведены на рис. 7.13.

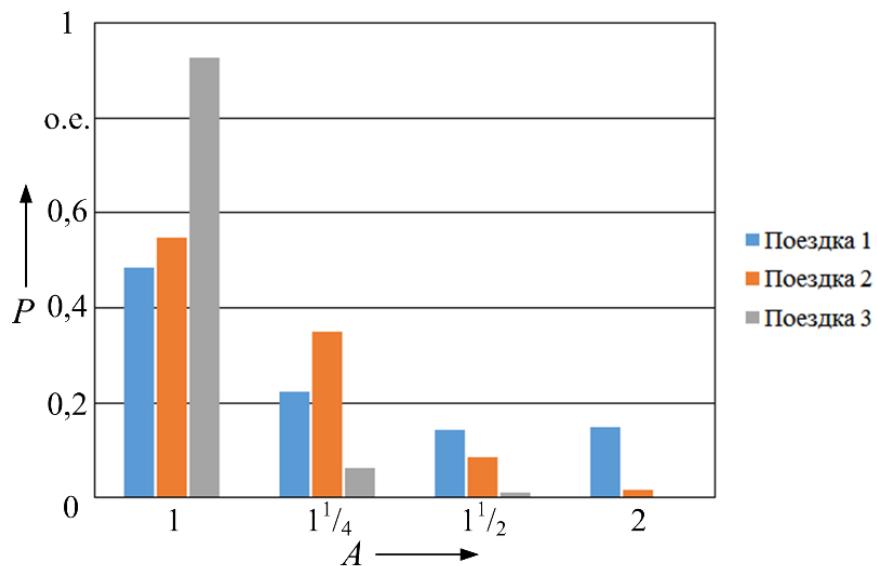


Рис. 7.13. Распределения интенсивности искрения щеток ТЭД

Пример временных диаграмм, полученных системой мониторинга параметров режимов работы, приведен на рис. 7.12 [159].

Тяговые электродвигатели ЭДП-800 используются в качестве привода ведущих колес карьерных автосамосвалов БелАЗ. Данные двигатели работают в

двигательном и в генераторном режиме (в режиме электрического торможения на тормозные резисторы) и являются реверсивными.

Электродвигатель ЭДП-800 имеет следующие номинальные параметры:  
 $P_{\text{ном}} = 800 \text{ кВт}$ ;  $U_{\text{ном}} = 850 \text{ В}$ ;  $I_{a,\text{ном}} = 1023 \text{ А}$ ;  $n_{\text{ном}}/n_{\text{max}} = 570/2000 \text{ об/мин}$ ;  
 $M_{\text{ном}}/M_{\text{max}} = 13,4/26,8 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  $\eta_{\text{ном}} = 92 \%$ .

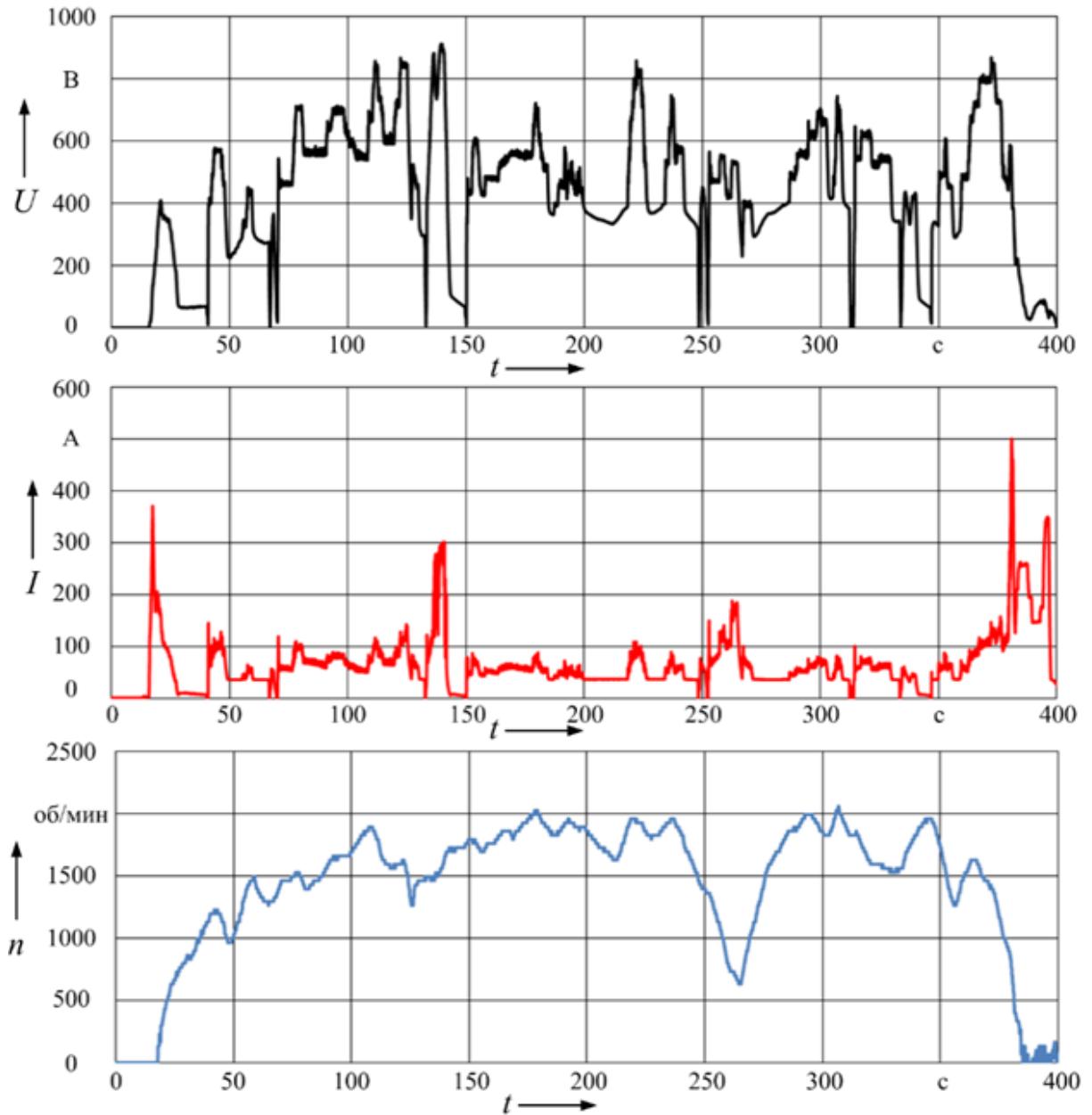


Рис. 7.12. Временные диаграммы показателей режима работы тягового электродвигателя, полученные бортовой системой мониторинга карьерного самосвала

Примеры распределений показателей режимов работы, фиксируемых системами мониторинга, полученные для тяговых двигателей электровозов, тепловозов и карьерных самосвалов, приведены на рис. 7.14-7.16.

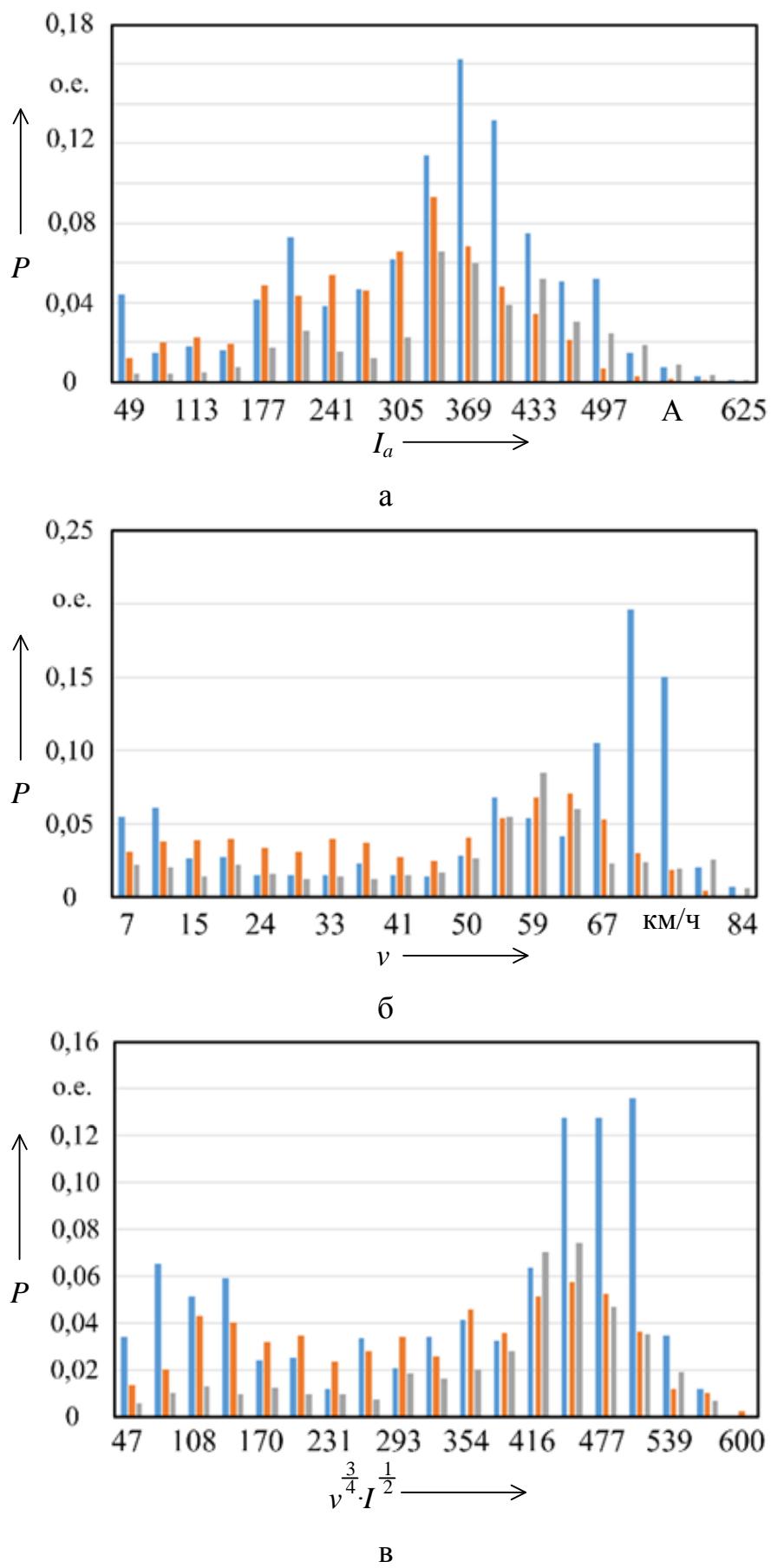


Рис. 7.14. Распределения показателей режимов работы тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К

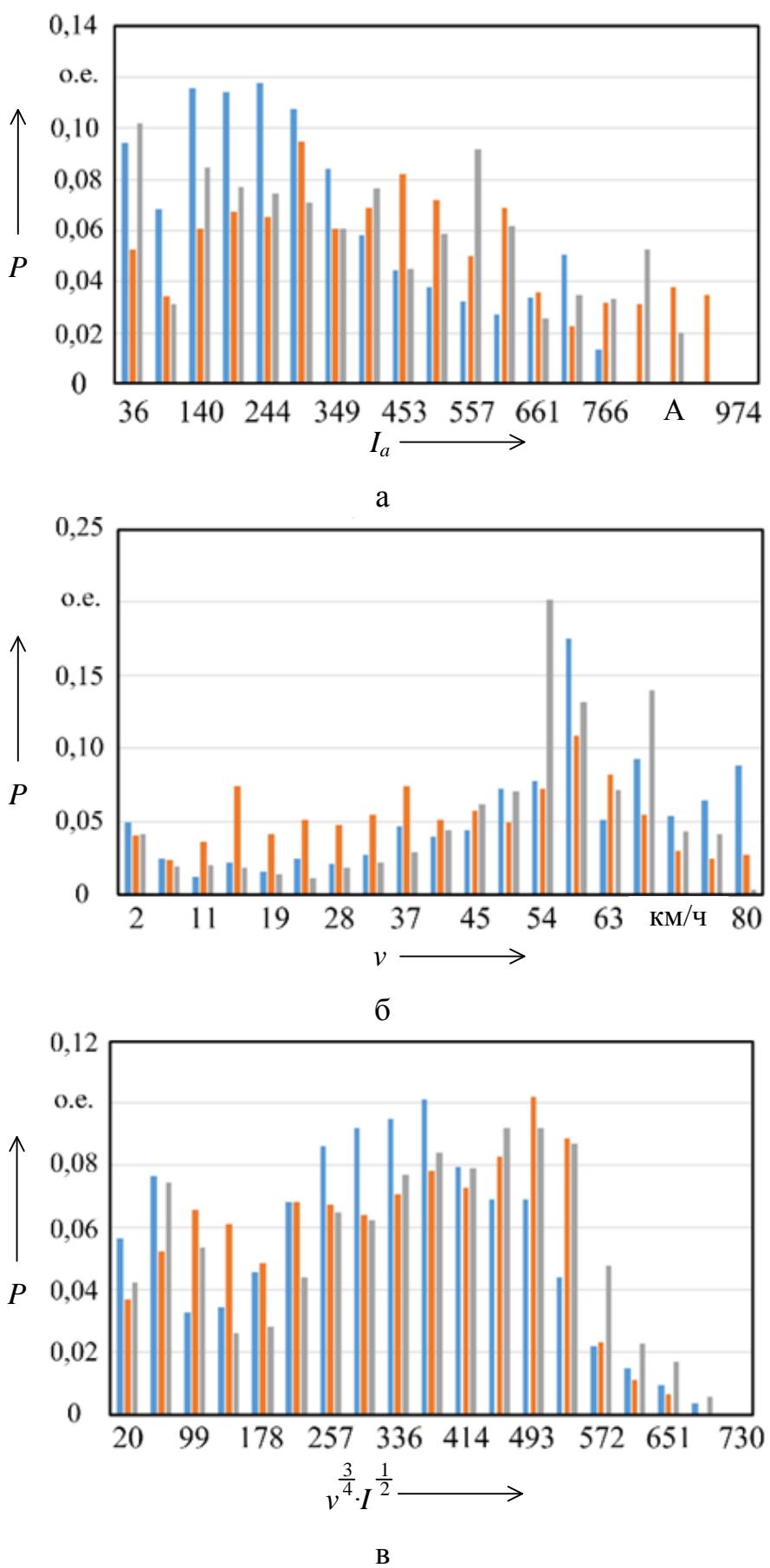


Рис. 7.15. Распределения показателей режимов работы тяговых электродвигателей тепловозов 2ТЭ116У

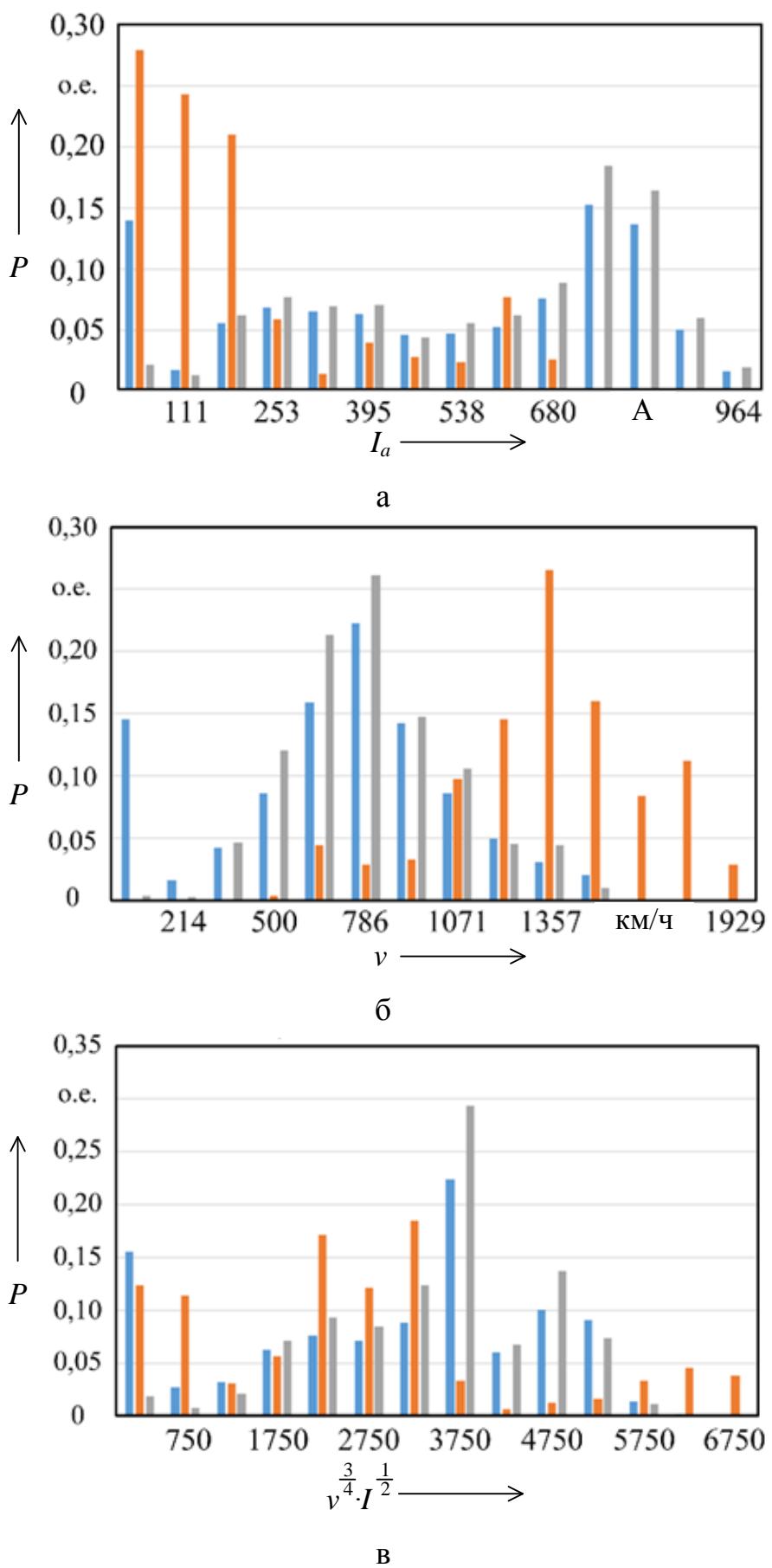


Рис. 7.16. Распределения показателей режимов работы тяговых электродвигателей карьерных самосвалов «БелАЗ»

При наличии обработанных массивов данных, полученных от бортовой системы мониторинга показателей режимов работы ТЭД может быть реализован следующий способ испытания тяговых электродвигателей с целью прогнозирования остаточного ресурса электрощеток, иллюстрируемый блок-схемой алгоритма, приведенной на рис. 7.17 [312, 140].

