

ОВЧАРОВ С.В.

РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ  
СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

2012 год

### **Рецензенты:**

Иноземцев Г.Б. – доктор технических наук, профессор Национального университета биоресурсов и природопользования Украины

Никифорова Л.Е. – доктор технических наук, профессор Таврического государственного агротехнологического университета

В книге изложены научно-технические основы ресурсоэнергосберегающих эксплуатационных режимов работы силового электрооборудования в агропромышленном комплексе и предложены электротехнические устройства их обеспечения.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ	9
1.1 Тенденции развития энергосбережения в мировой экономике	9
1.2 Состояние проблемы энергосбережения в агропромышленном комплексе	14
1.3 Энергосбережение в электротехнических и электротехнологических установках	20
1.3.1 Характеристика электроприводов сельскохозяйственных рабочих машин	20
1.3.2 Характеристика ресурсоэнергосбережения в силовых трансформаторах	27
1.4 Эксплуатационная надежность силового электрооборудования в агропромышленном комплексе	28
1.5 Анализ влияния эксплуатационных воздействий на развитие процессов повреждения силового электрооборудования в агропромышленном комплексе	32
РАЗДЕЛ 2. ПОТЕРИ АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ	39
2.1 Общие положения	39
2.2 Потери активной энергии в асинхронном электродвигателе в функции мощности на валу	39
2.3 Потери активной энергии в асинхронном электродвигателе в функции скольжения	52
2.4 Скольжение асинхронного электродвигателя в функции загрузки со стороны рабочей машины	59
2.5 Скольжение асинхронного электродвигателя в функции уровня питающего напряжения и загрузки со стороны рабочей машины	63

2.6 Скольжение асинхронного электродвигателя в функции асимметрии питающего напряжения и загрузки со стороны рабочей машины	66
2.7 Скольжение асинхронного электродвигателя при неполнофазном питании	72
2.8 Потери активной энергии в асинхронном электродвигателе в функции температуры окружающей среды и загрузки со стороны рабочей машины	78
2.9 Потери активной энергии в асинхронном электродвигателе под влиянием комплекса эксплуатационных воздействий	81
2.10 Способ обеспечения энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя	86
<b>РАЗДЕЛ 3. РАСХОД РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ</b>	<b>88</b>
3.1 Общие закономерности теплового старения изоляции электрических машин	88
3.2 Закономерности старения изоляции под воздействием температуры и электродинамических сил	91
3.3 Влияние воздействия химически активных сред и влаги на износ изоляции	95
3.4 Тепловые переходные процессы в асинхронном электродвигателе как системе двух тел	96
3.5 Способ диагностирования расхода ресурса изоляции асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в эксплуатационных условиях	105
<b>РАЗДЕЛ 4. РАСХОД РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ</b>	<b>108</b>
4.1 Тепловые переходные процессы в силовом трансформаторе как системе трех тел	108

4.2	Тепловые переходные процессы в силовом трансформаторе при циклической нагрузке	119
4.3	Влияние графика нагрузки на процессы теплового износа изоляции силового трансформатора	122
4.4	Способ дистанционного функционального диагностирования режимов работы силовых трансформаторов	125
4.5	Ресурсосберегающий режим параллельной работы силовых трансформаторов	128
<b>РАЗДЕЛ 5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СОИЗМЕРИМОЙ МОЩНОСТИ</b>		132
5.1	Постановка вопроса	132
5.2	Электромеханические переходные процессы при пуске асинхронных двигателей	132
5.2.1	Электромеханический переходный процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с независимой от скорости механической характеристикой	136
5.2.2	Электромеханический переходный процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с линейно-возрастающей механической характеристикой	141
5.2.3	Электромеханический переходный процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с нелинейно-возрастающей механической характеристикой	146
5.3	Тепловые переходные процессы при пуске асинхронного электродвигателя в условиях соизмеримой мощности	151
5.3.1	Общие положения.	151
5.3.2	Тепловой переходный процесс при пуске системы «электродвигатель – рабочая машина» с независимой от скорости механической характеристикой	157