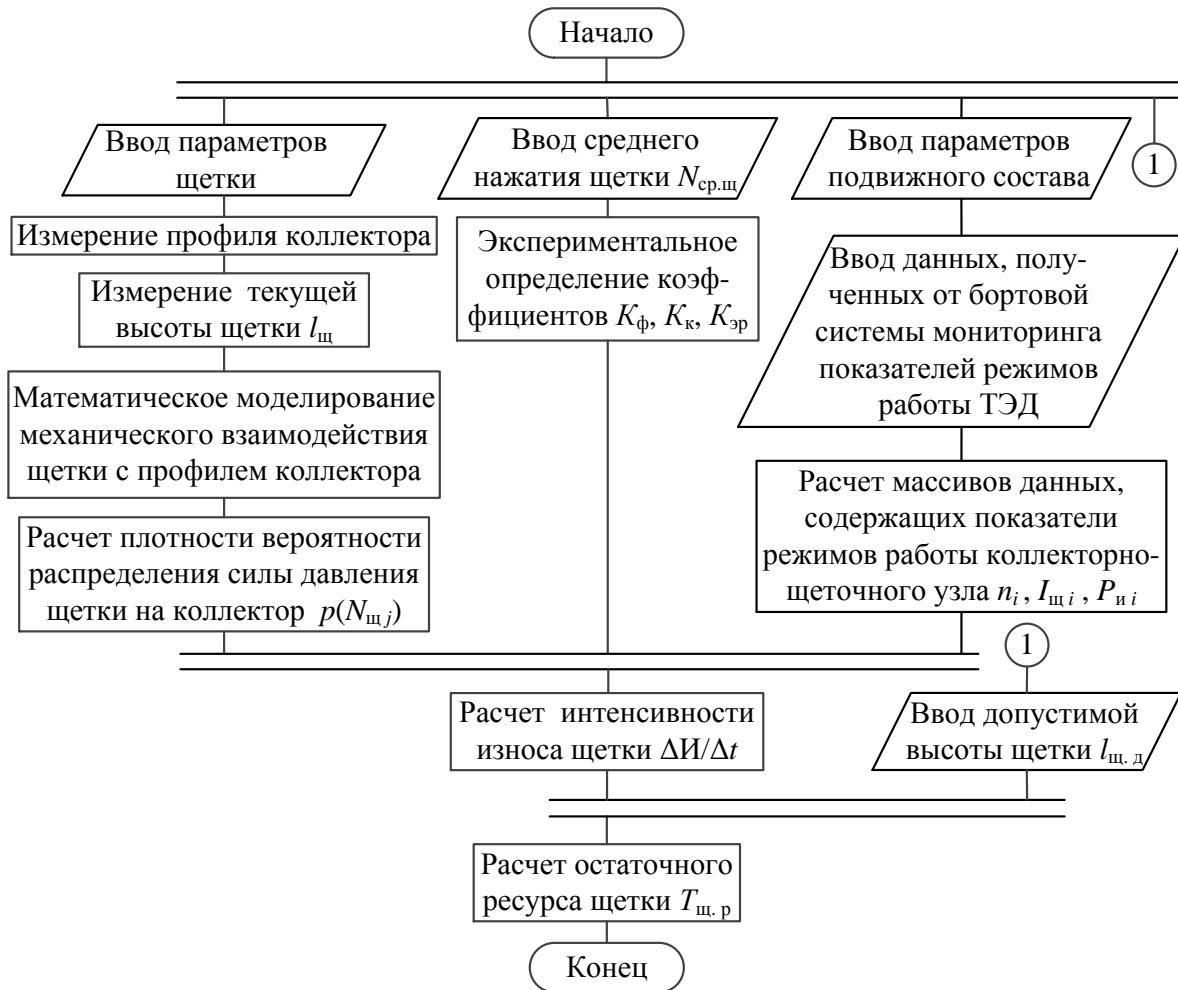


Рис. 7.17. Блок-схема алгоритма прогнозирования остаточного ресурса электрощеток с учетом массивов данных о показателях режимов работы тягового электродвигателя

В соответствии с приведенной диаграммой для расчета остаточного ресурса электрической щетки тягового электродвигателя требуется рассчитать интенсив-

нность износа щетки ( $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ ) как сумму фрикционной ( $\frac{\Delta I_\phi}{\Delta t}$ ), электрокоррозионной ( $\frac{\Delta I_k}{\Delta t}$ ) и электроэрозионной ( $\frac{\Delta I_{ep}}{\Delta t}$ ) составляющих:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta I_\phi}{\Delta t} + \frac{\Delta I_k}{\Delta t} + \frac{\Delta I_{ep}}{\Delta t}. \quad (7.14)$$

Для вычисления составляющих интенсивности износа необходимо выполнить три параллельных процесса [169].

В первом параллельном процессе осуществляется ввод параметров щетки: масса  $m_{щ}$ , высота  $l_{щ}$  и ширина  $b_{щ}$ , которые могут быть известны из технической документации по электродвигателю, либо измерены любыми общеизвестными доступными средствами измерений, имеющими достаточную точность (например, электронные весы и микрометр).

Далее необходимо провести измерение профиля коллектора, т.е. высот коллекторных пластин над произвольно заданным нулевым уровнем, находящемся на некотором расстоянии от оси вращения [80, 96, 254]. Для выполнения этой задачи необходим прибор, позволяющий провести данные измерения (профилометр) [112]. Известно множество приборов данного типа с различными принципами действия, например, прибор контроля профиля коллектора машин постоянного тока [1, 3].

На основании известных параметров щетки и профиля коллектора [226, 248] выполняется математическое моделирование механического взаимодействия щетки с профилем коллектора в соответствии с системой уравнений (7.12) [198]. Математическое моделирование позволяет найти силу давления щетки на коллектор в дискретно заданное множество моментов времени, следующих друг за другом через равные промежутки. В результате может быть получена плотность вероятности распределения силы давления щетки на коллектор  $p(N_{щ,j})$ .

Во втором параллельном процессе осуществляется ввод среднего нажатия щетки  $N_{ср.щ}$  и определяются значения коэффициентов  $K_\phi$ ,  $K_k$ ,  $K_{ep}$ , которые обусловлены параметрами материала щетки и коллектора, и являются постоянными в процессе работы двигателя [18, 19, 43, 102]. Для определения данных коэффициентов проводят три опыта. В первом – измеряется износ за промежуток времени  $\Delta t$ , обусловленный фрикционной составляющей. Во втором – измеряется износ (за тот же промежуток времени), обусловленный как фрикционной, так и электро-

коррозионной составляющей. В третьем – измеряется износ (за тот же промежуток времени), обусловленный всеми его составляющими.

В первом опыте необходимо без тока обеспечить частоту вращения якоря двигателя  $n$  в течение заданного промежутка времени  $\Delta t$  при постоянной величине нажатия на щетки  $N_{\text{ср.щ}}$ . В данном и следующих опытах для контроля значения частоты вращения якоря необходим тахометр, отсчет промежутка времени  $\Delta t$  ввиду его относительно большого значения (порядка десятков часов) может быть произведен, например, с помощью таймера (или обычных бытовых часов), величина нажатия на щетку может быть измерена динамометром. По полученному в опыте значению  $\Delta I_\phi$ , можно определить коэффициент [111]:

$$K_\phi = \frac{n \cdot N_{\text{ср.щ}} \cdot \Delta t}{\Delta I_\phi}. \quad (7.15)$$

Во втором опыте необходимо в течение заданного промежутка времени  $\Delta t$  при неизменных  $N_{\text{ср.щ}}$  и  $n$  обеспечить протекание тока  $I_{\text{щ}}$  по щетке при отсутствии искрения под щетками. По полученному в опыте значению  $(\Delta I_\phi + \Delta I_k)$ , можно определить коэффициент:

$$K_k = \frac{\left( \Delta I_\phi + \Delta I_k \right)}{\Delta t} - K_\phi \cdot n \cdot N_{\text{ср.щ}} \cdot \frac{3}{n^4 \cdot I_{\text{щ}}^2 \cdot N_{\text{ср.щ}}^2}. \quad (7.16)$$

В третьем опыте необходимо при неизменных  $N_{\text{ср.щ}}$  и  $n$  обеспечить протекание тока  $I_{\text{щ}}$  по щетке при искрении под щетками с мощностью  $P_i$ . По полученному в опыте значению  $(\Delta I_\phi + \Delta I_k + \Delta I_{\text{эр}})$ , можно определить коэффициент:

$$K_{\text{эр}} = \frac{\left( \Delta I_\phi + \Delta I_k + \Delta I_{\text{эр}} \right)}{\Delta t} - K_\phi \cdot n \cdot N_{\text{ср.щ}} - K_k \cdot n^{\frac{3}{4}} \cdot I_{\text{щ}}^{\frac{1}{2}} \cdot N_{\text{ср.щ}}^{\frac{1}{2}} \cdot P_i. \quad (7.17)$$

Уровень искрения в третьем опыте задается исследователем путем подпитки или отпитки током добавочных полюсов (что приводит соответственно к усилению или ослаблению их магнитодвижущей силы), к обмотке которых параллельно подключают внешний источник ЭДС (в качестве которого может служить управляемый выпрямитель с возможностью регулирования тока на выходе). При этом необходимо производить объективную оценку мощности искрения  $P_i$  под щетками двигателя (в относительных единицах), для чего может быть использовано, например, устройство для измерения интенсивности искрения на коллекторе электрической машины [3] подвижного состава (количество щеток в щеткодержа-

телях, размеры щеток, число параллельных ветвей обмотки якоря, передаточное число тягового редуктора, диаметр качения колесной пары), а также данных полученных от бортовой системы мониторинга показателей режимов работы ТЭД. Данная система мониторинга должна осуществлять фиксацию текущего времени, токов якоря ТЭД, скорости движения, мощности искрения под щетками (в относительных единицах). Введенные параметры и данные позволяют расчетным путем найти массивы данных, содержащих по  $N_{\text{изм}}$  значений частоты вращения якоря  $n_i$ , тока щетки  $I_{\text{щ}_i}$  и мощности искрения  $P_{\text{и}i}$ , где  $i = 1 \dots N_{\text{изм}}$ .

По имеющимся массивам данных производится расчет трех составляющих интенсивности износа щетки, в котором мощность искрения  $P_{\text{и}}$  принимают равной среднеарифметическому значению массива элементов  $P_{\text{и}i}$ .

Определение электроэрозионной составляющей интенсивности износа щетки осуществляется с учетом плотности распределения давления в контакте  $p(N_{\text{щ}})$ , найденной из математической модели механического взаимодействия щетки с профилем коллектора по выражению (7.13).

Расчет фрикционной составляющей интенсивности износа щетки производится по выражению:

$$\frac{\Delta I_{\phi}}{\Delta t} = K_{\phi} \cdot n \cdot N_{\text{ср.щ}}. \quad (7.18)$$

Расчет электроэрозионной составляющей интенсивности износа щетки производится по выражению:

$$\frac{\Delta I_{\text{эр}}}{\Delta t} = K_{\text{эр}} \cdot n \cdot W_{\text{и}}. \quad (7.19)$$

При расчете электроэрозионной составляющей интенсивности износа щетки в выражение (7.20) необходимо подставить мощность искрения  $P_{\text{и}}$ , измеренную тем же оборудованием и в тех же единицах измерения, как это осуществлено выше при определении  $K_{\text{эр}}$ .

При расчете фрикционной и электроэрозионной составляющих интенсивности износа щетки частоту вращения  $n$  принимают равной среднеарифметическому значению массива элементов  $n_i$ .

Расчет электрокоррозионной составляющей интенсивности износа щетки выполняют по выражению

$$\frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta t} = K_{\kappa} \cdot \frac{1}{N_{\text{изм}}} \cdot \sum_i (n_i^{\frac{3}{4}} \cdot I_{\text{щ}_i}^{\frac{1}{2}}) \cdot \left( \sum_j (N_{\text{щ}_j} \cdot p(N_{\text{щ}_j})) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7.20)$$

Расчет остаточного ресурса работы щетки, выраженного в часах, при усредненных показателях работы ТЭД определяется по выражению (7.11) [172].

Для апробации разработанного способа прогнозирования остаточного ресурса ТЭД выполнены испытания щеток восьми различных производителей, применяемых на локомотивах 2ТЭ116У. С применением данных, полученных из систем мониторинга локомотивов данного типа, по приведенным выше выражениям рассчитаны составляющие износа щеток ( $\Delta I_{\phi}$ ,  $\Delta I_k$ ,  $\Delta I_{ep}$ ), усредненное соотношение которых приведено на рис. 7.18.

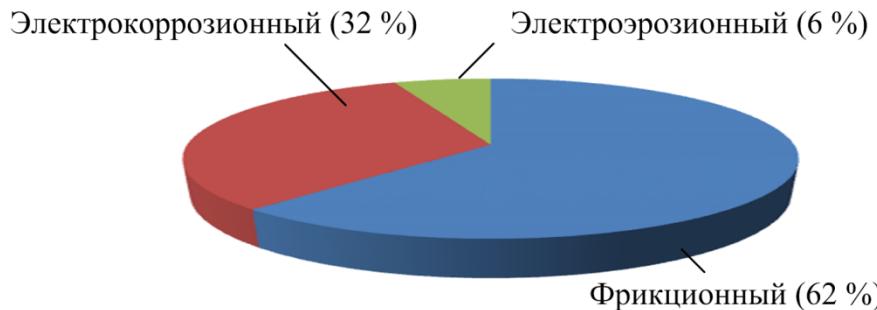


Рис. 7.18. Соотношение составляющих износа электрощеток

Разработанный способ прогнозирования ресурса электрощеток позволяет учесть переменные показатели режимов работы ТЭД в условиях реальной эксплуатации и может быть рекомендован для корректировки регламента обслуживания отдельных ТЭД в части введения дополнительного технического обслуживания в случае малого прогнозного значения остаточного ресурса. Алгоритм данного способа может быть применен в бортовых электронных системах подвижного состава для индикации остаточного ресурса электрощеток.

Применение в процессе прогнозирования массивов данных, полученных бортовой системой мониторинга, позволяет повысить точность определения остаточного ресурса электрощеток [197].

В качестве дальнейших исследований необходимо с целью повышения точности прогнозирования остаточного ресурса электрощеток ТЭД уточнить требуемую периодичность контроля профиля коллектора, обусловленную его изменением в процессе работы.

Тяжелые условия эксплуатации тяговых электродвигателей обуславливают проблемы с состоянием коммутации и, как следствие, приводят к повышенному износу элементов КЦУ [109, 110]. Эксплуатация показывает значительное снижение ресурса щеток по сравнению с существующими требованиями, а также неудовлетворительное состояние коммутации, которое приводит к почернению и повы-

шенному износу каждой четвертой коллекторной пластины (эффект «зебры») [2, 3, 24, 198, 230].

Анализ данных по отказам тяговых электродвигателей ЭДП-800 (см. рис. 7.12) позволяет сделать вывод о том, что причины примерно 60 % отказов связаны с неудовлетворительной коммутацией [2, 3, 24, 198, 218, 257].

На рис. 7.19 приведена часть схемы управления тяговыми электродвигателями ЭДП-800, для плавного регулирования тока возбуждения в схеме использованы тиристоры.

Установленная система мониторинга позволяет фиксировать ток якоря (силовой цепи), протекающий по шунту  $RS1$ , и ток в цепи ослабления возбуждения, протекающий по шунту  $RS2$ , подключаемой параллельно цепи возбуждения.

Для анализа режимов работы машины определен ток возбуждения путем вычитания из тока якорной цепи тока цепи ослабления возбуждения.

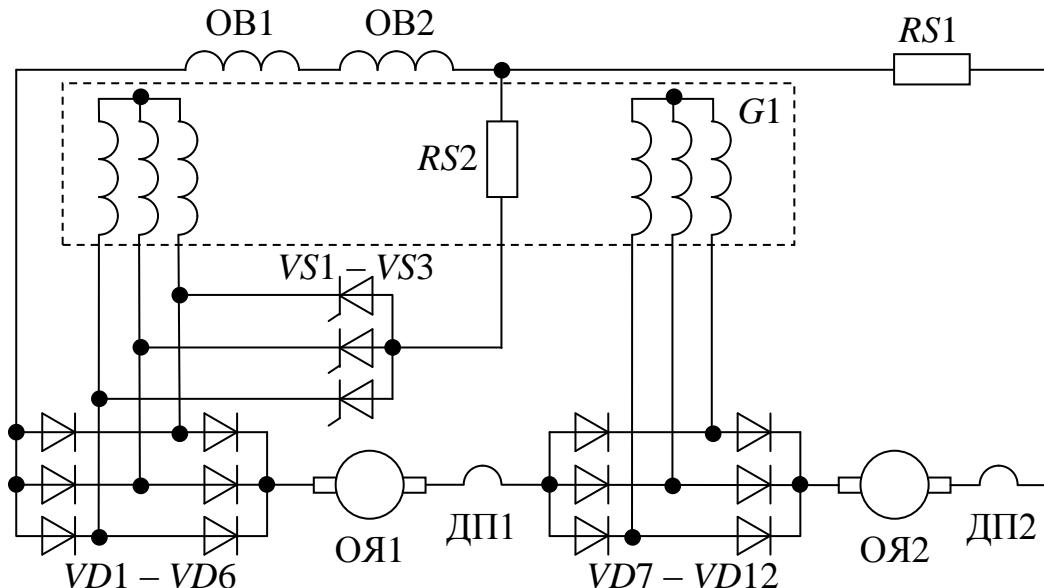


Рис. 7.19. Часть схемы автоматического плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей ЭДП-800

Коэффициент пульсации тока определен как отношение наибольшего значения переменной составляющей пульсирующего тока к его среднему значению:

$$k_{\text{п}} = \frac{I_{\text{пул}}}{I_{\text{ср}}}, \quad (7.21)$$

где  $I_{\text{пул}}$  – наибольшее значение переменной составляющей пульсирующего тока, А;

$I_{\text{ср}}$  – среднее значение тока якоря, А:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{N}, \quad (7.22)$$

где  $N$  – количество измеренных значений тока за 0,1 секунды ( $N = 10$ ).

По данным системы мониторинга значение тока силовой цепи и тока цепи ослабления поля фиксировались 100 раз в секунду. Расчет коэффициента пульсации тока был выполнен для интервала времени 0,1 секунды, т.е. было определено среднее значение по данным десяти измерений  $I_{\text{ср}}$ , наибольшее значение переменной составляющей пульсирующего тока было рассчитано по выражению:

$$I_{\text{пул}} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2}, \quad (7.23)$$

где  $I_{\max}$  – максимальное значение тока на рассматриваемом интервале времени, А;

$I_{\min}$  – минимальное значение тока на рассматриваемом интервале времени, А.

Тяговый электродвигатель ЭДП-800 карьерного самосвала БелАЗ работает в режиме двигателя с полным возбуждением и ослаблением поля, которое реализуется с использованием тиристорного преобразователя, шунтирующего обмотку возбуждения, а также в режиме электрического торможения. Следовательно, для установления причин неудовлетворительной коммутации необходимо анализировать работу тягового двигателя с учетом всех режимов работы. На круговой диаграмме (рис. 7.20) приведено процентное соотношение длительности режимов работы тягового электродвигателя ЭДП-800 по данным системы мониторинга самосвала БелАЗ.

В результате анализа данных системы мониторинга (рис. 7.21) установлено, что тяговый электродвигатель ЭДП-800 36% времени в рассматриваемом интервале работает с полным возбуждением, 56% – с ослаблением возбуждения, 8% – в режиме динамического торможения.

Изменение коэффициента пульсации тока силовой цепи и тока возбуждения во времени приведено на рис. 7.21 и 7.22 соответственно. Необходимо отметить, что из-за особенности схемы подключения датчиков тока системы мониторинга ток возбуждения в режиме динамического торможения (см. рис. 7.22) не фиксировался.

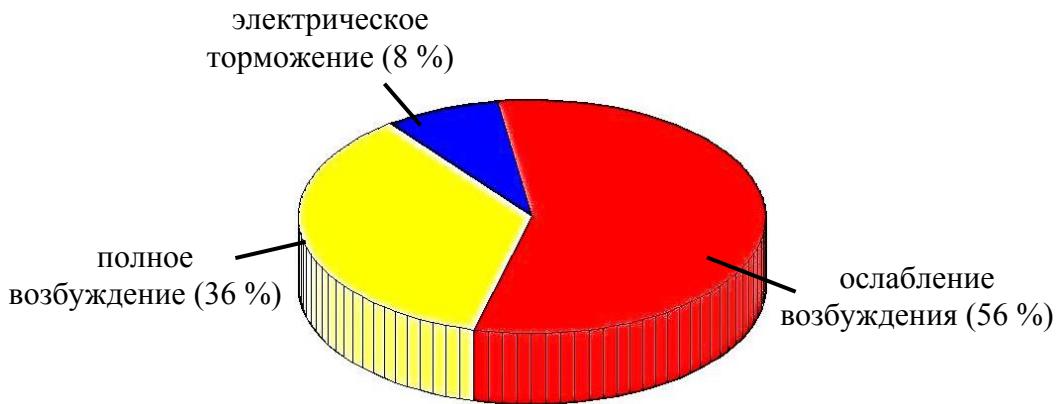


Рис.7.20. Соотношение длительности применения режимов работы тягового электродвигателя ЭДП-800 в эксплуатации

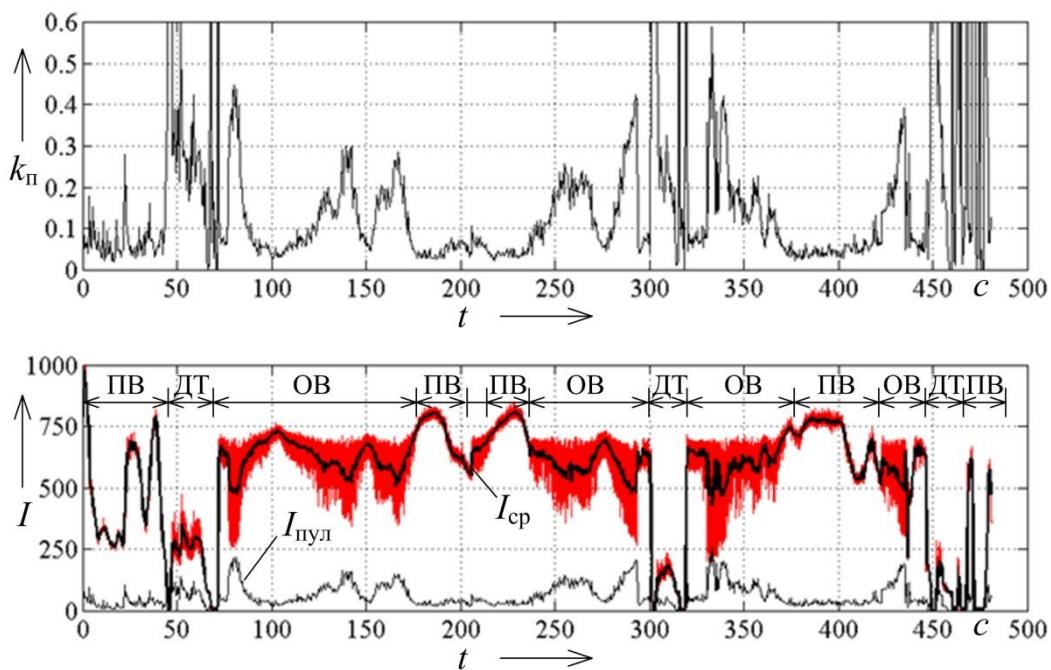


Рис. 7.21. Временные диаграммы электродвигателя: коэффициент пульсации тока силовой цепи; среднее значение тока силовой цепи ( $I_{cp}$ ) и наибольшее значение переменной составляющей тока силовой цепи ( $I_{пул}$ )

При полном возбуждении пусковой ток ТЭД составил 987 А, частота вращения якоря в среднем равна 676 об/мин и короткие интервалы времени (10–20 с) достигала 1300–1400 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 900 до 1000 В. В этом режиме коэффициент пульсации тока якоря и тока возбуждения изменялся в диапазоне 0,05–0,4 (см. рис. 7.21 и 7.22), превышая этот диапазон кратковременно при переходе в режим ослабления поля или электрического торможения (до 0,8).

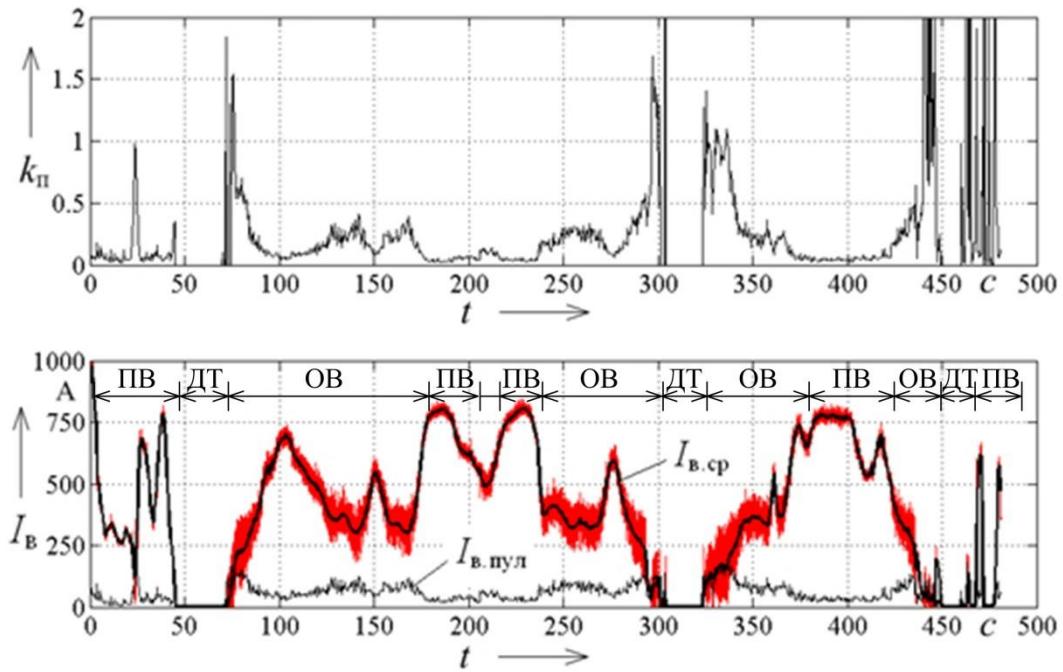


Рис. 7.22. Временные диаграммы электродвигателя: коэффициент пульсации тока возбуждения; среднее значение тока возбуждения ( $I_{\text{в.ср}}$ ) и наибольшее значение переменной составляющей тока возбуждения ( $I_{\text{в.пул}}$ )

При ослаблении возбуждения ток силовой цепи изменялся от 200 до 780 А, ток возбуждения изменялся от 10 до 780 А, частота вращения якоря в среднем составила 932 об/мин, короткие интервалы времени (10–20 секунд) достигала 1500 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 950 до 1000 В. В этом режиме коэффициент ослабления поля в среднем составил 0,75.

При ослаблении поля имеют место значительные пульсации тока возбуждения (см. рис. 7.22), значение коэффициента пульсации изменяется в диапазоне 0,3–1,0 (на некоторых кратковременных интервалах времени даже превышая значение 1,0), что является причиной пульсации основного магнитного потока и поля якорной обмотки и оказывает негативное воздействие на коммутацию [2, 3, 24, 198, 225].

Причиной значительных пульсаций тока возбуждения при ослаблении поля является способ его реализации. Силовая часть схемы автоматического плавного регулирования тока возбуждения (см. рис. 7.26) представляет собой трехфазный нулевой управляемый выпрямитель на тиристорах VS1 – VS3, образуя при включении тиристоров цепь, шунтирующую обмотки возбуждения ОВ1 и ОВ2 двигателей с обмотками якоря ОЯ1 и ОЯ2 соответственно. Силовая цепь двигателей питается от двух трехфазных мостовых схем выпрямления ( $VD1 - VD6$  и  $VD7 - VD12$ ), подключенных к обмоткам статора тягового генератора  $G1$ . Относитель-

ная продолжительность включенного состояния тиристоров определяет соотношение между значениями тока возбуждения ТЭД и тока якоря, т. е. коэффициент регулирования возбуждения. Изменение этого коэффициента производится посредством регулирования угла управления тиристоров.

В режиме динамического торможения ток силовой цепи изменялся от 60 до 410 А. Частота вращения якоря изменялась в диапазоне от 1350 до 670 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 10 до 920 В.

Как показали коммутационные испытания, проведенные в стационарном режиме работы тяговые электродвигатели ЭДП-800 имеют достаточно широкую зону безыскровой работы при «гладком» питании [146]. Однако такие условия не соответствуют реальным условиям эксплуатации двигателя, работающего большую часть времени в переходных нестационарных режимах с пульсирующими токами якоря и возбуждения.

Как известно, на коммутацию в коллекторно-щеточном узле машины постоянного тока оказывают влияние в различной степени множество факторов: вибрация, климатические факторы, режимы работы машины, работа системы управления [2, 24, 198]. В процессе анализа работы системы управления и стендовых испытаний было установлено, что из-за особенностей работы системы управления и режимов работы машины на процесс коммутации значительное влияние оказывают два фактора:

1) насыщение магнитной цепи, по которой замыкается поток ДП, при больших значениях тока возбуждения приводит к сложности настройки безыскровых зон для различных режимов работы электродвигателей, особенно соответствующих различной степени ослабления возбуждения (при полном возбуждении зона безыскровой работы «лежит» выше, чем при ослабленном);

2) при ослаблении возбуждения в машине наблюдается усиление пульсаций, как тока возбуждения, так и тока якоря, что приводит к значительному усилинию вихревых токов в массивных элементах магнитопровода, и, как следствие, сдвигу фазы переменной составляющей потока ДП (которая оказывается не в противофазе к потоку реакции якоря), что, в свою очередь, ухудшает коммутационную устойчивость электродвигателей.

Исследования, проведенные с электродвигателями типа ЭДП-800, позволили разработать следующий метод их настройки, позволяющий минимизировать износ электрических щеток.

Данный метод условно можно разделить на три этапа.

Первый этап состоит в проведении коммутационных испытаний на тяговом электродвигателе и определении зависимостей интенсивности искрения щеток от магнитодвижущей силы (МДС), определяемой током подпитки/отпитки, добавочных полюсов в различных режимах работы, соответствующих реальной эксплуатации:  $W_{и1}(F)$ ,  $W_{и2}(F)$ , ...,  $W_{иN}(F)$  [15].

При этом заранее должна быть определена функциональная зависимость МДС добавочных полюсов  $F$  от толщины немагнитных прокладок  $\delta_{ДП}$  [2, 24, 198].

На втором этапе формируется целевая функция износа электрических щеток, обусловленного фрикционной, электрокоррозионной и электроэрозионной составляющей и зависит от параметров режима работы двигателя, в следующем виде:

$$\Delta И(F) = (n \cdot P_{ср.щ}) \cdot K_{\phi} + (n^{\frac{3}{4}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot P_{ср.щ}^{\frac{1}{2}}) \cdot K_{эк} + n \cdot W_{и1}(F) \cdot K_{эр} \cdot \Delta t_1^* + \\ + n \cdot W_{и2}(F) \cdot K_{эр} \cdot \Delta t_2^* + \dots + n \cdot W_{иN}(F) \cdot K_{эр} \cdot \Delta t_N^*, \quad (7.24)$$

где  $\Delta t_1^*$ ,  $\Delta t_2^*$ ,  $\Delta t_N^*$  – относительные продолжительности работы в различных режимах;

$n$  – частота вращения вала машины, об/мин;

$I$  – ток щетки, А;

$P_{ср.щ}$  – средняя сила нажатия щетки на поверхность коллектора;

$K_{\phi}$ ,  $K_{эк}$ ,  $K_{эр}$  – коэффициенты фрикционного, электрокоррозионного и электроэрозионного износа соответственно.

И далее известными методами [76, 184] решается оптимизационная задача по нахождению  $F_{опт}$ , соответствующего глобальному минимуму функции износа:

$$\Delta И(F) \rightarrow \min. \quad (7.25)$$

Решением оптимизационной задачи является значение  $F_{опт}$ , соответствующее минимальному значению износа.

Ввиду того, что средняя величина давления на щетку  $P_{ср.щ}$  определяется по известным методикам и рекомендациям, сила тока  $I$  и частота вращения  $n$  являются параметрами режима работы, а функцией искрения является только электроэрозионная составляющая износа, целевая функция поставленной оптимизационной задачи может быть упрощена до следующего вида:

$$\Delta I(F) = W_{i1}(F) \cdot \Delta t_1^* + W_{i2}(F) \cdot \Delta t_2^* + \dots + W_{iN}(F) \cdot \Delta t_N^*. \quad (7.26)$$

На третьем этапе по полученной зависимости  $F(\delta_{\text{ДП}})$  и найденному решению оптимационной задачи  $F_{\text{опт}}$  определяется необходимая толщина немагнитных прокладок  $\delta_{\text{ДП опт}}$ , которой соответствует минимальный износ щеток.

### 7.2.3. Экспериментальная проверка предложенных решений по определению остаточного ресурса электрических щеток

Для экспериментальной проверки предложенных решений по прогнозированию остаточного ресурса электрических щеток выполнена оценка адекватности математической модели изнашивания щеток путем сопоставления данных, полученных в результате экспериментальных исследований (лабораторного и полевого) с результатами математического моделирования износа.

Для оценки адекватности предложенной математической модели изнашивания щеток тяговых двигателей постоянного тока использован непараметрический критерий Вилкоксона, который служит для проверки гипотезы о том, относятся ли две независимые выборки (результаты экспериментальных исследований и результаты расчета с использованием модели) к одной генеральной совокупности.

При использовании критерия Вилкоксона рассматриваются две гипотезы:

1) гипотеза  $H_0$  (различия выборок не являются статистически достоверными и носят случайный характер);

2) гипотеза  $H_1$  (различия выборок являются статистически достоверными).

Истинность гипотезы  $H_0$  свидетельствует о статистическом совпадении результатов, полученных путем математического моделирования, и результатов эксперимента, т. е. об адекватности математической модели.

Если гипотеза  $H_0$  верна, то  $u$  (полное число инверсий значений выборок) не должно значительно отклоняться от своего математического ожидания:

$$Mu = \frac{n_1 n_2}{2}, \quad (7.27)$$

где  $n_1, n_2$  – объемы первой (модель) и второй (эксперимент) исследуемых выборок.

Гипотезу  $H_0$  следует принять, если выполняется условие:

$$|u - Mu| \leq u_{\alpha_{kp}}, \quad (7.28)$$

где  $i_{\alpha, \text{кр}}$  – критическое значение критерия для заданного уровня значимости  $\alpha$ .

В рамках выполненного лабораторного эксперимента испытуемые щетки устанавливались на машину, работающую в режиме двигателя. Перед испытанием проводилась притирка щеток в течение 20 часов – до появления зеркальной контактной поверхности.

Для определения коэффициентов математической модели  $K_{\phi}$ ,  $K_k$ ,  $K_{\varphi p}$  измерение интенсивности износа электрощеток произведено методом гранулометрического анализа пылевидных продуктов износа [17, 242].

Захват порошковых продуктов износа осуществлен путем втягивания запыленного воздуха через металлическую трубку, внутри которой находится предметное стекло с нанесенным на него слоем жидкого масла. Захват запыленного воздуха осуществлен в течение 20 минут, после чего предметные стекла были извлечены и произведена их фотосъемка с применением микроскопа. Полученные изображения переведены в растровый черно-белый формат. На них определены границы черных пылевидных частиц и подсчитан суммарный объем данных частиц, по которому найдена интенсивность износа щетки [258].

Результаты экспериментальных исследований и моделирования износа щеток для машин постоянного тока типов 2ПН и ПЗ1М приведены в табл. 7.1 и 7.2 соответственно.

Таблица 7.1

## Результаты опытных и расчетных значений интенсивности износа щеток (мкм / 20 мин) машины постоянного тока типа 2ПН

Таблица 7.2

Результаты опытных и расчетных значений интенсивности износа  
щеток (мкм / 20 мин) машины постоянного тока типа ПЗ1М

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Опыт	4,72	4,07	4,33	3,18	3,04	2,39	2,76	2,00	3,43	2,78	1,61
Расчет	4,09	3,32	3,55	2,88	3,85	3,11	3,33	2,69	3,55	2,88	3,00
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Опыт	1,26	4,35	3,70	2,53	1,88	3,38	2,08	3,98	2,17	3,40	2,63
Расчет	2,44	3,31	2,68	2,79	2,26	2,38	1,50	2,63	1,58	3,31	2,86
№	23	24	25	26	27	28	29	30	31	—	—
Опыт	2,92	1,91	3,20	3,18	3,02	3,10	3,18	3,02	3,09	—	—
Расчет	3,61	2,63	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	—	—

Выполним анализ результатов эксперимента и моделирования для двигателей типа 2ПН и ПЗ1М с использованием критерия Вилкоксона.

Число инверсий значений величин полученных экспериментально и расчетным путем для уровня значимости равного 0,05:

- для данных в табл. 7.1  $u = 466$ ;  $Mu = 480,5$ ;  $u_{\alpha, \text{кр}} = 139$ ;
- для данных в табл. 7.2  $u = 484$ ;  $Mu = 480,5$ ;  $u_{\alpha, \text{кр}} = 139$ .

Условие (7.28) выполняется для экспериментальных исследований и моделирования износа щеток для машины типа 2ПН ( $480,5 - 466 = 14,5 \leq u_{\alpha, \text{кр}}$ ) и для машины типа ПЗ1М ( $484 - 480,5 = 3,5 \leq u_{\alpha, \text{кр}}$ ), следовательно, гипотезу  $H_0$  не следует отвергать для первой и второй машины [206, 228]. Таким образом, результаты моделирования и результаты экспериментов с вероятностью 0,95 значимо не отличаются, что свидетельствует об адекватности математической модели.

Вторая проверка адекватности математической модели изнашивания щеток проведена путем сопоставления результатов расчета с данными полевого эксперимента.

В течение 12 месяцев с участием сотрудников ремонтных локомотивных депо осуществлены снятия показаний по износу электрощеток, эксплуатируемых на тяговых двигателях ЭД-133 тепловозов 2ТЭ116У. За время эксперимента пробег локомотивов составил 90 – 135 тыс. км.

Значения износа щеток типа ЭГ61, ЭГ77 и ЭГ5020, применяемых на ТЭД типа ЭД-133 тепловозов, полученные путем математического моделирования и в результате экспериментальных исследований, приведены на рис. 7.23 [81].

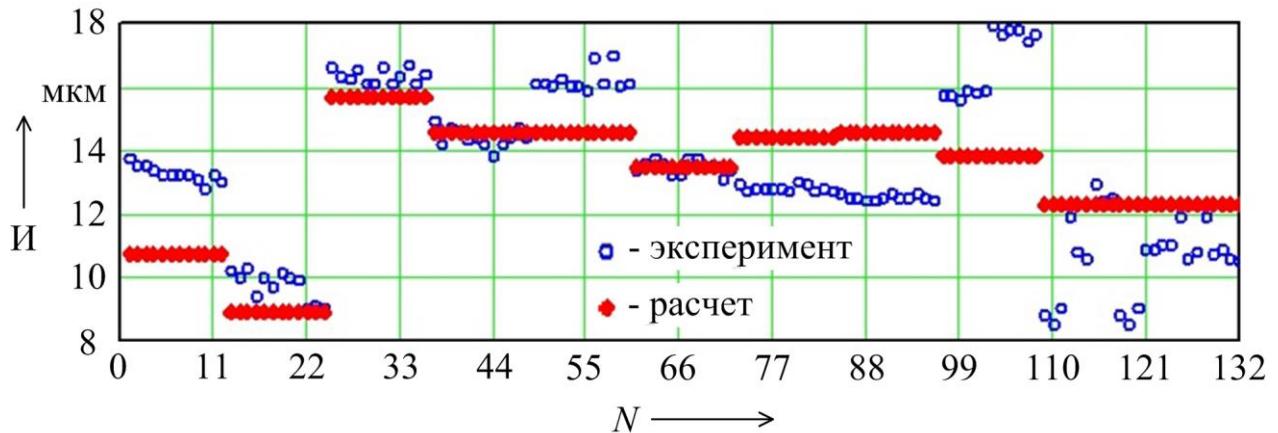


Рис. 7.23. Значения износа щеток ТЭД типа ЭД-133

На рис. 7.24 приведены значения абсолютных погрешностей износа щеток, определенные как разность значений рассчитанных с использованием математической модели и определенных в результате экспериментальных измерений.

Гистограмма относительных частот абсолютных погрешностей износа щеток и соответствующая ей кривая теоретического нормального распределения представлены на рис. 7.25.

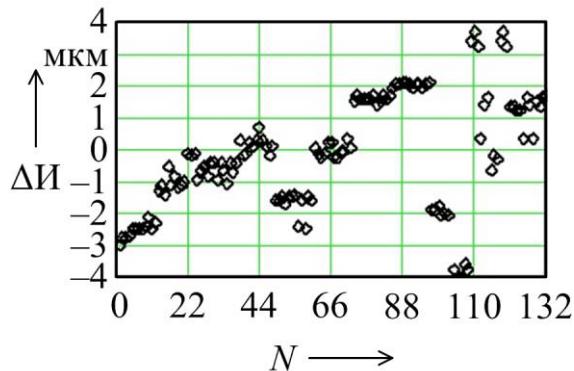


Рис. 7.24. Значения абсолютных погрешностей износа щеток

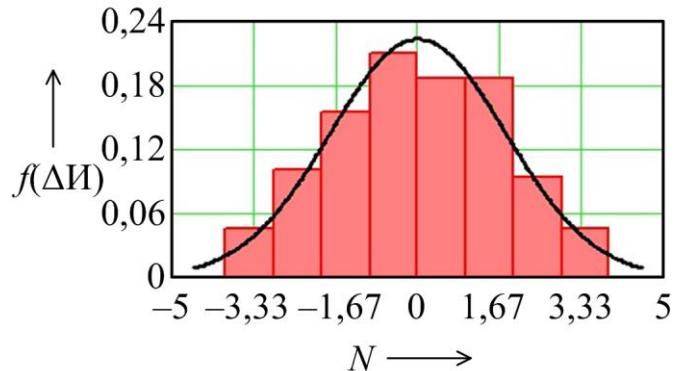


Рис. 7.25. Гистограмма относительных частот и теоретический нормальный закон распределения ( $\mu = 0$  и  $\sigma = 1,8$ )

Количество интервалов равное восьми получено для приведенной гистограммы с использованием правила Стерджеса при выборке из 132 элементов. Для построения теоретических кривых рассчитана выборочная средняя  $\mu = -0,05 \approx 0$  и выборочное стандартное отклонение  $\sigma = 1,8$ .