5.4 Анализ влияния параметров системы «электродвигатель - рабочая машина» с независимой от скорости механической характеристикой на электромеханические и тепловые переходные процессы при пуске двигателя	160
5.5 Тепловой износ изоляции в послепусковой период	170
<b>РАЗДЕЛ 6. РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВОДА ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ РАБОЧИХ МАШИН</b>	<b>176</b>
6.1 Общие вопросы	176
6.2 Потери активной мощности в асинхронных электродвигателях привода параллельно работающих насосных агрегатов	176
6.3 Облегчение аварийных режимов работы электродвигателей привода насосных агрегатов	185
<b>РАЗДЕЛ 7. РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРООТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ</b>	<b>198</b>
7.1 Общие положения	198
7.2 Суточные режимы нагрузки объединенной энергетической системы Украины и особенности электропотребления	199
7.3 Технические средства преобразования электрической энергии в тепловую на принципе «катушки в стали»	201
7.3.1 Теоретическое обоснование	201
7.3.2 Экспериментальное исследование преобразователя «катушка в стали»	209
7.3.3 Теплоотдача в окружающую среду от отапливаемых помещений в течение суток	212
7.3.4 Регулирование мощности теплоносителя с преобразователем «катушка в стали»	216
7.3.5 Переходный процесс при включении преобразователя «катушка в стали» в сеть	219

7.3.6	Переходный процесс при выключении преобразователя «катушка в стали»	222
7.3.7	Обоснование параметров преобразователя «катушка в стали»	225
7.4	Разработка проточного водонагревателя трансформаторного типа	235
7.5	Использование ветровой энергии для электроотопления	238
7.5.1	Физические основы использования ветровой энергии	238
7.5.2	Обоснование конструктивных и энергетических параметров ветроэнергетической установки с вращающимся парусом	240
<b>РАЗДЕЛ 8. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ</b>		<b>245</b>
8.1	Электротехническая система обеспечения энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя	245
8.2	Электротехническая система обеспечения дистанционного диагностирования ресурсосберегающих эксплуатационных режимов работы силового трансформатора и асинхронного электродвигателя	249
8.3	Электротехническая система облегчения пусковых режимов асинхронного электродвигателя в условиях соизмеримой мощности	255
8.4	Электротехническая система ресурсоэнергосбережения асинхронных электродвигателей привода параллельно работающих насосных агрегатов	258
8.5	Преобразователи электрической энергии в тепловую	263
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>		<b>268</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Энергетическая проблема, которая сегодня является чрезвычайно актуальной практически для всех стран мира, особенно остро ощущается в Украине, которая лишь на 35-40% способна удовлетворить свои потребности собственными топливно-энергетическими ресурсами и которая имеет энергоемкие отрасли народного хозяйства.

Для повышения эффективности агропромышленного комплекса агроинженерная наука должна определить первоочередные задачи экономии топливно-энергетических ресурсов и обосновать методы и способы уменьшения их потерь и на этой основе разработать как энергоресурсосберегающие энергетические устройства, так и режимы их работы.

В Украине существует народно-хозяйственная проблема энергоресурсосбережения при использовании электрической энергии.

Суть проблемы состоит в том, что энергоёмкость отечественного валового продукта Украины в два-три раза больше чем у других стран; до 20% эксплуатируемых электродвигателей, до 7% силовых трансформаторов и 3% кабельных линий в агропромышленном комплексе ежегодно выходят из строя.

Причины существования проблемы состоят в существенном технологическом отставании большинства отраслей экономики Украины, в частности агропромышленной, от уровня других стран; в отсутствии эффективных методов энергоресурсосбережения при эксплуатации электрооборудования.

Негативные последствия нерешенности проблемы состоят в дополнительном повышении себестоимости продукции за счет значительных потерь электрической энергии в силовом электрооборудовании, дополнительных затрат на ремонт электрооборудования и технологических убытков, вызванных отказами электрооборудования.

Поэтому научно – техническая проблема теоретического обоснования энергоресурсосберегающих эксплуатационных режимов работы силового электрооборудования в агропромышленном комплексе и разработки электротехнических систем их обеспечения является актуальной и требует своего разрешения.

# **РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ**

## **1.1 Тенденции развития энергосбережения в мировой экономике**

Энергетическая проблема, которая сегодня является чрезвычайно актуальной практически для всех стран мира, особенно остро ощущается в Украине, которая лишь на 35 – 40% способна удовлетворить свои потребности собственными топливно-энергетическим ресурсами и которая имеет такие энергоемкие отрасли промышленности как химия и нефтехимия, металлургия, машиностроение и металлообработка, производство строительных материалов.

Ретроспективный анализ развития мировой экономики показывает возрастающую роль энергосберегающих технологий в обеспечении эффективности хозяйствования. Динамические сдвиги, которые состоялись на мировых рынках энергоносителей за последние 20-30 лет, показали, что энергетические кризисы могут коренным образом менять структуру народного хозяйства отдельных стран, их роль и место в международном рыночном пространстве. Поэтому экономическая политика разных стран мира в значительной мере формируется в зависимости от имеющихся запасов энергоресурсов, их возможностей удовлетворять нужды народного хозяйства. Резкий рост цен на энергоресурсы на мировых рынках, нестабильность спроса и предложений на них побуждают к тому, что в мировой экономике все большего признания приобретает политика активного вмешательства государства в формирование и реализацию энергосберегающих технологий.

По оценкам специалистов, всемирный энергетический кризис 80-х годов оказал непосредственное влияние на дальнейшее усовершенствование энергетической политики всех государств. Символом безопасности развития

государства и даже его суверенности стали соответствующим образом разработанная национальная энергетическая программа каждой страны и механизмы ее реализации. Особое внимание в большинстве стран мира начали уделять энергосбережению. Опыт показывает, что целесообразно идти путем научно-технического прогресса при резком ограничении роста потребления топлива и энергии со следующей стабилизацией, а потом и снижением. Имеется в виду усовершенствование энергопроизводящих и энергопотребляющих технологий на основе глубоких изменений структуры производственных сил общества. Это может стать движущей силой такого научно-технического прогресса, который бы гарантировал своевременность результатов и эффективность использования энергоресурсов. И если энергосбережение во всем мире станет играть такую же значительную роль в решении энергетической проблемы, как в развитых странах в последнее двадцатилетие, то прогноз потребления 2030 года может оказаться значительно завышенным.

С учетом энергосбережения прогнозные показатели на будущее относительно объемов потребления энергоресурсов можно оценить по выражению [1]:

$$W_1 = W_{90}(2 - e)^{t/40}, \quad (1)$$

где  $e$  - средняя часть прироста энергии за счет энергосбережения.

О реальности такого уменьшения затрат красноречиво свидетельствует опыт развитых стран, которые за два последних десятилетия достигли в этом направлении существенных успехов.

Например, в США при росте потребления энергии от 1973 по 1987 год на 3,2% валовый национальный продукт (ВНП) вырос на 41,2%.

В странах ЕС при росте ВНП на 13% потребление энергии в 1985 году было на 6% меньшим, чем в 1979 году.

Известны примеры, когда государства, которые не имеют собственных энергетических ресурсов, достигли значительных успехов в промышленном развитии благодаря логической энергетической политике и умению вырабатывать продукцию, которая имеет высокую потребительскую стоимость с минимальными затратами энергии. К таким государствам принадлежат Япония, Южная Корея, Тайвань. Именно эти страны на практике довели целесообразность и высокую эффективность вложения капиталов в развитие ресурсосберегающих и, прежде всего, энергосберегающих технологий. В Японии ВВП в 80-тые годы возрастал в среднем на 4,6% за год, а энергопотребление за этот период практически не увеличилось. Поэтому большинство стран мира придают большое значение формированию политики энергосбережения на основе технологического переоснащения производственных процессов, структурной перестройки производства, усовершенствованию механизмов управления энергоресурсами.

Все это свидетельствует о том, что энергоемкость ВВП становится главным, хотя, возможно, и не безоговорочным критерием эффективности экономики государств. Нужно отметить, что Украина по сравнению с развитыми странами мира имеет очень высокий и неэффективный уровень потребления энергоресурсов. Если в странах Европейского Союза за период 1973-1993 годов энергоемкость ВВП уменьшилась на 23,8 %, то в Украине она возрастала и достигла в 1996 году неприличной для цивилизованной страны границы, превысив энергоемкость ВВП стран ЕС в 17 раз.