Проверку гипотезы о соответствии эмпирического распределения нормальному закону выполним с использованием критерия Пирсона. Расчет эмпирических и теоретических частот для определения наблюдаемого значения критерия Пирсона  $\chi_{\text{набл}}$  приведен в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Расчет эмпирических и теоретических частот для определения значения критерия Пирсона  $\chi_{\text{набл}}$

№	Границы интервалов		Эмпирическая частота ( $n_i$ )	Теоретическая частота ( $n'_i$ )	$(n_i - n'_i)^2 / n'_i$
1	-3,930	-2,954	6	3,949	1,065
2	-2,954	-1,977	13	9,984	0,911
3	-1,977	-1,000	20	18,852	0,070
4	-1,000	-0,025	27	26,59	0,006
5	-0,025	0,951	24	28,017	0,576
6	0,951	1,928	24	22,053	0,172
7	1,928	2,904	12	12,967	0,072
8	2,904	3,880	6	5,695	0,016

По данным табл. 7.3 наблюдаемое значение критерия Пирсона  $\chi_{\text{набл}}$  равно 2,89. При числе степеней свободы равном 5 и уровне значимости 0,05 табличное критическое значение критерия Пирсона  $\chi_{\text{кр}}$  составляет 11,07 [16]. Следовательно, с вероятностью 0,95 можно принять гипотезу о нормальном распределении абсолютных погрешностей модели.

По известному закону распределения абсолютных погрешностей модели и известным значениям параметров закона распределения можно определить доверительные интервалы для рассчитанных с использованием предложенной модели, значений износа щеток тяговых двигателей постоянного тока.

Для определения доверительного интервала, в котором находится истинное значение износа щетки  $I \pm \Delta$ , нужно определить точность оценки  $\Delta$  при заданном уровне значимости  $\alpha$ .

Вероятностный закон распределения абсолютных погрешностей модели соответствует нормальному закону распределения, поэтому величину интервала  $\Delta$  можно определить с использованием интеграла Лапласа:

$$P(-\Delta < I < +\Delta) = \Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right) - \Phi\left(-\frac{\Delta}{\sigma}\right) = 1 - \alpha, \quad (7.29)$$

где  $I$  – износ щетки, рассчитанный с использованием математической модели;

$\Phi(x)$  – интеграл Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (7.30)$$

Точность оценки износа щетки для различных заданных значений уровня значимости  $\alpha$ , приведена в табл. 7.4.

Таблица 7.4

## Значения точности оценки износа щетки

Уровень значимости $\alpha$	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20
Точность оценки износа $\Delta$ , мкм	4,14	3,50	2,90	2,57	2,29

Таким образом, с использованием данных табл. 7.4 можно определить доверительные интервалы износа щетки. Например, значение износа щетки находится в диапазоне  $\pm 2,9$  мкм от величины износа рассчитанного с применением предложенной математической модели с уровнем доверия 0,9.

Сопоставление результатов лабораторных измерений износа щеток, с результатами расчетов в соответствии с критерием Вилкоксона показали адекватность математической модели.

Статистическая обработка результатов полевого эксперимента и расчетов показала, что абсолютные погрешности математической модели изнашивания щеток имеют нормальное распределение, что позволяет оценить точность моделирования при заданном уровне значимости.

Полученные результаты доказывают возможность применения математической модели изнашивания электрощеток для прогнозирования остаточного ресурса щеток с заданной точностью. Это может быть применено в бортовых системах мониторинга технического состояния подвижного состава, которые должны быть связаны с действующими бортовыми системами, осуществляющими мониторинг за режимами работы тяговых электродвигателей. Данные о режимах работы ТЭД являются входными данными для расчета прогноза остаточного ресурса щеток, на основании которого в определенных случаях должно приниматься решение о внеплановом техническом обслуживании для проверки текущего износа щеток и их замены при необходимости. При этом эксплуатирующая организация должна сама определить значение вероятности критического износа, при котором необходимо осуществить внеплановое техническое обслуживание. Измеренные значения текущего износа щеток могут служить данными для расчета возможного пробега подвижного состава до момента появления установленной вероятности критического износа.

### 7.3. Расчет экономической эффективности предложенных разработок

С целью осуществления оценки экономической эффективности предложенных разработок выполним расчет чистого дисконтированного дохода (ЧДД), индекса рентабельности инвестиций (индекс доходности) и срока окупаемости при

внедрении электротехнического комплекса, предназначенного для испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки. Расчет выполним исходя из того, что испытания проводятся с двигателями типа ДАТ350-6 УХЛ1 (тепловоза 2ТЭ25А) номинальной мощностью  $P_n = 35$  кВт, применен тип схемы испытаний – с нагрузочной асинхронной машиной и двумя преобразователями частоты. Испытания проводятся в среднем два раза в рабочий день. Количество рабочих дней в году примем равным 247.

Чистый дисконтированный доход (чистая приведенная стоимость) может быть найдена по выражению, руб.:

$$NPV = -IC + \sum_{t_{\text{л}}=1}^{N_{\text{л}}} \left( \frac{CF_{t_{\text{л}}}}{(1+i)^{t_{\text{л}}}} \right), \quad (7.31)$$

где  $IC$  – начальные инвестиции, руб.;

$CF$  – поток платежей, руб.;

$t_{\text{л}}$  – номер года платежа (номер года начала инвестиций  $t_{\text{л}} = 0$ );

$i$  – ставка дисконтирования ( $i = 0,1$ ),

$N_{\text{л}}$  – длительность расчетного периода, лет.

При расчете необходимых начальных инвестиций учтем стоимость разработки проекта, монтажа и необходимого оборудования ЭТК. Тогда стоимость инвестиций, руб.:

$$IC = P + M + CO, \quad (7.32)$$

где  $P$  – стоимость разработки электротехнического комплекса, руб.;

$M$  – стоимость монтажа, руб.;

$CO$  – стоимость оборудования, руб.

При расчете стоимости разработки учтем работу программиста по написанию и отладке программного обеспечения и работу инженера по составлению подбору оборудования, составлению монтажных схем, инструкции по эксплуатации и т.п. Тогда стоимость разработки можно рассчитать по выражению, руб.:

$$P = \Pi + IP, \quad (7.33)$$

где  $\Pi$  – полная оплата программисту, руб.;

$IP$  – полная оплата инженеру-разработчику, руб.

Оплата труда программиста, руб.:

$$\Pi = K_{\text{нак}} 3\Pi_{\text{п}} \frac{12D_{\text{п}}}{N_{\text{д.р}}} (1 + K_{\text{н.в}}), \quad (7.33)$$

где  $K_{\text{нак}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы, составляющие 15 % от прямых затрат,  $K_{\text{нак}} = 1,15$ ;

$3\Pi_{\text{п}}$  – месячная зарплата программиста,  $3\Pi_{\text{п}} = 91000$  руб.;

$D_{\text{п}}$  – количество рабочих дней, необходимых программисту для разработки программного обеспечения ( $D_{\text{п}} = 40$ );

$N_{\text{д.р}}$  – количество рабочих дней в году ( $N_{\text{д.р}} = 247$ );

$K_{\text{н.в}}$  – коэффициент, учитывающий налоги (13 %) и взносы (30 %), уплачиваемые государству,  $K_{\text{н.в}} = 0,43$ .

$$\Pi = 1,15 \cdot 91000 \frac{12 \cdot 40}{247} (1 + 0,43) = 290816,84.$$

Оплата труда инженера-разработчика, руб.:

$$ИР = K_{\text{нак}} 3\Pi_{\text{и.р}} \frac{12D_{\text{и.р}}}{N_{\text{д.р}}} (1 + K_{\text{н.в}}), \quad (7.34)$$

где  $3\Pi_{\text{и.р}}$  – месячная зарплата инженера-разработчика,  $3\Pi_{\text{и.р}} = 32000$  руб.;

$D_{\text{и.р}}$  – количество рабочих дней, необходимых инженеру-разработчику для создания проекта ЭТК ( $D_{\text{и.р}} = 10$ ).

$$ИР = 1,15 \cdot 32000 \frac{12 \cdot 10}{247} (1 + 0,43) = 25566,32.$$

$$P = 290816,84 + 25566,32 = 316383,16.$$

Стоимость монтажа, руб.:

$$M = K_{\text{нак}} N_{\text{м}} 3\Pi_{\text{м}} \frac{12D_{\text{м}}}{N_{\text{д.р}}} (1 + K_{\text{н.в}}), \quad (7.35)$$

где  $N_{\text{м}}$  – необходимое количество монтажников ( $N_{\text{м}} = 2$ );

$3\Pi_{\text{м}}$  – месячная зарплата монтажников,  $3\Pi_{\text{м}} = 23000$  руб.;

$D_{\text{м}}$  – количество рабочих дней необходимых для монтажа ЭТК ( $D_{\text{м}} = 5$ ).

$$M = 1,15 \cdot 2 \cdot 23000 \frac{12 \cdot 5}{247} (1 + 0,43) = 18375,79.$$

Стоимость оборудования, руб.:

$$CO = 2C_{\text{п.ч}} + C_{\text{ком}} + C_{\text{д}} + C_{\text{т}} + C_{\text{э.к}} + C_{\text{каб}},$$

где  $C_{\text{п.ч}}$  – стоимость преобразователя частоты,  $C_{\text{п.ч}} = 690000$  руб.;

$C_{\text{ком}}$  – стоимость коммутационного оборудования,  $C_{\text{ком}} = 150000$  руб.;

$C_{\text{д}}$  – стоимость датчиков,  $C_{\text{д}} = 100000$  руб.;

$C_{\text{т}}$  – стоимость трансформатора,  $C_{\text{т}} = 350000$  руб.;

$C_{\text{э.к}}$  – стоимость электронных компонентов,  $C_{\text{э.к}} = 100000$  руб.;

$C_{\text{каб}}$  – стоимость кабелей и др.,  $C_{\text{каб}} = 30000$  руб.

$$CO = 2 \cdot 690000 + 200000 + 100000 + 400000 + 30000 = 2110000.$$

С учетом выполненных расчетов, начальные инвестиции равны:

$$IC = 316383,16 + 18375,79 + 2110000 = 2444758,95.$$

Экономический эффект от внедрения ЭТК за каждый год (для  $t_{\text{л}}$  равного от 1 до  $N_{\text{л}}$ ), руб.:

$$CF_{t_{\text{л}}} = K_{\text{э}} N_{\text{и.д}} \Pi_{\text{э}} T_{\text{и}} N_{\text{д.р}} P_{\text{н}}, \quad (7.36)$$

где  $K_{\text{э}}$  – коэффициент экономичности для испытуемых ТЭД ( $K_{\text{э}} = 0,85$ , определен по рис. 3.5);

$N_{\text{и.д}}$  – количество испытаний ТЭД в день ( $N_{\text{и.д}} = 2$ );

$\Pi_{\text{э}}$  – цена электроэнергии,  $\Pi_{\text{э}} = 5,5$  руб/(кВт·ч);

$T_{\text{и}}$  – длительность испытаний одного ТЭД,  $T_{\text{и}} = 1$  ч;

$P_{\text{н}}$  – номинальная мощность ТЭД типа ДАТ350-6 УХЛ1 тепловоза 2ТЭ25А,

$P_{\text{н}} = 350$  кВт.

$$CF_{t_{\text{л}}} = 0,85 \cdot 2 \cdot 5,5 \cdot 1 \cdot 247 \cdot 350 = 808307,50.$$

Рассчитаем ЧДД при внедрении ЭТК за  $N_{\text{л}} = 10$  лет.

$$NPV = -2444758,95 + \sum_{t_{\text{л}}=1}^{10} \left( \frac{808307,50}{(1+0,1)^{t_{\text{л}}}} \right) = 2521940,73.$$

Индекс рентабельности инвестиций (индекс доходности):

$$PI = \frac{1}{IC} \sum_{t_{\text{л}}=1}^{N_{\text{л}}} \left( \frac{CF_{t_{\text{л}}}}{(1+i)^{t_{\text{л}}}} \right), \quad (7.37)$$

$$PI = \frac{1}{2444758,95} \cdot \sum_{t_{\text{л}}=1}^{10} \left( \frac{808307,50}{(1+0,1)^{t_{\text{л}}}} \right) = 2,032.$$

Рассчитаем ЧДД, который может быть получен при применении разработанного способа снижения потерь, косвенного измерения мощности, с учетом экономии за счет применения цеховой сети для питания ЭТК для испытания электрических машин. Разработанный способ снижения потерь может позволить повысить коэффициент  $K_s$  приближенно на 1 %. Учтем также, что упрощение структуры ЭТК за счет интеграции схем взаимной нагрузки для испытаний асинхронных машин со схемами для испытаний машин постоянного тока позволяет вдвое снизить количество дней работы программиста. Применение косвенного измерения мощности позволяет снизить стоимость датчиков тока и напряжения (за счет уменьшения их количества и стоимости).

С учетом применения указанных разработок:

$$\Pi' = 1,15 \cdot 91000 \frac{12 \cdot 20}{247} (1 + 0,43) = 145408,42;$$

$$P' = 145408,42 + 25566,32 = 170974,74;$$

$$IC' = 170974,74 + 18375,79 + 2110000 = 1849350,53;$$

$$K_s' = 0,85 \cdot 1,01 = 0,858;$$

$$C_d' = 0,5 \cdot 100000 = 50000;$$

$$CO' = 2 \cdot 690000 + 200000 + 50000 + 400000 = 1660000;$$

$$CF'_{t_{\text{л}}} = 0,858 \cdot 2 \cdot 5,5 \cdot 1 \cdot 247 \cdot 350 = 816390,57;$$

$$NPV' = -1849350,53 + \sum_{t_{\text{л}}=1}^{10} \left( \frac{816390,57}{(1+0,1)^{t_{\text{л}}}} \right) = 3167016,15;$$

$$PI' = \frac{1}{11849350,53} \cdot \sum_{t_{\text{л}}=1}^{10} \left( \frac{816390,57}{(1+0,1)^{t_{\text{л}}}} \right) = 2,713.$$

Таким образом, применение предложенных разработок позволяет в значительной степени повысить чистый дисконтированный доход и индекс рентабельности при внедрении электротехнического комплекса, предназначенного для испытания электрических машин.

График чистого дисконтируированного дохода с учетом предложенных разработок приведен на рис. 7.26.

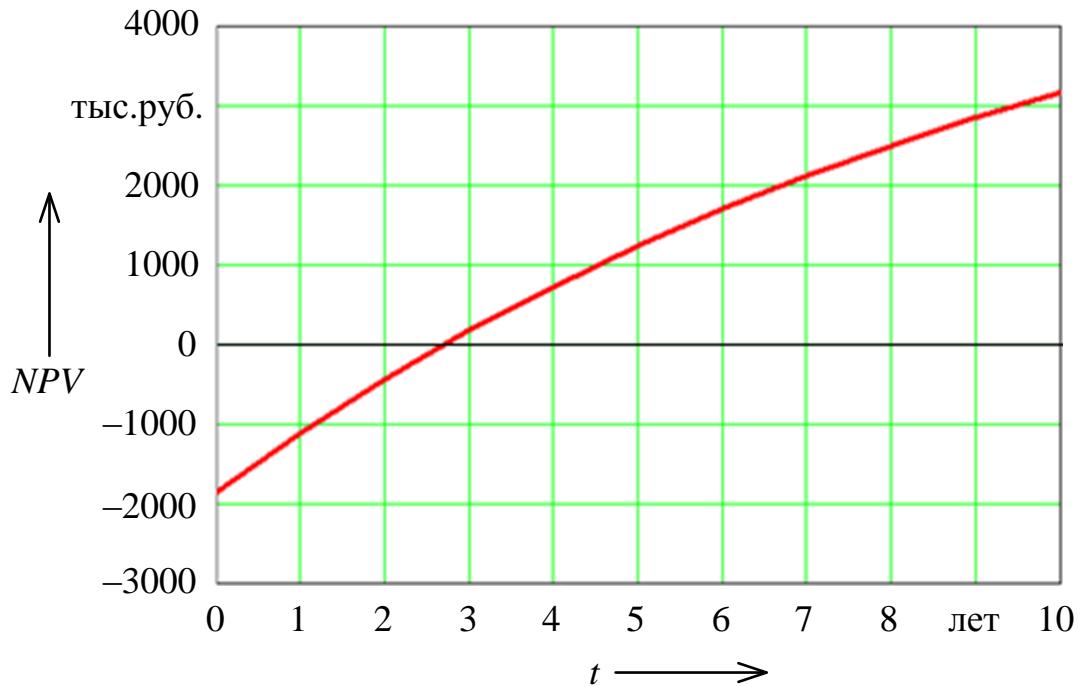


Рис. 7.26. Временная диаграмма чистого дисконтируированного дохода с учетом предложенных разработок

В соответствии с приведенным расчетом и графиком срок окупаемости при внедрении электротехнического комплекса, предназначенного для испытания электрических машин, равен 2,7 года.

#### 7.4. Выводы по седьмому разделу

1. Разработано новое устройство для определения врачающего момента на валу и скорости вращения вала, являющееся одним из структурных компонентов электротехнических комплексов для испытаний тяговых электрических машин.

2. Разработан новый способ определения частоты вращения вала асинхронных машин, работающих по схеме взаимной нагрузки, с применением спектротокового анализа, позволяющий за счет учета особенности схем испытаний сузить диапазон поиска зубцовых гармоник и, как следствие, снизить затраты вычислительных ресурсов и вероятность ошибочного определения номеров зубцовых гармоник при обеспечении высокого уровня автоматизации.

3. Теоретически обоснована необходимость учета параметров режимов эксплуатации при испытаниях коллекторных тяговых электродвигателей.

4. Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных на тяговых электродвигателях ЭДП-800 позволил выявить основные причины неисправностей, связанных с их неудовлетворительной коммутацией, и предложить новый метод настройки тяговых электродвигателей с применением математического моделирования процесса изнашивания электрических щеток.

5. Разработанный способ определения остаточного ресурса электрощеток коллекторного ТЭД позволяет учитывать показатели его режимов работы в условиях реальной эксплуатации, которые могут быть получены с применением бортовых систем мониторинга режимов работы подвижного состава.

6. Статистическая обработка данных выявила, что величина отклонения результатов изнашивания щеток, полученных в условиях реальной эксплуатации, и путем математического моделирования имеет нормальное распределение. Данный вид функции плотности вероятности позволил оценить точность математического моделирования изнашивания щеток при заданном уровне значимости. Полученный результат может быть применен, в процессе эксплуатации коллекторных ТЭД подвижного состава при принятии решения о внеплановом техническом обслуживании для проверки текущего износа щеток и их замены при необходимости. При этом эксплуатирующая организация должна сама определить значение вероятности критического износа, при котором необходимо осуществить внеплановое техническое обслуживание. Измеренные значения текущего износа щеток могут служить исходными данными для расчета возможного пробега подвижного состава до момента появления установленной вероятности критического износа.

7. С учетом предложенных разработок чистый дисконтированный доход при внедрении электротехнического комплекса, предназначенного для испытаний асинхронных машин мощностью 350 кВт, за 10 лет составил  $NPV' = 3167$  тыс. руб., а индекс рентабельности инвестиций  $PI' = 2,713$ , что выше соответствующих показателей, рассчитанных без учета данных разработок ( $NPV = 2522$  тыс. руб.,  $PI = 2,032$ ). Срок окупаемости составил 2,7 года, что является достаточным значением данного показателя для принятия положительного решения о внедрении рассматриваемого электротехнического комплекса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение качества функционирования электротехнических комплексов для испытания тяговых электрических машин при их проектировании, создании и эксплуатации, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Выполненный анализ системных свойств и параметров существующих электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки, позволил разработать обобщенную структурную схему электротехнического комплекса и выполнить классификацию ее элементов. Выделено четыре типа данных схем для испытаний асинхронных машин, отличающихся формой напряжения на выходе источников питания и типом нагрузочной машины (асинхронной или генератора постоянного тока). Выявлены преимущества и недостатки выделенных типов схем, определившие рекомендации по их применению.

2. Сформирована совокупность математических моделей электротехнического комплекса, предназначенного для испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки, позволяющих изучать физические процессы в различных схемах испытаний в динамических и статических режимах работы, в том числе в элементах силовой электроники. Разработанные математические модели могут быть применены в процессе проектирования новых испытательных комплексов для оценки необходимости увеличения резерва мощности цеховой сети и определения необходимых параметров оборудования при известных параметрах испытуемых двигателей.