Новая экономическая и энергетическая ситуация, в которой оказалось государство в процессе реформирования, нуждается в разработки соответствующей технологии решения этой проблемы. Существуют три главных направления уменьшения затрат энергоресурсов.

Первое направление чрезвычайно высокоэффективное и малозатратное для начальной стадии осуществления энергосберегающей политики – это рационализация использования топлива и энергии. В отличие от развитых

стран, в Украине значительное количество энергоресурсов тратится на производство неконкурентноспособных товаров, строительство объектов с повышенной теплоотдачей, с потерями в промышленности и сельском хозяйстве. За счет реализации этого направления можно сократить нужды в топливе и энергии на 12-15%.

Второе направление связано со структурной перестройкой экономики, изменением темпов развития энергоемких и менее энергоемких областей. Резерв уменьшения потребности в топливно-энергетических ресурсах за счет ускоренных структурных изменений в экономике страны составляет 10-12% от существующего потребления.

Третье направление предусматривает внедрение энергосберегающих технологий, процессов, аппаратов и оборудования в наиболее энергоемких областях и жилищно-коммунальном хозяйстве. В этом направлении возможное уменьшение на 25-30%.

Именно такие направления реализуют те государства, которые не имеют в достаточном количестве собственных энергоресурсов и вынужденные их импортировать.

Нельзя сказать, что проблемам энергосбережения раньше совсем не отводилось внимания. Государство с помощью постановлений на наивысшем уровне, а именно на основе административно-разрешающих мер государственного регулирования типа лимитов, штрафов, фондов, норм и тому подобное старалось предотвратить разбазаривание энергетических ресурсов. Но существенных снижений энергоемкости экономики не происходило. Эти постановления не перестраивали психологию потребителей топлива и энергии, не содействовали внедрению энергосберегающих технологий. Очевидно, что главным регулятором общественного отношения в этой сфере могут стать экономические рычаги. Общество должно не только экономически поощрять к реализации энергосберегающие технологии, но и помогать в их реализации. Для этого нужна разработка комплекса экономических льгот для

предприятий всех форм собственности, которые реализуют энергосберегающие меры путем изменения технологических процессов, уменьшения потерь энергии, использование вторичных энергоресурсов и тому подобное. Вместе с этим нужна система мер экономического «возмещения» за использование энергоресурсов свыше установленных норм и нормативов.

Решение этой проблемы необходимо искать в отработке механизмов побуждения производителей к разработке и внедрению прогрессивных энергосберегающих технологий. Реальное выживание большинства предприятий Украины в условиях энергетического кризиса будет зависеть от того, насколько полно они смогут использовать достижения научно-технического прогресса для технического переоснащения и снижения энергоемкости продукции. Исходя из этого, государственная политика энергосбережения должна тесно связываться с вопросами технического перевооружения областей промышленности и сельского хозяйства и структурной перестройкой народного хозяйства.

Учитывая современное состояние использования энергоресурсов в Украине, можно констатировать, что практически во всех областях есть значительные резервы снижения уровня использования энергоресурсов в существующих производственных процессах и прогрессивные разработки энергосберегающих технологий. Итак, решение проблемы снижения энергоемкости производственных процессов целесообразно начинать с исследований эффективности производства по критериям, которые определяют меру рациональности и целесообразности использования энергоресурсов, и разработки экономических механизмов, которые побуждают производителей к внедрению энергосберегающих технологий. Тормозящими факторами в решении проблемы в современных условиях есть недостатки существующих экономических механизмов управления энергоресурсами в стране.

В сущности, за последние годы использовался лишь ценовой фактор и наблюдались высокие темпы роста цен на энергоносители. В то же время ос-

лабились рычаги государственного контроля за эффективностью использования энергоресурсов на предприятиях разных форм собственности. В результате за годы реформирования сформировалась негативная тенденция опережения темпов затрат на энергоносители сравнительно с объемами производства. Это означает, что, несмотря на рост цен на энергоносители, затраты энергоресурсов на единицу продукции увеличиваются.