3. Выполнены экспериментальные исследования, которые подтвердили адекватность принятых допущений при математическом моделировании процесса испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки. Относительные погрешности в пределах рабочего диапазона нагрузки составили при определении мощности не более 7 %, тока – 10 %, коэффициента мощности – 5 %.

4. Разработан и экспериментально проверен способ управления электротехническим комплексом, предназначенным для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, позволяющий снизить потери в нагрузочной асинхронной машине за счет регулирования параметров напряжения, подаваемого на ее обмотку статора. Математическое моделирование работы электротехнического

комплекса с асинхронными двигателями номинальной мощностью 250 кВт показало, что возможный эффект экономии потребляемой электроэнергии за счет предложенного способа составляет порядка 10 %.

5. Синтезированы схемы, позволяющие автоматизировать процесс стендовых испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки при различных типах нагрузочных генераторов и различном пути обмена энергией между машинами. Для электротехнических комплексов с предложенными схемами синтезированы алгоритмы управления процессом испытаний на нагрев асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Предложен алгоритм выбора разработанных схем.

6. Анализ результатов математического моделирования работы электротехнических комплексов показал, что отклонение напряжения сети от номинального значения на 10 % может приводить к значительному повышению коэффициента искажения синусоидальности кривой потребляемого тока и увеличению потребляемой мощности более чем на 20 % в испытательных комплексах с нагрузочной асинхронной машиной и более 10 % в схемах с нагрузочным генератором постоянного тока.

7. Математическое моделирование работы схем взаимной нагрузки при варьировании их основных параметров позволило получить обоснованные рекомендуемые диапазоны значений емкости конденсаторов в звене постоянного тока для схем с нагрузочной асинхронной машиной: порядка 1 – 10 мкФ при мощности испытуемого двигателя 0,37 кВт; 10 – 100 мкФ при мощности 5,5 кВт, 100 – 1000 мкФ при мощности 37 кВт. При применении схем взаимной нагрузки с нагрузочным генератором постоянного тока рекомендуемые значения емкости конденсатора в 10 раз ниже, чем при схеме с асинхронной нагрузочной машиной.

8. Анализ результатов математического моделирования работы различных типов схем электротехнических комплексов при принятых допущениях показал, что при наличии в составе схемы нагрузочного генератора постоянного тока, она имеет меньший коэффициент искажения синусоидальности кривой тока, чем схема с нагрузочной асинхронной машиной, работающей в режиме генератора в 1,62 – 1,72 раза.

9. В результате исследования влияния основных параметров электротехнических комплексов на их энергоэффективность выявлено, что схемы испытаний с нагрузочной асинхронной машиной с номинальной мощностью испытуемого двигателя более 100 кВт имеют суммарные потери, более чем на 50 % превышающие потери в схемах с нагрузочным генератором постоянного тока. Для схем испытания асинхронных двигателей мощностью порядка 1 кВт данные потери в малой степени зависят от типа нагрузочной машины.

10. Разработан новый способ определения частоты вращения вала асинхронных машин, работающих по схеме взаимной нагрузки, с применением спектротокового анализа, позволяющий за счет учета особенности схем испытаний сузить диапазон поиска зубцовых гармоник и, как следствие, снизить затраты вычислительных ресурсов и вероятность ошибочного определения номеров зубцовых гармоник при обеспечении высокого уровня автоматизации.

11. Разработаны способ и устройство определения частоты вращения вала и вращающего момента двигателя, позволяющие совместить в одном и том же электрическом сигнале информацию об обеих величинах. Предложенный способ позволяет снизить затраты на изготовление оборудования для измерения механических параметров режима работы и повысить технологичность электротехнического комплекса для испытаний тяговых электрических машин.

12. Усовершенствован способ определения остаточного ресурса электрощеток коллекторного тягового электродвигателя, который позволяет дополнительно учитывать показатели режимов его работы в условиях реальной эксплуатации. Адекватность математической модели, лежащей в основе предложенного способа, обоснована статистическими методами путем сопоставления расчетных значений износа щеток с замерами, полученными в лаборатории и на реально эксплуатируемых тепловозах. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая осуществить расчет остаточного ресурса щеток в соответствии с разработанным способом.

13. Разработан ряд интегрированных схем испытаний методом взаимной нагрузки асинхронных двигателей и машин постоянного тока с различными типами возбуждения в рамках одного испытательного комплекса. Общим принципом построения данных схем является исключение дублирования оборудования, выполняющего одинаковые функции, осуществляемые при испытаниях машин различного типа. Применение данных схем при разработке новых испытательных комплексов позволяет снизить материальные затраты на их внедрение.

14. Разработаны технические решения, позволяющие обеспечить косвенное определение мощности, потребляемой испытуемым двигателем и вырабатываемой нагрузочной машиной при их взаимной нагрузке, позволяющие сократить перечень измерительного оборудования и повысить технологичность испытательных комплексов. Вычислено, что если величина пульсаций напряжения в звене постоянного тока не превышает 600 В, то методическая погрешность, обусловленная определением мощности через действующие значения тока и напряжения звена постоянного тока, не превышает 0,9 % при номинальной мощности испытуемых двигателей 0,37 кВт, 0,3 % при мощности 5,5 кВт и 0,2 % при мощности 250 кВт.

15. На основе математической модели испытательного комплекса со схемой взаимной нагрузки с двумя асинхронными машинами, питающимися от преобразователей частоты, разработана программа для ЭВМ «Расчет параметров схемы испытаний АД-АГ» на языке *Java* для работы в различных операционных системах (*Windows, MacOS, Linux*). Данная программа позволяет получить результаты математического моделирования в виде максимальных и действующих значений различных показателей заданного режима работы и их временных диаграмм.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагаются исследования, направленные на разработку схем и алгоритмов испытаний тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки, обеспечивающих проведение испытаний в условиях близких к реальной эксплуатации, в том числе в динамических режимах.

## Список литературы

1. Авилов, В. Д. Методика нормирования качества коммутации в тяговых электрических машинах / В. Д. Авилов, Ш. К. Исмаилов // Известия Транссиба. – 2012. – № 2(10). – С. 2-7.
2. Авилов, В. Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока / В. Д. Авилов. – Москва, 1995. – 236 с. – ISBN 5283008231. – Текст : непосредственный.
3. Авилов, В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока / В. Д. Авилов. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2013. – 356 с. – ISBN 9785913060549. – Текст : непосредственный.
4. Автоматизированные станции испытания электрических машин / Р. В. Афенченко, В. А. Барский, Д. С. Курдюмов, А. В. Маляр // Электротехника. – 2015. – № 10. – С. 11-15. – Текст : непосредственный.
5. Авторское свидетельство № 1072187 А1 СССР, МПК H02K 15/00. Способ испытания электрических машин по методу взаимной нагрузки : № 3413413 : заявл. 30.03.1982 : опубл. 07.02.1984 / Б. А. Курбасов. – Текст : непосредственный.
6. Анализ износа электрощеток локомотива / Н. И. Щуров, М. Е. Вильбергер, Б. В. Малоземов, Е. Л. Степанов. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2010. – № 3(61). – С. 115-122.
7. Анализ переходных процессов тяговых электрических двигателей электровозов с учетом условий эксплуатации / В. В. Харlamov, П. К. Шкодун, Д. И. Попов, А. В. Проненко. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 72-74.
8. Арнольд Э. Машины постоянного тока / Э. Арнольд, И. Л. Ла-Кур. Москва: Гостехиздат, 1931. 496 с. – Текст : непосредственный.
9. Афанасов, А. М. Определение рациональных режимов взаимного нагружения тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта / А. М. Афанасов. – Текст : непосредственный // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 4(52). – С. 67-74.
10. Афонин, А. П. Микропроцессорное устройство для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов / А. П. Афонин. – Текст : непо-

средственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта. Новосибирск. 2012. № 2. С. 286 – 290.

11. Афонин, А. П. Совершенствование методики и устройства диагностирования коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока с учетом неидентичности коммутационных циклов : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Афонин Александр Петрович ; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2018. – 170 с. – Текст : непосредственный.

12. Баховцев, И. А. Использование трехфазного АИН с ШИМ для управления асинхронным исполнительным двигателем / И. А. Баховцев. – Текст : непосредственный // Электротехника. 2008. № 6. С. 45 – 52.

13. Бейерлейн, Е. В. Схема испытаний тяговых частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей / Е. В. Бейерлейн, О. Л. Рапопорт, А. Б. Щукублин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 46-48.

14. Бирюков, В. В. Анализ схемных решений силовых цепей мотор-генераторных установок постоянного тока, работающих по методу взаимной нагрузки / В. В. Бирюков. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2005. – № 4(24). – С. 86-89.

15. Битюцкий, И. Б. Новые методы расчёта и наладки коммутации машин постоянного тока: монография / И. Б. Битюцкий. - Новочеркасск: Известия вузов, 2003. - 226 с. - Текст: непосредственный. – Текст : непосредственный.

16. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семеняев // Москва : Наука. – 1980. – 975 с. – Текст : непосредственный.

17. Веселка, Ф. Гранулометрический анализ пылевидных продуктов износа электрических щеток / Ф. Веселка, В. Н. Забоин. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии : материалы IX Международной научно-технической конференции, Омск, 05–06 декабря 2013 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2013. – С. 67-76.

18. Веселовский, В. С. Угольные и графитовые конструкционные материалы / В. С. Веселовский. – Москва : Наука, 1966. - 225 с. - Текст: непосредственный.

19. Влияние материала контактных пар на износ электрических щеток электрических машин в отсутствие токовой нагрузки / А. А. Фоминых, А. И. Изотов [и др.]. – Текст : непосредственный // Электричество. 2017. № 8. С. 61 – 64.
20. Влияние отклонения параметров асинхронной машины на её статические характеристики при вентиляторной нагрузке / В. З. Ковалев, А. Г. Щербаков, О. А. Петухова, А. А. Зябкин. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2017. – № 5(155). – С. 116-125.
21. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург : Питер, 2008. - 319 с. : ил. - Текст : непосредственный.
22. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург : Питер, 2010. - 349 с. : ил. - Текст : непосредственный.
23. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог / В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук. Москва: Эко-Пресс, 2012. 196 с. – Текст : непосредственный.
24. Гемке, Р. Г. Неисправности электрических машин / Р. Г. Гемке. - Ленинград: Энергия, 1969. - 272 с. - Текст: непосредственный.
25. Гиоев, З. Г. Основы вибраакустической диагностики тяговых приводов локомотивов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гиоев Заурбек Георгиевич. – Ростов-на-Дону, 1998. – 475 с. – Текст : непосредственный.
26. Глазырин, А. С. Пропорциональный и пропорционально-интегральный принципы отработки невязки в наблюдателе полного порядка электромеханического объекта с линеаризованной моделью / А. С. Глазырин. – Текст : непосредственный // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 1(58). – С. 28-39.
27. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. Москва: Юрайт, 2018. 479 с. – Текст : непосредственный.
28. Гольдберг, О. Д. Испытания электрических машин : учебник / О. Д. Гольдберг. - Москва : Высшая школа, 2000. - 255 с. : ил. - Текст : непосредственный.
29. ГОСТ 10159-79. Машины электрические врачающиеся коллекторные. Методы испытаний = Rotating electrical commutator machines. Test methods : Меж-

государственный стандарт : издание официальное : введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 23 июля 1979 г. N 2700 : замен ГОСТ 10159-69 : дата введения 1980-07-01. - Москва : Издательство стандартов, 1980. - 10 с. - Текст : непосредственный.

30. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний = Rotating electrical machines. General test methods : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15.08.86 N 2403 : замен ГОСТ 11828-75 (кроме разд. 6), ГОСТ 25000-81 : дата введения 1987-07-01 / разработан и внесен Министерством электротехнической промышленности. - Москва : Издательство стандартов, 1986. - 28 с. - Текст : непосредственный.

31. ГОСТ 12049-75. Двигатели постоянного тока для машин напольного безрельсового электрифицированного транспорта. Общие технические условия = D. C. motors for floor railless electrified transport trucks. General specifications : Государственный стандарт : издание официальное : введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 28 октября 1975 г. N 2726 : замен ГОСТ 12049-66 : дата введения 1977-01-01. - Москва : Издательство стандартов, 1975. - 11 с. - Текст : непосредственный.

32. ГОСТ 16264.0-2018. Машины электрические малой мощности. Двигатели. Общие технические условия = Small power electric machines. Motors. General specifications : Межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 июля 2019 г. N 354-ст : замен ГОСТ 16264.0-85 : дата введения 2020-01-01 / разработан Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ") и Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении" (ВНИИНМАШ). - Москва : Издательство стандартов, 2018. - 33 с. - Текст : непосредственный.

33. ГОСТ 16264.1-2016. Двигатели асинхронные. Общие технические условия = Induction motor. Part 1. General specifications : Межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 июня 2017 г. N 530-ст : замен ГОСТ 16264.1-85 : дата введения 2018-03-01 / разработан Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВО

"НИУ "МЭИ") и Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении" (ВНИИНМАШ). - Москва : Издательство стандартов, 2016. - 13 с. - Текст : непосредственный.

34. ГОСТ 16264.3-2018. Двигатели коллекторные. Общие технические условия = Commutator motors. General specifications : Межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 июля 2019 г. N 356-ст : взамен ГОСТ 16264.3-85 : дата введения 2020-01-01 / разработан Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ") и Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении" (ВНИИНМАШ). - Москва : Издательство стандартов, 2018. – 62 с. – Текст : непосредственный.

35. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические врачающиеся тяговые. Общие технические условия = Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. General technical specifications : Межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. N 1969-ст : взамен ГОСТ 2582-81 : дата введения 2015-01-01 / разработан Открытым акционерным обществом "Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта" (ОАО "ВНИИЖТ"). - Москва : Издательство стандартов, 2013. – 52 с. - Текст : непосредственный.

36. ГОСТ 25941-83 Машины электрические врачающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия = Rotating electrical machines. Methods for determining losses and efficiency : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 14.10.83 N 4975 : взамен ГОСТ 11828-75, разд.6 : дата введения 1984-01-01 / разработан Министерством электротехнической промышленности СССР. - Москва : Издательство стандартов, 1983. - 40 с. - Текст : непосредственный.

37. ГОСТ 27222-91. Машины электрические врачающиеся. Измерение сопротивления обмоток машин переменного тока без отключения от сети = Rotating electrical machines. Measurement of the winding resistance of an a.c. machine without switching-off network : Государственный стандарт : издание официальное : утвер-

жден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 30.01.91 N 74 : взамен ГОСТ 27222-87 : дата введения 1992-01-01 / разработан Министерством электротехнической промышленности и приборостроения СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1991. – 21 с. - Текст : непосредственный.

38. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения = Dependability in technics. Failure mode, effects and criticality analysys. Basic principles : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 26.04.95 N 7 : дата введения 1997-01-01 / разработан МТК 119 "Надежность в технике". – Москва : Издательство стандартов, 1997. – 18 с. - Текст : непосредственный.

39. ГОСТ 31606-2012. Машины электрические врачающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования = Rotating electrical machines. Asynchronous motors of power from 0,12 to 400 kW inclusive. General technical requirements : Межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 ноября 2012 г. N 1105-ст : введен впервые : дата введения 2015-01-01 / внесен Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. - Москва : Издательство стандартов, 2012. - 19 с. - Текст : непосредственный.

40. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems : Межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол N-55 П от 25 марта 2013 г.) : введен впервые : дата введения 2014-07-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью "ЛИНВИТ" и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 "Электромагнитная совместимость технических средств". – Москва : Стандартинформ, – 2014. – 16 с. - Текст : непосредственный.

41. ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические врачающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний = Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods : Национальный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регули-

рованию и метрологии от 9 декабря 2009 г. N 639-ст : введен впервые : дата введения 2011-01-01 / разработан Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования "Московский энергетический институт (технический университет)" (ГОУВПО "МЭИ (ТУ)"). – Москва : Издательство стандартов, 2011. – 42 с. – Текст : непосредственный.

42. ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения = Quality of electric energy. Terms and definitions : Национальный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. N 840-ст. : введен впервые : дата введения 2012-07-01 / внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 445 "Метрология энергоэффективной экономики". – Москва : Стандартинформ, 2012. – 32 с. – Текст : непосредственный.

43. Дальнейшее развитие теории оптимальной коммутации / М. Ф. Карасев, В. П. Беляев, В. Н. Козлов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1967. – 175 с. – Текст : непосредственный.

44. Девликамов, Р. М. Анализ и исследование токосъема с коллекторов электродвигателей железнодорожного транспорта : монография / Р. М. Девликамов ; РосЖелДор, Ростовский гос. ун-т путей сообщ. (РГУПС). – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщ., 2010. – 228 с. – ISBN 9785888142806. – Текст : непосредственный.

45. Деева, В. С. "Живучесть" щеточного контакта электрических машин / В. С. Деева, М. С. Слободян, С. М. Слободян. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2013. – № 4. – С. 45-49.

46. Демкин, Н. Б. Контактирование шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – Москва : Наука, 1970. – 227 с. – Текст : непосредственный.

47. Донской Н. В. Трехфазная математическая модель асинхронного двигателя / Н. В. Донской // Электротехника. 2011. №1. С. 40 – 46.

48. Дорощенко, И. В. Динамика инвариантного испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко, В. С. Захаренко. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 110-115.

49. Дюмин, А. А. Влияние параметров сети на режимы испытаний синхронных машин методом взаимной нагрузки / А. А. Дюмин, Н. М. Гайдаш. – Текст : непосредственный // Электрика. – 2011. – № 5. – С. 24-25.

50. Дюмин, А. А. Моделирование системы управления взаимной нагрузкой синхронного генератора в среде MATLAB SIMULINK / А. А. Дюмин, В. В. Дицковский, Н. М. Гайдаш. – Текст : непосредственный // Электрика. – 2011. – № 11. – С. 45-47.
51. Дюмин, А. А. Регулирование мощности генератора при испытаниях методом взаимной нагрузки / А. А. Дюмин. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – 2008. – Т. 4. – № 4. – С. 48-49.
52. Елисеев, А. В. К вопросу о математическом моделировании режимов непрерывного подбрасывания щетки в контактных взаимодействиях с коллектором / А. В. Елисеев, А. И. Орленко. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 1(132). – С. 10-22. – DOI 10.21285/1814-3520-2018-1-10-22.
53. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. 408 с. – Текст : непосредственный.
54. Завьялов, В. М. Многокритериальное управление асинхронным электроприводом / В. М. Завьялов, А. А. Неверов, И. Ю. Семыкина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 1(45). – С. 81-84.
55. Завьялов, В. М. Энергооптимальное управление скоростью асинхронного электропривода / В. М. Завьялов, И. Ю. Семыкина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 4-2(49). – С. 21-23.
56. Захаренко, В. С. Имитационная модель энергосберегающего электромеханического испытательного стенда на основе асинхронных электродвигателей, управляемых преобразователями частоты с векторным управлением / В. С. Захаренко, Р. С. Науменко. – Текст : непосредственный // Энергоэффективность. – 2019. – № 10. – С. 22-27.
57. Зиннер, Л. Я. Тангенциальные колебания щеток / Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. – Текст : непосредственный // Известия ТПИ / Томский политехн. ин-т. Томск, Т.190. 1968. С. 257.
58. Имитационная модель силовой части стенда для испытания тяговых электродвигателей по принципу взаимной нагрузки / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев, В. С. Захаренко, В. В. Тодарев. – Текст : непосредственный // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2018. – № 4(75). – С. 31-40.
59. Иньков, Ю. М. Моделирование бездатчикового определения сопротивления и температуры обмоток статора и ротора асинхронного двигателя /

Ю. М. Иньков, А. С. Космодамианский, А. А. Пугачев. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2018. – № 9. – С. 13-18.

60. Испытание асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки / В. Д. Авилов, Д. И. Попов [и др]. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы транспортной отрасли: проблемы и решения: Материалы всерос. науч.-практ. конф. / Воронеж: Руна, 2013. №1. С. 8 – 12.

61. Испытательные стенды взаимной нагрузки двигателей постоянного и переменного тока в учебных лабораторных условиях / А. В. Литвинов, Д. И. Попов, И. А. Шутов [и др.]. – Текст : непосредственный // 115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: образование - наука - производство : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 07–08 декабря 2017 года. – Чита : Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский университет путей сообщения», 2017. – С. 82-87.

62. Исследование влияния хаотической несущей частоты широтно-импульсной модуляции на работу частотно-регулируемого асинхронного привода / В. В. Федягин, В. К. Федоров, Д. В. Федоров [и др.]. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2017. – № 5(155). – С. 111-116.

63. Казаков, Ю. Б. Исследование взаимосвязанных электромеханических процессов в системе тяговый асинхронный двигатель - асинхронный генератор с общим валом на основе полевых моделей / Ю. Б. Казаков, И. А. Палилов. – Текст : непосредственный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 2. – С. 42-46. – DOI 10.17588/2072-2672..2.042-046.

64. Казаков, Ю. Б. Моделирование энергоэффективной автоматизированной системы испытаний тяговых электрических машин с использованием полевых моделей / Ю. Б. Казаков, И. А. Палилов. – Текст : непосредственный // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2015. – Т. 1. – С. 133-138.

65. Казаков, Ю. Б. Экспериментальное и расчетное, на основе полевых моделей, исследование электромеханических процессов в асинхронных машинах, Объединенных общим валом, при испытаниях методом взаимной нагрузки / Ю. Б. Казаков, И. А. Палилов. – Текст : непосредственный // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2016. – Т. 1. – С. 184-189.

66. Кацман, М. М. Справочник по электрическим машинам : учебное пособие / М. М. Кацман. – Москва : Академия. – 2005. – Т. 1. – 480 с. – Текст : непосредственный.

67. Качин, О. С. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин: монография / О. С. Качин, С. И. Качин. – Кишинев : Lambert Academic Publishing. – 2012. – 164 с. – Текст: непосредственный.
68. Качин, С. И. Моделирование процессов износа электрических щеток универсальных электродвигателей с учетом механических факторов / С. И. Качин, О. С. Качин. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2009. – № 12. – С. 68-70.
69. К вопросу влияния биения коллектора на качество коммутации и ресурс тяговых электродвигателей / Ш. К. Исмаилов, О. В. Гателюк, В. В. Бублик [и др.]. – Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 332-336.
70. Ковалев, В. З. Стенд для диагностики пакетов роторов погружных асинхронных электродвигателей / В. З. Ковалев, В. В. Аникин, В. О. Бессонов [и др.]. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы энергетики. – 2019. – № 1. – С. 111-116.
71. Коварский, М. Е. Испытание электрических машин / М. Е. Коварский, Ю. И. Янко // Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с. – ISBN 5-283-00528-3. – Текст : непосредственный.
72. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 2001. - 327 с. : ил. – Текст : непосредственный.
73. Копылов, И. П. Электрические машины в 2 т. Том 1 : учебник / И. П. Копылов. - Москва : Юрайт, 2020. - 267 с. : ил. - Текст : непосредственный.
74. Копылов, И. П. Электрические машины в 2 т. Том 2 : учебник / И. П. Копылов. - Москва : Юрайт, 2020. - 407 с. : ил. - Текст : непосредственный.
75. Космодамианский, А. С. Влияние температуры тягового асинхронного двигателя на его режимы работы / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, А. А. Пугачев. – Текст : непосредственный // Электротехника. 2011. №1. С. 50 – 55.
76. Кочегурова, Е. А. Теория и методы оптимизации : учебное пособие / Е. А. Кочегурова. – Москва : Юрайт. – 2017. – 133 с. – Текст : непосредственный.
77. Кочин, А. Е. Система для испытания электрических машин по методу взаимной нагрузки / А. Е. Кочин, С. А. Васильченко. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, образование, производство : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 168-171.

78. Крагельский И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. Москва: Машиностроение, 1977. 526 с. – Текст : непосредственный.
79. Крюков, О. В. Энергосберегающий стенд для комплектных испытаний двигателей / О. В. Крюков – Текст: непосредственный.// Энергетик. – 2017. – № 12. – С. 28-32.
80. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей: Учебное пособие / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – Москва : Транспорт. – 1987. – 536 с. – Текст: непосредственный.
81. Лившиц, П. С. Щетки электрических машин / П. С. Лившиц. - Москва: Энергоатомиздат. – 1989. – 80 с. – Текст: непосредственный.
82. Литвинов, А. В. Оценка эффективности применения универсального стенда для испытаний тяговых двигателей / А. В. Литвинов, Д. И. Попов, Д. Е. Родина. – Текст : непосредственный // Технические науки в России и за рубежом : Материалы VII Международной научной конференции, Москва, 20–23 ноября 2017 года. – Москва : Издательский дом «Буки-Веди», 2017. – С. 93-99.
83. Макаров, Л. Н. Особенности работы асинхронного двигателя с коротко-замкнутым ротором в системе частотного регулирования / Л. Н. Макаров, С. В. Ястреба. – Текст : непосредственный // Электротехника. 2007. № 11. С. 15-19.
84. Макаров, Е. Г. Mathcad : учебный курс / Е. Г. Макаров. - Санкт-Петербург : Питер, 2009. - 384 с. : ил. - Текст : непосредственный.
85. Марченко, А. А. Исследование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1-2. – С. 408-412.
86. Марченко, А. А. Экспериментальные исследования процесса искусственного нагружения судовых асинхронных электродвигателей / А. А. Марченко, С. Ю. Труднев. – Текст : непосредственный // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2016. – № 38. – С. 16-22.
87. Марченко, А. А. Энергоэффективное нагружение асинхронных электродвигателей в процессе послеремонтных испытаний / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин. – Текст : непосредственный // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2014. – № 6(28). – С. 76-83.
88. Мельниченко, О. В. Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока / О. В. Мельниченко, В. С. Иванов. – Текст : непосредственный // Вестник Иркут-

ского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 4(135). – С. 231-242.

89. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току / Барков А. В., Баркова Н. А., Борисов А. А. [и др.]. Санкт-Петербург : Спектр. – 2012. – 67 с. – ISBN 978-5-914-98-028-0. – Текст : непосредственный.

90. Методология безнагрузочных испытаний асинхронных двигателей после ремонта / В. П. Казанцев, А. М. Костыгов и др. – Текст : непосредственный // Электротехника. 2010. № 6. С. 39 – 44.

91. Механика скользящего контакта / В. И. Нэллин, Н. Я. Богатырев и др. Москва: Транспорт, 1966. 254 с. – Текст : непосредственный.

92. Моделирование систем управления судовым электроприводом: монография / В. В. Исакова, Н. Н. Портнягин и др. – Петропавловск-Камчатский : Камчатский гос. техн. ун-т. – 2014. 104 с. – Текст : непосредственный.

93. Мукушев, Т. Ш. Электрические машины электровозов ВЛ-10, ВЛ-10у, ВЛ-10к, ВЛ-11. Конструкция и ремонт / Т. Ш. Мукушев, С. А. Писаренко // Москва : УМЦ ЖДТ. – 2015. – 126 с. – Текст : непосредственный.

94. Мышкин, Н. К. Электрические контакты / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. Долгопрудный : Интеллект, 2008. 560 с. – Текст : непосредственный.

95. Наumenko, Р. С. Электромеханический испытательный стенд на основе асинхронных электродвигателей, управляемых частотными преобразователями с взаимной нагрузкой по промежуточной цепи постоянного тока / Р. С. Наumenko. – Текст : непосредственный // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апреля 2019 года / Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2019. – С. 312-314.

96. Находкин, М. Д. Проектирование тяговых электрических машин / М. Д. Находкин, Г. В. Васilenко, В. И. Бочаров, М. А. Козорезов. – Москва : Транспорт. – 1976. – 624 с. – Текст : непосредственный.

97. Нейман, Л. А. Методика измерения мощности потерь в механической колебательной системе с электромагнитным возбуждением / Л. А. Нейман, Н. И. Щуров // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 247-252.

98. Низамиев, М. Ф. Программное обеспечение для автоматизированного послеремонтного испытания асинхронных двигателей напряжением до 1000 В / М. Ф. Низамиев, Р. Р. Гибадуллин, А. М. Копылов. – Текст : непосредственный //

Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство : сборник научных статей по итогам второй международной научной конференции, Казань, 30 марта 2019 года. – Казань: ООО «Конверт», 2019. – С. 110-112.

99. Новикова, Е. В. Бездатчиковое измерение коммутационного искрения коллекторных электрических машин на основе переходных функций / Е. В. Новикова, Р. Х. Сайфутдинов. – Текст : непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2017. – Т. 1. – С. 99-101.

100. Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ//Российская газета. 2009. 27 ноября. – Текст : непосредственный.

101. Оптимальная коммутация машин постоянного тока / М. Ф. Карасев, В. П. Беляев, В. Н. Козлов [и др.] ; Под общей редакцией В. В. Караваева; Омский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Москва : Транспорт, 1967. – 180 с. – Текст : непосредственный.

102. Официальный сайт компании ЗАО «Электроконтакт». 2017. URL: <http://old.elc-pm.ru> (дата обращения: 01.08.2021).

103. Официальный сайт компании ОАО «РЖД». 2018. URL: <http://www.rzd.ru> (дата обращения: 01.08.2021).

104. Официальный сайт компании «Уральские локомотивы». 2018. URL: <http://ulkm.ru> (дата обращения: 01.08.2021).

105. Омельченко, Е. Я. Мощность в многофазных цепях / Е. Я. Омельченко, С. С. Енин, В. О. Танич // Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015)», Екатеринбург, 05–09 октября 2015 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; Академия электротехнических наук Российской Федерации; Ассоциация инженеров по электроприводу. – Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. – С. 79-82.

106. Омельченко, Е. Я. Основные направления развития автоматизированного электропривода / Е. Я. Омельченко. – Текст : непосредственный // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 4(25). – С. 4-7.

107. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буша [и др.] ; Москва : Машиностроение, 2001. - 664 с. : ил. - Текст : непосредственный.

108. Охорзин, В. А. Прикладная математика в системе MATHCAD : учебное пособие / В. А. Охорзин. – Санкт-Петербург : Издательство "Лань", 2008. – 348 с. – ISBN 9785811408146. – Текст : непосредственный.

109. Оценка влияния материала контактных пар на износ электрических щеток узлов скользящего токосъема электрических машин, работающих при отсутствии токовой нагрузки / А. А. Фоминых, А. И. Изотов [и др.]. – Текст : непосредственный // Advanced Science. 2017. № 1. С. 39.

110. Оценка влияния плотности тока на износ щеток тяговых электродвигателей / Д. Н. Хомченко, А. Е. Черешенко, Г. В. Ковалев, А. Е. Набоков. - Текст: непосредственный // Транспорт: наука, образование, производство: сборник трудов Международной научно-практической конференции / Ростовский государственный университет путей сообщения. - Ростов-на-Дону: РГУПС, 2018. – С. 221-224.

111. Оценка достоверности математической модели определения интенсивности изнашивания электрических щеток тяговых электродвигателей подвижного состава / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков, Н. В. Маркин. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : Сборник научных трудов, Ростов на Дону, 01–02 марта 2018 года. – Ростов на Дону : РГУПС, 2018. – С. 337-340.

112. Патент № 108833 Российская Федерация, МПК G01B 7/28. Прибор контроля профиля коллектора машин постоянного тока : № 2011123207/28 : заявл. 08.06.2011 : опубл. 27.09.2011 / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Р. В. Сергеев, Д. А. Ахунов ; заявитель Омский государственный университет путей сообщения. – Текст : непосредственный.

113. Патент № 140678 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки : № 2013147519/28 : заявл. 24.10.2013 : опубл. 20.05.2014 / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов ; заявитель ОмГУПС. – Текст : непосредственный.

114. Патент № 143346 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Схема для определения электрической мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытании их методом взаимной нагрузки : № 2014112918/28 : заявл. 02.04.2014 : опубл. 20.07.2014 / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов ; заявитель ОмГУПС. – Текст : непосредственный.

115. Патент № 143348 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Устройство для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки : № 2014112919/28 : заявл. 02.04.2014 : опубл. 20.07.2014 / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов ; заявитель ОмГУПС. – Текст : непосредственный.

116. Патент № 145998 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки : № 2014112920/07 : заявл. 02.04.2014 : опубл. 27.09.2014 / В. Д. Авилов, В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов ; заявитель ОмГУПС. – Текст : непосредственный.

117. Патент № 149583 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Устройство для нагружения асинхронных электродвигателей : № 2014121222/28 : заявл. 26.05.2014 : опубл. 10.01.2015 / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин, С. Ю. Труднев ; заявитель Камчатский государственный технический университет. – Текст : непосредственный.

118. Патент № 163996 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Схема испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки : № 2016113850/28 : заявл. 11.04.2016 : опубл. 20.08.2016 / В. В. Харламов, Д. И. Попов, С. О. Руменко, А. И. Стретенцев ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

119. Патент № 168633 Российская Федерация, МПК G01R 31/34, G01M 15/00. Стенд для испытания асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением : № 2016139746 : заявл. 10.10.2016 : опубл. 13.02.2017 / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов [и др.] ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

120. Патент № 170708 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытания асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением : № 2016139744 : заявл. 10.10.2016 : опубл. 03.05.2017 / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов [и др.] ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

121. Патент № 178539 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытания асинхронных машин и машин постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением : № 2017143233 : заявл. 11.12.2017 : опубл. 06.04.2018 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

122. Патент № 178716 U1 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки :

№ 2017143232 : заявл. 11.12.2017 : опубл. 17.04.2018 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

123. Патент № 186188 Российская Федерация, МПК G01R 31/34, H02K 15/02. Стенд для испытания асинхронных машин : № 2018133027 : заявл. 17.09.2018 : опубл. 11.01.2019 / Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

124. Патент № 184839 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытания асинхронных машин и машин постоянного тока : № 2018126407 : заявл. 17.07.2018 : опубл. 12.11.2018 / Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

125. Патент № 195604 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для автоматизированных испытаний асинхронного двигателя : № 2019132469 : заявл. 14.10.2019 : опубл. 03.02.2020 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

126. Патент № 197440 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Схема испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки : № 2020104611 : заявл. 31.01.2020 : опубл. 27.04.2020 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

127. Патент № 192278 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытания асинхронного двигателя : № 2019115635 : заявл. 21.05.2019 : опубл. 11.09.2019 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

128. Патент № 2200960 С2 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока : № 2001101213/09 : заявл. 12.01.2001 : опубл. 20.03.2003 / А. С. Курбасов, И. Л. Таргонский, Э. А. Долгошев ; заявитель ОАО «ВЭлНИИ». – Текст : непосредственный.

129. Патент № 2433419 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки : № 2010124307/28 : заявл. 15.06.2010 : опубл. 10.11.2011 / В. Д. Авилов, А. И. Володин, В. Т. Данковцев [и др.] ; заявитель ОмГУПС. – Текст : непосредственный.

130. Патент № 2548020 С2 Российская Федерация, МПК H01R 39/58. Способ контроля износа щеток и работы щеточно-коллекторного узла электрической машины : № 2013131068/07 : заявл. 05.07.2013 : опубл. 10.04.2015 / С. И. Малафеев, Ю. В. Тихонов. – Текст : непосредственный.

131. Патент № 2652174 Российская Федерация, МПК G01L 3/12. Способ измерения момента на валу двигателя и частоты вращения его ротора : № 2017102628 : заявл. 26.01.2017 : опубл. 25.04.2018 / В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. К. Шкодун ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

132. Патент № 2677243 Российская Федерация, МПК H01R 39/58. Способ определения ресурса щеток тяговых коллекторных электродвигателей : № 2017125902 : заявл. 18.07.2017 : опубл. 16.01.2019 / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков ; заявитель ОмГУПС. – Текст : непосредственный.

133. Патент № 2691778 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытания асинхронных машин и способ их нагружения : № 2018126436 : заявл. 17.07.2018 : опубл. 18.06.2019 / Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

134. Патент № 2706449 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки : № 2019108116 : заявл. 21.03.2019 : опубл. 19.11.2019 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

135. Патент № 2712741 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ нагружения асинхронного двигателя при его испытании методом взаимной нагрузки : № 2019110694 : заявл. 10.04.2019 : опубл. 31.01.2020 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

136. Патент № 2731322 Российская Федерация, МПК G01P 3/48. Способ определения частоты вращения ротора асинхронных двигателей : № 2020106702 : заявл. 12.02.2020 : опубл. 01.09.2020 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

137. Патент № 80018 Российская Федерация, МПК G01R 31/04. Устройство для испытания асинхронных тяговых электродвигателей : № 2008115647/22 : заявл. 21.04.2008 : опубл. 20.01.2009 / О. Л. Рапорт, А. Б. Цукублин, Е. В. Бейерлейн ; заявитель Томский политехнический университет. – Текст : непосредственный.

138. Патент № 85674 Российская Федерация, МПК G01R 35/04, H02K 1/08. Стенд для испытаний асинхронного тягового электродвигателя : № 2009105786/22 : заявл. 20.02.2009 : опубл. 10.08.2009 / Л. Г. Козлов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов, В. А. Коновалов ; заявитель МИИТ. – Текст : непосредственный.

139. Патент № 99186 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Стенд для испытаний асинхронного тягового электродвигателя : № 2010122670/28 : заявл.

04.06.2010 : опубл. 10.11.2010 / Л. Г. Козлов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов, В. А. Коновалов ; заявитель МИИТ. – Текст : непосредственный.

140. Патент № 2757784 Российская Федерация, МПК H01R 39/58. Способ определения остаточного ресурса электрощеток тягового электродвигателя : № 2021103446 : заявл. 11.02.2021 : опубл. 21.10.2021 / В. В. Харламов, Д. И. Попов ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

141. Патент № 2229723 Российская Федерация, МПК G01R 21/06. Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока : № 2002114571/28 : заявл. 03.06.2002 : опубл. 27.05.2004 / В. Д. Михотин ; В. И. Черенцов ; заявитель Пензенский государственный университет. – Текст : непосредственный.

142. Патент № 2296338 Российская Федерация, МПК G01R 21/06. Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока : № 2005133352/28 : заявл. 28.10.2005 : опубл. 27.03.2007 / Н. М. Алейников ; А. Н. Алейников заявитель Воронежский государственный университет. – Текст : непосредственный.

143. Петушкин, М. Ю. Развитие метода проактивного диагностирования асинхронных двигателей / М. Ю. Петушкин, Д. О. Пустовойт. – Текст : непосредственный // Электротехнические комплексы и системы : Материалы Международной научно-практической конференции, Уфа, 24 октября 2018 года. – Уфа: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2018. – С. 54-58.

144. Плохов, И. В. Способ уменьшения искрения щёточно - контактного узла турбогенератора / И. В. Плохов, А. Н. Исаков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 12-2. – С. 342-348.

145. Плохов, И. В. Структура и алгоритмы имитационного моделирования динамики электрофрикционного взаимодействия / И. В. Плохов, А. В. Ильин, О. И. Козырева. – Текст : непосредственный // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономические и технические науки. – 2014. – № 4. – С. 192-199.

146. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов / В. В. Харламов, Е. Ю. Чуприна, Р. В. Сергеев [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 138-147.

147. Попов, Д. И. Алгоритм вывода на режим нагрузки асинхронных машин при испытании методом взаимной нагрузки / Д. И. Попов, С. О. Руменко,

А. И. Стретенцев. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки, Омск, 08 февраля 2016 года / Министерство транспорта Российской Федерации; Федеральное агентство железнодорожного транспорта; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск : ОмГУПС, 2016. – С. 180-185.

148. Попов, Д. И. Анализ энергетической эффективности электротехнических комплексов испытаний асинхронных машин / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 118-123.

149. Попов, Д. И. Гармонический анализ состава тока, потребляемого комплексами испытаний электрических машин / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 632-638.

150. Попов, Д. И. Исследование влияния изменения напряжения сети на потери мощности при испытании асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 145-154.

151. Попов, Д. И. Исследование воздействия изменения напряжения на функционирование схем взаимной нагрузки для испытания асинхронных двигателей / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 12. – С. 206-210.

152. Попов, Д. И. Компьютерное моделирование электротехнического комплекса для испытаний асинхронных четырехфазных тяговых двигателей / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 102-111.

153. Попов, Д. И. Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин / Д. И. Попов. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2019. – 175 с. : ил – ISBN 978-5-949-41229-9. – Текст : непосредственный.

154. Попов, Д. И. Математическое моделирование физических процессов в испытательных комплексах электрических машин / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 4(160). – С. 79-84.

155. Попов, Д. И. Моделирование комплекса испытаний асинхронных машин с обменом энергией по сети / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Из-

вестия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 173-179.

156. Попов, Д. И. Модернизированная схема испытаний асинхронных тяговых двигателей методом их взаимной нагрузки / Д. И. Попов, Р. В. Сергеев, С. О. Руменко. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 10–11 декабря 2015 года / И. И. Галиев (отв. редактор). – Омск : ОмГУПС, 2015. – С. 215-220.