Мировой опыт хозяйствования свидетельствует о том, что рыночная экономика побуждает пользователей энергоресурсов рационально их использовать. Однако в условиях переходной экономики решение таких проблем есть много более сложным и нуждается в активном вмешательстве государственных рычагов.

Из этих позиций заслуживает внимания принятый в 1994 году Закон Украины «Об энергосбережении», в котором обусловлены основные принципы государственной политики энергосбережения.

Сегодня в Украине разработанные программы по энергосбережению, Закон «Об энергосбережении» дополняются целым рядом подзаконных актов, нормативных материалов, стандартов и инструкций. Решение этой проблемы приобретает конкретный характер.

Принимая во внимание современную ситуацию, каждая область народного хозяйства Украины уделяет больше внимания решению проблемы уменьшения количества потребления энергоресурсов, уже разработаны отраслевые программы достижения поставленной цели.

## **1.2 Состояние проблемы энергосбережения в агропромышленном комплексе**

В 80-е годы производство сельскохозяйственной продукции в Украине было в 4-5 раз больше энерго- и материалоемким, чем в США.

Кризис сельского хозяйства 90-х годов обусловил ухудшение его

энергетических и технико-экономических показателей. Сравнительно с 1985 годом в 1996 году затраты техногенной энергии уменьшились до 24,3 тысяч мегаджоулей на гектар или почти в 1,7 раза; воспроизведение органического вещества грунта – более чем вдвое; общая производительность агроэкосистемы – в 1,4 раза, а производительность работы – в 1,3 раза. Выросла удельная энергоемкость сельскохозяйственной продукции в 1,2-2,2 раза. При нынешних ценах на энергоносители удельный вес их в себестоимости продукции составляет 17-35%. Очевидно, что при таких затратах отечественному товаропроизводителю практически невозможно соревноваться с зарубежными конкурентами.

Высокий уровень затрат энергии объясняется многими факторами. В докризисный период ни в одной области сельского хозяйства не была завершена механизация, а за годы реформ ее уровень снизился, что побуждало рост удельных затрат работы и средств. Раньше, стараясь ускорить решение социальных вопросов, облегчить условия работы людей, часто механизацию осуществляли любой ценой, не считаясь с материальными и энергетическими затратами. Номенклатура техники, которая применяется, значительно увеличилась за последние годы. Практически на каждую сельскохозяйственную операцию в технологии производства создавалась отдельная машина, а иногда даже и не одна. Однооперационная техника резко увеличивает материалоемкость и затраты горючего.

Для повышения эффективности АПК агроинженерная наука должна определить первоочередные задачи для экономии топливно-энергетических ресурсов и обосновать методы и способы уменьшения их затрат и на этой основе разработать энерго- и ресурсосберегающее энергетическое оборудование и систему рабочих машин.

В сельском хозяйстве из общего количества энергии, которая принимает непосредственное участие в производстве продукции, только около 3% приходится на техногенную энергию. Поэтому системный поиск способов и

средств уменьшения затрат техногенной энергии на получение сельскохозяйственной продукции нужно вести на основе исследования макроэнергетической модели сельскохозяйственного производства в целом. Модель должна описывать процессы биоконверсии, а результаты ее анализа дадут возможность проецировать, исходя из максимума коэффициента энергетической эффективности растениеводства или животноводства, новые агротехнологии, машины и оборудование. Отдельные части такой модели наработанны в разных областях сельскохозяйственной науки. Настало время инженерной науке объединить эти результаты и создать макроэнергетическую модель – научно-методическую основу энергосбережения в сельскохозяйственном производстве.

Важным направлением экономии ресурсов являются новейшие ресурсосберегающие технологии. В Украине за последние годы разработана система технологий и машин для производства сельскохозяйственной продукции, которая охватывает все технологические и производственные операции и процессы, необходимые для получения конечной продукции. Значительную экономию энергоресурсов может дать внедрение новой техники, разработка которой предусмотрена «Национальной программой разработки и производства технологических комплексов машин и оборудования сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности», утвержденной Кабинетом Министров.