157. Попов, Д. И. Определение коэффициента экономичности электротехнических комплексов для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Вопросы электротехнологии. – 2020. – № 1(26). – С. 40-45.

158. Попов, Д. И. Определение необходимых параметров звена постоянного тока электротехнических комплексов для испытаний асинхронных машин / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 195-205.

159. Попов, Д. И. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей карьерных самосвалов / Д. И. Попов, Ю. В. Москалев, Р. В. Сергеев. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки, Омск, 08 февраля 2018 года / Министерство транспорта Российской Федерации; Федеральное агентство железнодорожного транспорта; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск : ОмГУПС, 2018. – С. 169-176.

160. Попов, Д. И. Разработка программного обеспечения для моделирования и проектирования комплексов для испытаний асинхронных машин / Д. И. Попов, Д. В. Борисенко. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 652-659.

161. Попов, Д. И. Разработка способа определения мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытаниях методом взаимной нагрузки / Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Вопросы электротехнологии. – 2020. – № 3(28). – С. 31-37.

162. Попов, Д. И. Экспериментальное исследование энергетических показателей элементов схемы взаимной нагрузки асинхронных машин / Д. И. Попов. –

Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 7. – С. 117-124.

163. Попов, Ю. И. Повышение ресурса тяговых электрических машин электровозов эксплуатируемых в сложных природно-климатических условиях : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Попов Юрий Иванович ; Российский университет транспорта. – Москва, 2018. – 24 с. – Текст : непосредственный.

164. Применение смазывающих щеток для снижения износа элементов узлов токосъема в электрических машинах / А. И. Изотов, Г. А. Мамаев, В. Я. Беспалов [и др.]. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2015. – № 3. – С. 53-57.

165. Продукция «Уральские локомотивы»: сайт. - Верхняя Пышма. - URL: <http://www.ulkm.ru/produkciya> (дата обращения: 01.08.2021). - Текст: электронный.

166. Пугачев, А. А. Минимизация мощности потерь в электроприводе со скалярной системой управления асинхронным двигателем / А. А. Пугачев. – Текст : непосредственный // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 3(64). – С. 32-37.

167. Пугачев, А. А. Система управления тяговым асинхронным двигателем с минимизацией мощности потерь / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, А. С. Космодамианский. – Текст : непосредственный // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2(46). – С. 55.

168. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А. С. Глазырин, С. Н. Кладиев, К. С. Афанасьев [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118-126.

169. Разработка способа прогнозирования остаточного ресурса электрощеток тяговых электродвигателей / В. В. Харlamov, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 182-190.

170. Руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту тяговых электродвигателей локомотивов. ПКБ ЦТ.006.0001 // Региональный центр инновационных технологий: [сайт]. – URL: <http://www.rcit.su/techinfo82.html> (дата обращения: 01.08.2021). – Текст: электронный.

171. Сайт «PROlokotiv.ru». 2018. URL: <http://prolokotiv.ru> (дата обращения: 01.08.2021).

172. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680874 Российская Федерация. Определение остаточного ресурса электрических щеток тяговых двигателей по данным эксплуатации бортовой системы подвижного состава : № 2021669687 : заявл. 30.11.2021 : опубл. 15.12.2021 / М. Ф. Байсадыков, В. В. Харламов, Д. И. Попов [и др.] ; заявитель ОмГУПС – Текст : непосредственный.

173. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616133 Российская Федерация. Расчет параметров схемы испытаний АД-АГ : № 2019612218 : заявл. 06.03.2019 : опубл. 17.05.2019 / Д. И. Попов, Д. В. Борисенко ; заявитель ОмГУПС : ил. – Текст : непосредственный.

174. Семыкина, И. Ю. Математическое моделирование неисправностей насосно-компрессорного оборудования и его диагностика на основе метода анализа тока статора приводного электродвигателя / И. Ю. Семыкина, М. В. Кипервассер, А. В. Герасимук. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 2(126). – С. 155-166.

175. Смирнов, В. П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электровоза : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание научной степени доктора технических наук / Смирнов Валентин Петрович. – Иркутск, 2005. – 355 с. – Текст : непосредственный.

176. Снижение износа щеток в коллекторных электрических машинах переменного тока / А. И. Изотов, Г. А. Мамаев, В. Я. Беспалов [и др.]. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2017. – № 2. – С. 50-54.

177. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей электровозов : научная монография / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова, Д. А. Ахунов. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2015. – 198 с. – ISBN 9785949411209. – Текст : непосредственный.

178. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учеб. для студентов вузов / Г. Г. Соколовский ; Г. Г. Соколовский. – Москва : Академия, 2006. – 265 с. – Текст : непосредственный.

179. Статистика: Учебник / Под ред. И. И. Елисеевой. Москва: Юрайт, 2018. 361 с. – Текст : непосредственный.

180. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В / О. В. Владимиров, И. В. Ившин, М. Ф. Низамиев [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Пробле-

мы энергетики. – 2019. – Т. 21. – № 3-4. – С. 58-66. – DOI 10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-58-66.

181. Хъ10егия развития холдинга "РЖД" на период до 2030 года (основные положения): официальный сайт. - URL: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5104&id=639](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=639) (дата обращения: 01.08.2021). – Текст: электронный.

182. Стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. URL: <https://www.mintrans.ru/documents/1/1010> (дата обращения: 01.08.2021). - Текст: электронный.

183. Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 августа 2017 г. № 1756-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/klnxiLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> (дата обращения: 01.08.2021). – Текст: электронный.

184. Сухарев, А. Г. Методы оптимизации: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – Москва : Юрайт. – 2017. – 367 с. – Текст: электронный.

185. Филюшов, Ю. П. Многокритериальная оптимизация работы электропривода переменного тока : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Филюшов Юрий Петрович. – Новосибирск, 2007. – 241 с. – Текст : непосредственный.

186. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с. – Текст : непосредственный.

187. Фираго, Б. И. Электромагнитная совместимость системы «преобразователь частоты - асинхронный двигатель» с системой электроснабжения / Б. И. Фираго, К. М. Медведев, Л. Б. Павлячик – Текст : непосредственный // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2006. – №66. – С. 263-264.

188. Харламов, В. В. Автоматизация схемы нагружочных испытаний асинхронных двигателей / В. В. Харламов, Д. И. Попов, Л. Е. Серкова. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : Материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки, Омск, 08 февраля 2019 года / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск : ОмГУПС, 2019. – С. 183-188.

189. Харламов, В. В. Анализ учета зубцовых гармоник ЭДС статора при математическом моделировании процесса испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В. В. Харламов, Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2020. – № 2(170). – С. 37-41.
190. Харламов, В. В. Взаимодействие элементов коллекторно-щеточного узла при изменении механических параметров работы тяговых двигателей / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков. – Текст : непосредственный // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем : материалы второй международной научно-практической конференции, Омск, 08 декабря 2016 года / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск : ОмГУПС, 2016. – С. 186-194.
191. Харламов, В. В. Испытательный комплекс, реализующий алгоритм эффективного управления процессом нагружения асинхронного двигателя / В. В. Харламов, Д. И. Попов, С. О. Руменко. – Текст : непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : Материалы третьей международной научно-практической конференции, Омск, 06 декабря 2018 года. – Омск : ОмГУПС, 2018. – С. 134-138.
192. Харламов, В. В. Исследование физических процессов в звене постоянного тока схемы взаимной нагрузки асинхронных машин / В. В. Харламов, Д. И. Попов, Р. В. Сергеев. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 141-149.
193. Харламов, В. В. Методика определения параметров математической модели износа электрических щеток / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы XI научной конференции, посвященной Дню российской науки, Омск, 08 февраля 2017 года / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск : ОмГУПС, 2017. – С. 109-116.
194. Харламов, В. В. Определение мощности, потребляемой асинхронным двигателем и вырабатываемой нагрузочным генератором в схеме взаимной нагрузки / В. В. Харламов, Д. И. Попов, Г. Г. Ахмедзянов. – Текст : непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : Материалы IV международной научно-практической конференции в рамках Научно-образовательного форума, Омск, 10 декабря 2020 года. – Омск : ОмГУПС, 2020. – С. 226-233.

195. Харламов, В. В. Особенности моделирования процесса испытания асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки в программном продукте Multisim / В. В. Харламов, Д. И. Попов, С. О. Руменко. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2017. – № 6(156). – С. 41-46.
196. Харламов, В. В. Разработка алгоритмов эффективного управления процессом испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В. В. Харламов, Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2019. – № 4(166). – С. 29-33.
197. Харламов, В. В. Разработка методики предиктивного анализа ресурса щеток тяговых электродвигателей подвижного состава по условиям эксплуатации / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков, Д. В. Супоня. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1(45). – С. 2-11.
198. Харламов, В. В. Разработка методов и средств прогнозирования остаточного ресурса электрощеток с применением данных мониторинга режимов работы двигателей : Научная монография / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков ; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск : ООО "Издательский центр "Омский научный вестник", 2021. – 168 с. – Текст : непосредственный.
199. Харламов, В. В. Разработка схемы испытания асинхронного двигателя путем взаимной нагрузки с применением генератора постоянного тока / В. В. Харламов, Д. И. Попов, Р. В. Сергеев. – Текст : непосредственный // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : Материалы пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 12 ноября 2020 года. – Омск : ОмГУПС, 2020. – С. 88-95.
200. Харламов, В. В. Совершенствование стенда для испытания асинхронных машин и машин постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением / В. В. Харламов, Р. В. Сергеев, Д. И. Попов. – Текст : непосредственный // Электропривод на транспорте и в промышленности : труды II Всероссийской научно-практической конференции, Хабаровск, 20–21 сентября 2018 года. – Хабаровск : ДВГУПС, 2018. – С. 85-89.
201. Харламов, В. В. Совершенствование схем испытаний асинхронных тяговых двигателей с применением метода взаимной нагрузки / В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. Г. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4(44). – С. 28-36.

202. Харламов, В. В. Универсальный энергоэффективный стенд для нагрузочных испытаний тяговых асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 3(27). – С. 58-66.
203. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. - Москва: Издательство иностранной литературы, 1961 – 464 с. – Текст: непосредственный.
204. Чижма, С. Н. Алгоритм выделения пазовых гармоник по спектру сигнала тока статора асинхронного двигателя / С. Н. Чижма, А. В. Скляр, Д. А. Елизаров. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2016. – № 4(148). – С. 70-75.
205. Шантаренко, С. Г. Особенности токосъема в коллекторно-щеточном узле тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, О. Д. Юрсов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 2(22). – С. 53-58.
206. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. Москва : Мир. – 1978. – 411 с. – Текст : непосредственный.
207. Экспериментальные исследования метода взаимной нагрузки асинхронных двигателей / В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. С. Соколов, Л. Е. Серкова. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2020. – № 5(173). – С. 44-49.
208. Электрические машины электропоездов. Общее руководство по ремонту. Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2009 г. № 2731 р / ОАО «РЖД». М., 2009. 184 с. – Текст : непосредственный.
209. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями: Руководство по эксплуатации // PROлокомотив.ru: [сайт]. – URL: <https://prolokomotiv.ru/rukovodstvo-po-ekspluatacii> (дата обращения: 01.08.2021). – Текст: электронный.
210. Электропривод : учебное пособие / Р. Ф. Бекишев, Ю. Н. Дементьев. – Москва : Юрайт, 2020. - 301 с. : ил. - Текст : непосредственный.
211. Энергетическая эффективность законов скалярного частотного управления асинхронным электроприводом / И. А. Braslavskiy [и др.]. – Текст : непосредственный // Электротехника. 2012. № 9. С. 44-48.
212. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей / Е. Я. Омельченко, А. В. Белый, С. С. Енин, Н. В. Фомин. – Текст : непосредственный // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 3(40). – С. 12-19.

213. Abo-Khalil, A. Current injection-based DC-link capacitance estimation using support vector regression / A. Abo-Khalil. – DOI 10.1049/iet-pel.2010.0310 // IET Power Electron. – 2012. – Vol. 5 . – No. 1. – P. 53 (дата обращения: 01.08.2021).
214. Abo-Khalil, A. DC-link capacitance estimation in AC/DC/AC PWM converters using voltage injection / A. Abo-Khalil, D. Lee. – DOI 10.1109/TIA.2008.2002181 // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2008. –Vol. 44. – No. 5. – P. 1631-1637 (дата обращения: 01.08.2021).
215. Aiello, M. A comparison of spectrum estimation techniques for nonstationary signals in induction motor drive measurements / M. Aiello, A. Cataliotti, S. Nuccio. – DOI 10.1109/TIM.2005.858519 // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2005. – Vol. 54 – No. 6. – P. 2264-2271 (дата обращения: 01.08.2021).
216. An analytical model of the induction machine for the development of diagnostic techniques / L. Cristaldi, M. Faifer, L. Piegari [et al.] .– DOI 10.1109/DEMPED.2011.6063685 // 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives. – 2019. – P. 598-605 (дата обращения: 01.08.2021).
217. Beyerleyn, E. V. Energy efficiency of back-to-back method for induction traction motors testing / E. V. Beyerleyn, P. V. Tyuteva. – DOI 10.1109/EDM.2014.6882547 // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM : Proceedings, Altai, 30 июня – 04 2014 года. – Altai: IEEE Computer Society. – 2014. – P. 359-361 (дата обращения: 01.08.2021).
218. Binder, A. Elektrische Maschinen und Antriebe / A. Binder. – DOI 10.1007/978-3-540-71850-5 // Springer. – 2012. – P. 1249 (дата обращения: 01.08.2021).
219. Blaabjerg, F. Evaluation of modern IGBT-modules for hard-switched AC/DC/AC converters / F. Blaabjerg, J. Pedersen, U. Jaeger. – URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0029519654&origin=resultslist> // IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting. 8-12 October 1995 – USA, Orlando, 1995. – Vol. 2. – Part 3 (of 3). – P. 997-1005 (дата обращения: 01.08.2021).
220. Bulucea, C. A. Operation analysis of AC traction motors in terms of electromagnetic torque capability on sustainable railway vehicles / C. A. Bulucea, D. A. Nicola, M. A. Rosen. – DOI 10.1051/matecconf/ 20167602005 // Proc. of the MATEC Web conf. – 2016. – Vol. 76 (дата обращения: 01.08.2021).

221. Castevens, J. M. Influence of high velocities and high current densities on the friction and wear behavior of copper-graphite brushes / J. M. Castevens, H. G. Rylander, Z. Eliezer. – DOI 10.1016/0043-1648(78)90142-4 // Wear. – 1978. – Vol. 48. – Issue 1. – P. 121-130 (дата обращения: 01.08.2021).
222. Commutation characteristics and brush wear of DC motor at high rotation speed / K. Sawa, M. Isato, T. Ueno [et al.] . – DOI 10.1109/HOLM.2017.8088082 // IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Denver. – 2017. – P. 176-181 (дата обращения: 01.08.2021).
223. Comparison of spectral estimation techniques applied to induction motor broken bars detection / F. Cupertino, E. De Vanna, L. Salvatore [et al.] . – DOI 10.1109 / DEMPED.2003.1234560 // 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. – 2003. – P. 7770333 (дата обращения: 01.08.2021).
224. De Rosa, F. Evaluation of harmonics and interharmonics produced by AC/DC/AC conversion systems / F. De Rosa, R. Langella, A. Testa. – URL: [// 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power \(IEEE Cat. No.04EX951\). – 2004. – P. 495-500 \(дата обращения: 01.08.2021\).](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-19644372251&origin=resultslist)
225. Drubel, O. Converter applications and their influence on large electrical machines / O. Drubel. – DOI 10.1007/978-3-642-36282-8 // Springer. – 2013. – P. 190 (дата обращения: 01.08.2021).
226. Eliseev, A. V. Mathematical modeling of continuous tossing of the brush with the gap from the commutator / A. V. Eliseev, S. V. Eliseev, A. I. Orlenko. – DOI 10.18178/ijeetc.8.2.72-77 // International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications. – 2019. – Vol. 8. – No 2. – P. 72-77 (дата обращения: 01.08.2021).
227. Gerling, D. Electrical machines: Mathematical fundamentals of machine topologies / D. Gerling. – DOI 10.1007/978-3-642-17584-8 // Springer. – 2015. – P. 472 (дата обращения: 01.08.2021).
228. Gibbons, J. Nonparametric statistical inference / J. Gibbons, S. Chakraborti. – DOI 10.1201/9781439896129 // Chapman and Hall/CRC – 2010. – P. 650 (дата обращения: 01.08.2021).
229. Glowacz, A. Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging / A. Glowacz, Z. Glowacz. – DOI 10.1016/j.infrared.2016.12.003 // Infrared Physics & Technology. – 2017. – Vol. 81. – P. 7-16 (дата обращения: 01.08.2021).

230. Hughes, A. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications / URL: [https://www.academia.edu/40454756/Electric\\_Motors\\_and\\_Drives\\_Fundamentals\\_Types\\_and\\_Application\\_4th\\_Edition\\_Austin\\_Hughes\\_Bill\\_Drury](https://www.academia.edu/40454756/Electric_Motors_and_Drives_Fundamentals_Types_and_Application_4th_Edition_Austin_Hughes_Bill_Drury). – A. Hughes, B. Drury // USA, Waltham : Newnes. – 2013. – P. 440 (дата обращения: 01.08.2021).
231. Inactive power detection in AC network / N. I. Schurov, S. V. Myatezh, A. V. Myatezh [et al.]. – DOI 10.11591/ ijce.v11i2.pp966-974// International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2021. – Vol. 11. – No 2. – P. 966-974 (дата обращения: 01.08.2021).
232. Information and measurement system for control of technical state of asynchronous electric motors with group supply from frequency converter / A. A. Radionov, A. S. Karandaev, S. A. Evdokimov [et al.] . – DOI 10.1109/ APEIE.2014.7040897// 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE 2014 : Proceedings, Novosibirsk, 02–04 октября 2014 года. – Novosibirsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2014. – P. 280-285 (дата обращения: 01.08.2021).
233. In'kov, Y. M. A two-system freight electric locomotive for railroads of the Russian Federation / Y. M. In'kov, V. V. Litovchenko, V. P. Feoktistov. – DOI 10.3103/S1068371214030079 // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85. – No 3. – P. 176-182 (дата обращения: 01.08.2021).
234. Instrumental evaluation of traction machines sparking / N. Kolobashkin, B. Dorzieva, E. Beyerleyn [et al.] . – DOI 10.1051/matecconf/201714101034 // MATEC Web of Conferences, Tomsk, 09-13 октября 2017 года. – Tomsk: EDP Sciences, 2017. – P. 01034 (дата обращения: 01.08.2021).
235. Izotov, A. Study of feasibility of controlling tribological situation in sliding current collection assembly of electric machines / A. Izotov, V. Timoshenko, S. Izotov. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112029 // International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, 18-22 May 2020. Sochi. – 2020 – P. 160947 (дата обращения: 01.08.2021).
236. Kazakov, Y. B. Analysis of electromechanical processes in asynchronous machines during tests by the loading-back method with energy recovery in the network / Y. B. Kazakov, I. A. Palilov, I. V. Gulyaev. – DOI 10.3103/S1068371220010058 // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 91. – No 1. – P. 1-7 (дата обращения: 01.08.2021).
237. Kazakov, Y. B. Research related electromechanical processes in an asynchronous traction motor - Asynchronous generator with common shaft based on field model / Y. B. Kazakov, I. A. Palilov. – DOI 10.15598/aeee.v13i5.1388 // Advances in

Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – Vol. 13. – No 5. – P. 442-446 (дата обращения: 01.08.2021).

238. Kharlamov, V. V. Development and research of method of reducing losses in asynchronous motors testing by mutual loads / V. V. Kharlamov, D. I. Popov. – DOI 10.1109/Dynamics47113.2019.8944557 // Dynamics of systems, mechanisms and machines (dynamics) : XIII International scientific and technical conference, Omsk, 05-07 ноября 2019 года. – Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2019. – Р. 8944557 (дата обращения: 01.08.2021).

239. Kharlamov, V. V. Increased efficiency of tests of electric machines of various types / V. V. Kharlamov, D. I. Popov. – DOI 10.1088/1742-6596/1260/5/052008// Journal of Physics: Conference Series : Mechanical Science and Technology Update, Omsk, 23-24 апреля 2019 года. – Omsk: IOP Publishing. – 2019. – Р. 052008 (дата обращения: 01.08.2021).

240. Kharlamov, V. V. Mathematical modeling of physical processes in the complex for testing of induction machines / V. V. Kharlamov, D. I. Popov. – DOI 10.1051/matecconf/201823901055 // MATEC Web of Conferences, Novosibirsk, 16-19 мая 2018 года. – Novosibirsk: EDP Sciences. – 2018. – Р. 01055 (дата обращения: 01.08.2021).

241. Klopp, R. W. The role of brush spring kinking in a generator flash-over incident / R.W. Klopp, R. Dugnani, J.S. Edmonds. – DOI 10.1109/NAPS.2011.6024879 // North American Power Symposium, 4 August 2011. – USA, Boston. – 2011. – Р. 1-6 (дата обращения: 01.08.2021).

242. Kopecký, J. Diagnostika kluzného kontaktu s využitím praktické aplikace «metody prachových částic»: Diplomová práce / J. Kopecký. – URL: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=67743](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67743) // Vysoké učení technické v Brně. Brno. – 2013. – S. 64 (дата обращения: 01.08.2021).

243. Kubin, J. Pairing of traction DC motors, long term experiencies from practice and simulations / J. Kubin, Ž. Ferková, A. Richter. – DOI: 10.1109/EDPE.2019.8883885 // International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), 24-26 September 2019, The High Tatras, Slovakia. – 2019. – Р. 201-206 (дата обращения: 01.08.2021).

244. Lipnicki, P. The effect of change in DC link series resistance on the AC/AC converter operation: power converters embedded diagnostics / P. Lipnicki, D. Lewandowski, M. Orkisz. – DOI 10.1109/CATCON.2013.6737484 // Proc. of the IEEE 1st Intern. Conf. on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON). – 2013. – Р. 122-127 (дата обращения: 01.08.2021).

245. Mironov, A. A. Analysis of the degree of sparkling of certain commutator plates of electric machines by the photo-stroboscopic method / A. A. Mironov, R. K. Saifutdinov. – DOI 10.3103/S1068371216020140 // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87. – No 2. – P. 59-61 (дата обращения: 01.08.2021).
246. Mukerji, S. K. Electromagnetics for Electrical Machines / S. K. Mukerji, A. S. Khan, Y. P. Singh. – DOI 10.1201/9781315222523 // CRC Press. – 2015. – P. 421 (дата обращения: 01.08.2021).
247. Pairing of traction DC motors, long term experiences from practice and simulations / J. Kubín, Ž. Ferková, A. Richter. – DOI 10.1109/EDPE.2019.8883885 // International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia. – 2019. – P. 201-206 (дата обращения: 01.08.2021).
248. Shantarenko, S. Contact interaction "brush - Collector" and working efficiency of locomotive traction electric motor / S. Shantarenko, E. Ponomarev, A. Borodin. – DOI 10.1051/matecconf/201823901037 // MATEC Web of Conferences, Novosibirsk, 16-19 мая 2018 года. – Novosibirsk: EDP Sciences, 2018. – P. 01037 (дата обращения: 01.08.2021).
249. Saka, N. The role of tribology in electrical contact phenomena / N. Saka, M. G. Llou, N. P. Suh. – DOI 10.1016/0043-1648(84)90007-3// Wear. – 1984. – Vol. 100. –P. 77-105 (дата обращения: 01.08.2021).
250. Smarandescu, I. D. Considerations on designing and simulation of an induction motor drive system for an electric locomotive / I. D. Smarandescu, R.-F. Marinescu, M.-S. Nicolae. – DOI 10.1109/MPS.2017.7974436 // International Conference on Modern Power Systems (MPS), 6-9 June 2017. Cluj-Napoca. – 2017 (дата обращения: 01.08.2021).
251. Steimel, A. Power-electronic grid supply of AC railway systems / A. Steimel. – DOI 10.1109/OPTIM.2012.6231844 // 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). – 2012. – P. 16-25, (дата обращения: 01.08.2021).
252. The influence of mechanical factors in alternating-current collector machines on level of radio noise / A. I. Izotov, G. A. Mamaev, V. N. Timoshenko [et al.]. – Text : electronic // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – No 8. – P. 463-465. – DOI 10.3103/S1068371213080075 (дата обращения: 01.08.2021).
253. The simulation model of sliding contact with three degrees of freedom and distributed parameters of the transition layer / I. Plohov, A. Ilyin, O. Kozyreva, [et al.]. – DOI 10.17770/etr2015vol1.229 // Vide. Tehnologija. Resursi - Environment,

Technology, Resources : 10, Rezekne, 18–20 июня 2015 года. – Rezekne. – 2015. – P. 182-185 (дата обращения: 01.08.2021).

254. Tong, W. Mechanical Design of Electric Motors / W. Tong. – DOI 10.1201/b16863 // CRC Press. – 2014. – P. 736 (дата обращения: 01.08.2021).

255. Tsybikov, B. Comparison of energy efficiency determination methods for the induction motors / B. Tsybikov, E. Beyerleyn, P. Tyuteva. – DOI 10.1051/matecconf/20179101034 // MATEC Web of Conferences : 4, Tomsk, 10–14 октября 2016 года. – Tomsk. – 2016. – P. 01034 (дата обращения: 01.08.2021).

256. Vector control techniques for traction drive with induction machines - comparison / L'. Struharňanský, J. Vittek, P. Makýš [et al.] .– DOI 10.1016/j.proeng.2017.06.147 // Procedia Eng. – 2017. – Vol. 192. – P. 851-856 (дата обращения: 01.08.2021).

257. Veltman, A. Fundamentals of Electrical Drives, Power Systems / A. Veltman, D. Pulle, R. De Doncker. – DOI 10.1007/978-3-319-29409-4 // Springer. – 2016. – P. 341 (дата обращения: 01.08.2021).

258. Veselka, F. Metoda prachových částic / F. Veselka, V. Zaboin – URL : [http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Elektr/2019/08/Elektr\\_08\\_2019/index.html#p=95](http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Elektr/2019/08/Elektr_08_2019/index.html#p=95) // Electro. – 2019. – Vol. 29. – No. 8-9. – P. 94-96 (дата обращения: 01.08.2021).

259. Zhou, Y. A study of a novel AC-DC-AC matrix converter with high voltage transfer ratio / Y. Zhou. – DOI 10.1109/ICBMEI.2011.5921068 // International conference on business management and electronic information. – 2011. – P. 721-725 (дата обращения: 01.08.2021).

## Приложение А



**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 168633

**СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ И ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Харlamov Victor Vasильевич (RU), Popov Denis Igorevich (RU), Litvinov Artem Valерьевич (RU), Dankovtsev Vyaçeslav Tikhonovich (RU), Luzin Vladimir Mihailovich (RU), Molchanov Victor Vasильевич (RU)*

Заявка № 2016139746

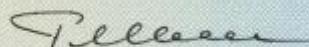
Приоритет полезной модели **10 октября 2016 г.**

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации **13 февраля 2017 г.**

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает **10 октября 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 170708

**СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ И ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ (НЕЗАВИСИМЫМ)  
ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Харламов Виктор Васильевич (RU), Попов Денис Игоревич (RU), Литвинов Артем Валерьевич (RU), Данковцев Вячеслав Тихонович (RU), Лузин Владимир Михайлович (RU), Молчанов Виктор Васильевич (RU)*

Заявка № 2016139744

Приоритет полезной модели **10 октября 2016 г.**

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации **03 мая 2017 г.**

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает **10 октября 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивашов





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 178716

Стенд для испытания асинхронных двигателей методом  
взаимной нагрузки

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Омский  
государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Харlamov Виктор Васильевич (RU),  
Попов Денис Игоревич (RU)*

Заявка № 2017143232

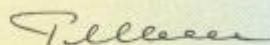
Приоритет полезной модели 11 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 17 апреля 2018 г.

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 11 декабря 2027 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2652174

**Способ измерения момента на валу двигателя и частоты  
вращения его ротора**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Омский  
государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Харламов Виктор Васильевич (RU), Попов Денис  
Игоревич (RU), Шкодун Павел Константинович (RU)*

Заявка № 2017102628

Приоритет изобретения 26 января 2017 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 25 апреля 2018 г.  
Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 26 января 2037 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивашев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

на полезную модель

№ 184839

**Стенд для испытания асинхронных машин и машин  
постоянного тока**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Омский  
государственный университет путей сообщения" (RU)*

Автор: *Попов Денис Игоревич (RU)*

Заявка № 2018126407

Приоритет полезной модели 17 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 12 ноября 2018 г.

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 17 июля 2028 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 186188

**Стенд для испытания асинхронных машин**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Автор: *Попов Денис Игоревич (RU)*

Заявка № 2018133027

Приоритет полезной модели 17 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 11 января 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 17 сентября 2028 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Иблиев*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2691778

**Стенд для испытания асинхронных машин и способ их  
нагружения**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Омский  
государственный университет путей сообщения" (RU)*

Автор: *Попов Денис Игоревич (RU)*

Заявка № 2018126436

Приоритет изобретения 17 июля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 июня 2019 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 17 июля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин



**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 192278**

**Стенд для испытания асинхронного двигателя**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Харламов Виктор Васильевич (RU),  
Попов Денис Игоревич (RU)*

Заявка № 2019115635

Приоритет полезной модели **21 мая 2019 г.**

Дата государственной регистрации в

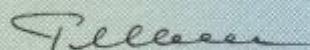
Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации **11 сентября 2019 г.**

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает **21 мая 2029 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильин



**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2706449**

**Способ испытания асинхронных двигателей методом  
взаимной нагрузки**

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Омский  
государственный университет путей сообщения" (RU)**

Авторы: **Харlamov Виктор Васильевич (RU),  
Попов Денис Игоревич (RU)**

Заявка № **2019108116**

Приоритет изобретения **21 марта 2019 г.**

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **19 ноября 2019 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **21 марта 2039 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

G.P. Ильин



**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2712741**

**Способ нагружения асинхронного двигателя при его испытании методом взаимной нагрузки**

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)**

Авторы: **Харламов Виктор Васильевич (RU),  
Попов Денис Игоревич (RU)**

Заявка № 2019110694

Приоритет изобретения 10 апреля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 31 января 2020 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 10 апреля 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 195604**

**Стенд для автоматизированных испытаний асинхронного  
двигателя**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Омский  
государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Харlamov Виктор Васильевич (RU),  
Попов Денис Игоревич (RU)*

Заявка № 2019132469

Приоритет полезной модели 14 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 03 февраля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 14 октября 2029 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин







РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## • ПАТЕНТ •

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2757784

Способ определения остаточного ресурса электрошеток  
тягового электродвигателя

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Харламов Виктор Васильевич (RU), Попов Денис Игоревич (RU)*

Заявка № 2021103446

Приоритет изобретения 11 февраля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 октября 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 11 февраля 2041 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Налимов



## Приложение Б



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



# СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2021680874**

**Определение остаточного ресурса электрических щеток  
тяговых двигателей по данным эксплуатации бортовой  
системы подвижного состава**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Омский  
государственный университет путей сообщения» (RU)*

Авторы: *Байсадыков Марсель Фаритович (RU), Харламов  
Виктор Васильевич (RU), Попов Денис Игоревич (RU),  
Петров Павел Геннадьевич (RU), Сергеев Роман  
Владимирович (RU), Шкодун Павел Константинович (RU)*

Заявка № **2021669687**

Дата поступления **30 ноября 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **15 декабря 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин



## Приложение В

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор департамента категорийной  
стратегии ООО «ЛокоТех»

 Д. В. Лютегин  
30 » Июня 2020 г.

**АКТ**  
**внедрения результатов научной работы**

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель работ, зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) Харламов В. В., с одной стороны, и начальник отдела категорийной стратегии и реализации проектов ООО «ЛокоТех» Шелехов Д. В., с другой стороны, составили акт о том, что результаты научной работы сотрудников Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) внедрены в процесс эксплуатации подвижного состава в ООО «ЛокоТех».

**Наименование внедренных в производственный процесс результатов научной работы:**

- 1) способ прогнозирования износа электрощеток тяговых электродвигателей с учетом показателей, измеряемых при эксплуатации подвижного состава (разработчик – к.т.н., доцент Попов Д. И.);
- 2) способ оценки влияния диагностических параметров коллекторно-щеточного узла на эксплуатационные показатели тяговых электродвигателей подвижного состава (разработчик – к.т.н., доцент Шкодун П. К.).

**Технико-экономическая эффективность разработок** обусловлена повышением эксплуатационных характеристик подвижного состава и снижением затрат на его техническое обслуживание.

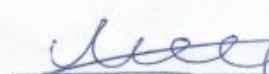
От ОмГУПСа:

руководитель работ  
зав. кафедрой «Электрические  
машины и общая электротехника»  
ОмГУПС, д.т.н., профессор

 В. В. Харламов

От ООО «ЛокоТех»:

Начальник отдела категорийной  
стратегии и реализации проектов  
ООО «ЛокоТех»

 Д. В. Шелехов



УТВЕРЖДАЮ

Начальник управления  
П. Восточно-Сибирской ж.д.  
М.С. Дудников  
03 2020 г.

## Акт

о внедрении результатов диссертационной работы

Попова Дениса Игоревича,

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

## Комиссия в составе

Заместитель начальника СЛД-80 по ремонту Пустовой П.В.

Заместитель начальника СЛД-80 по качеству Абанин П.С.

И.о главного технолога СЛД-80 Сахнюк А.В.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Попова Д. И. внедрены в производственный процесс на предприятии ООО «Локо Тех-Сервис».

Внедрены следующие разработки, выполненные в рамках диссертационной работы:

схема испытания асинхронных электродвигателей

методом их взаимной нагрузки.

Внедрение данных разработок позволило снизить потери мощности в испытательной установке и повысить уровень автоматизации испытаний.

Заместитель начальника СЛД-80 по ремонту П. В. ПустовойЗаместитель начальника СЛД-80 по качеству Абанин П.С.

И.о. главного технолога СЛД-80

Сахнюк А.В.

Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики  
железнодорожного транспорта ОАО «НИИТКД»

## АКТ

от «16» 12 2020 г.  
г. Омск

«УТВЕРЖДАЮ»



Д. Э. Тиссен  
12 2020 г.

Об использовании результатов  
научных исследований и разработок  
на производстве

Основание: разработка Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), выполненная к.т.н., доцентом Поповым Денисом Игоревичем.

Наименование разработки:

**«Стенд для испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки».**

Разработка выполнена в рамках работы по подготовке диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

Составлен комиссией в составе:

Представителя предприятия – ОАО «НИИТКД»:

главный инженер ОАО «НИИТКД» Елисеев С. В. – председатель комиссии;

начальник отдела разработки электронных систем Скляр А. В.;

главный конструктор ОАО «НИИТКД» Лифанов М. В.

Представители ОмГУПСа:

заведующий кафедрой, профессор, д. т. н. Харламов В. В.;

доцент, к. т. н. Попов Д. И.

**1. Разработка ОмГУПСа, характеризуемая основными особенностями (признаками):**

предлагаемое техническое решение позволяет упростить конструкцию испытательных стендов и повысить точность определения частоты вращения асинхронных двигателей.

**2. Способ измерения момента на валу двигателя и частоты вращения его ротора принят к использованию при разработке испытательных стендов в ОАО «НИИТКД».**

**3. Предложения о дальнейшем использовании и другие замечания:**

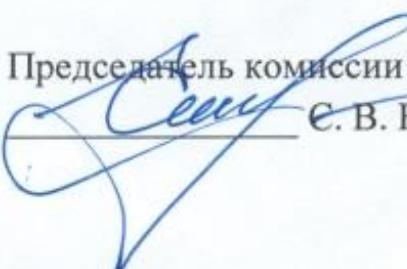
Рекомендуется широкое использование указанной в акте разработки ОмГУПСа на предприятиях, занимающихся ремонтом, техническим обслуживанием и испытаниями электрических машин.

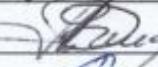
Составлен в трех экземплярах:

1-й экземпляр – ОмГУПС, НИЧ;

2-й экземпляр – ОАО «НИИТКД»;

3-й экземпляр – ОмГУПС, разработчику.

Председатель комиссии  
  
 С. В. Елисеев

Члены комиссии  
  
 А. В. Скляр  
  
 М. В. Лифанов  
  
 В. В. Харламов  
  
 Д. И. Попов

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ТПИ»

И. Е. Шабанов  
02 2020 г.

## Акт

о внедрении результатов диссертационной работы

Попова Дениса Игоревича,

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Комиссия в составе генерального директора Шабанова И.Е., главного инженера Титанакова Д. А., инженера Семенова Е. В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Попова Д. И. используются в процессе производства стендов, предназначенных для испытания асинхронных двигателей.

Внедрены следующие разработки, выполненные в рамках диссертационной работы:

- 1) схема испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки;
- 2) программа «Расчет параметров схемы испытаний АД-ДГ».

Внедрение данных разработок позволило снизить потери мощности в установке, автоматизировать ряд расчетов в процессе проектирования стендов для испытания асинхронных двигателей и повысить точность расчетов.

главный инженер, к.т.н., доцент

инженер

Д. А. Титанаков

Е. В. Семенов

«Утверждаю»

Главный инженер ООО «Омский завод транспортной электроники»

 С. А. Придатко

«од» 16 2019 г.

**АКТ**  
**внедрения результатов диссертационной работы**  
**Попова Дениса Игоревича**

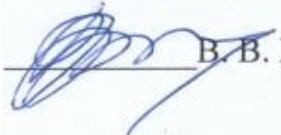
Мы, нижеподписавшиеся, руководитель работ заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения Харламов В. В., с одной стороны, и заместитель директора по разработкам ООО «Омский завод транспортной электроники» А. П. Домбровский, с другой стороны, составили акт о том, что результаты, полученные Поповым Д. И. в процессе выполнения диссертационной работы, представляемой на соискание ученой степени доктора технических наук, приняты к использованию и внедрены в технологические процессы разработки и изготовления стендов для испытания асинхронных двигателей.

Наименование внедренных в производственный процесс результатов диссертационной работы: **схема испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки.**

Технико-экономическая эффективность разработки обусловлена снижением энергопотребления стендов для испытания асинхронных двигателей.

От Омского государственного университета путей сообщения:

руководитель работ  
зав. кафедрой  
«Электрические машины и  
общая электротехника»,  
профессор

  
В. В. Харламов

От ООО «Омский завод транспортной электроники»:

заместитель директора  
по разработкам  
ООО «Омский завод



А. П. Домбровский

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО НПО "ОМИКС"

 Е. В. Молчанов«25» сентября 2019 г.

## Акт

о внедрении результатов диссертационной работы

Попова Дениса Игоревича,

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Комиссия в составе заместителя генерального директора Одинцова П.В., главного инженера Жукова И.С., инженера Рыболовлева В.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Попова Д. И. используются в процессе разработки стендов, предназначенных для испытания электродвигателей.

Внедрены следующие разработки, выполненные в рамках диссертационной работы:

**способ измерения момента на валу двигателя  
и частоты вращения его ротора.**

Внедрение данных разработок позволило повысить технологичность и точность измерительной аппаратуры, входящей в состав стендов для испытаний электродвигателей.

Зам. генерального директора

Главный инженер

Инженер



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
 ФГБОУ ВО «Омский государственный  
 университет путей сообщения  
 (ОмГУПС (ОМИИТ))»

Т. В. Комякова  
«30» 08 2021 г.



## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
 Попова Дениса Игоревича в учебный процесс  
 в Омском государственном университете путей сообщения

Комиссия в составе:

Баландина С. А. – к. и. н., доцента, начальника учебно-методического управления,

Сергеева Р. В. – к. т. н., доцента, директора института электрического транспорта и систем энергообеспечения,

Харламова В. В. – д. т. н., профессора, заведующего кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», составила акт в том, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук Попова Д. И., а именно: подход к математическому моделированию электротехнических комплексов, предназначенных для испытаний электрических машин методом взаимной нагрузки, математические модели испытательных комплексов, эффективные методы испытаний внедрены в учебный процесс в Омском государственном университете путей сообщения.

Указанные результаты используются при изучении дисциплины «Электромеханика и электрические аппараты» аспирантами, обучающимися по направлению подготовки «Электро- и теплотехника», направленности «Электромеханика и электрические аппараты» и углубленной самостоятельной и научно-исследовательской работе студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника», направленности «Электроэнергетические системы и сети», специальности «Подвижной состав железных дорог», специализации «Электрический транспорт железных дорог» и специальности «Системы обеспечения движения поездов», специализации «Электроснабжение железных дорог».

Начальник учебно-методического  
управления

С. А. Баландин

Директора института электрического  
транспорта и систем энергообеспечения

Р. В. Сергеев

Заведующий кафедрой «Электрические  
машины и общая электротехника»

В. В. Харламов