В растениеводстве значительные резервы энергосбережения имеют такие процессы: минимальная обработка грунта, применение которого позволяет уменьшить затраты горючего на 30%; дифференцированное внесение минеральных удобрений и ядохимикатов уменьшает норму затрат препаратов на 26-50%; комплексная подготовка грунта под посевы с помощью унифицированного семейства комбинированных плугов и многоцелевых фронтальных машин уменьшает в 2,5 раза номенклатуру машин и число проходов по полю и дает существенную экономию топлива, уменьшает металлоемкость; опти-

мизация состава автотракторного парка и оптимальное агрегатирование энергонасыщенных тракторов может обеспечить экономию редкого горючего на 15-20% и тому подобное. В животноводстве для приготовления кормов применяются кормоцеха типа КОРК-15, которые имеют высокую металлоемкость и требуют больших затрат энергии. В развитых странах один агрегат осуществляет все процессы приготовления и раздачи полнорационных кормосмесей с весовым групповым дозированием компонентов для всех видов поголовья или возрастных групп животных. Сравнительно с кормоцехами КОРК-15, такие агрегаты уменьшают на 70% капитальные вложения, на 30% – затраты работы, на 20% – затраты электроэнергии, на 15% повышают производительность животных. Системы доения и первичной переработки молока нуждаются сегодня в детальном и углубленном техническом и экономическом анализе. Длина молочных трубопроводов на ферме достигает одного километра. Транспортировка молока молокопроводом и его промывание требуют значительных затрат энергии и ухудшают качество молока. Технологический процесс доения коров связан с большими затратами работы оператора на переходы, перенесение грузов, установку и снятие доильных стаканов. Чтобы предотвратить эти недостатки, целесообразно использовать передвижные пневмоманипуляторы.

Одним из наиболее энергозатратных процессов является процесс создания микроклимата и обогрева ферм. Здесь нужно широко применять наиболее дешевую естественную приточно-вытяжную вентиляцию, утилизировать теплоту бросового воздуха и использовать ее для подогревания приточного воздуха, который на 30-40% уменьшает энергозатраты на обогревание ферм. Значительную экономию электроэнергии дает использование регулируемого электропривода. В сельском хозяйстве около 45% всех приводов – приводы насосов, вентиляторов, компрессоров, пневмотранспортеров. Применение регулируемого электропривода на этих механизмах позволяет уменьшить удельные затраты энергии на 20-40%.

Одним из наиболее эффективных направлений энергосбережения есть упорядочение теплообеспечения сельскохозяйственного производства и усовершенствование теплоэнергетического оборудования. В первую очередь нужно обратить внимание на технический уровень теплотехнического оборудования (котлов, теплогенераторов, электроводонагревателей, аккумуляторов тепла, автоматических теплорегуляторов), на переводение этого оборудования с жидкого топлива на газ, электроэнергию, на более широкое использование растительных отходов.

С целью экономии топлива нужно отказаться от лишних запариваний кормов, тепловых обработок продукции с применением пары; активнее использовать электротехнологию, лучевую энергию, автономные газовые горелки; предусматривать применение современных теплоизоляционных материалов в конструкциях стен, перекрытий, окон; сокращать потери в тепловых сетях, создавать автономные нагреватели, тепловые пункты.

Резервы экономии топливно-энергетических ресурсов в перерабатывающих областях АПК определяются усовершенствованием технологических процессов и обслуживания, внедрением новых энергосберегающих и малоотходных технологий, утилизацией вторичных энергоресурсов, повышением уровня эксплуатации оборудования и тому подобным.

В жилищно-коммунальном хозяйстве потенциал энергосбережения (до 30%) обуславливается улучшением теплофизических свойств зданий и сооружений, использованием прогрессивных систем освещения, повышением экономичности энергетического оборудования и электросетей, утилизацией теплоты, использованием тепловых насосов и тому подобным.

Выбор и использование наиболее экономичных электроприборов позволит существенно экономить электроэнергию. Правильная эксплуатация бытовых электроприборов предусматривает резервы экономии больше, чем это дает усовершенствование их конструктивного выполнения.

Весомое значение для уменьшения затрат традиционных видов топли-

ва и энергии на животноводческих и птицефермах, в коммунально-бытовом секторе имеет применение возобновляемых нетрадиционных источников энергии (ВНИЭ): солнца, ветра, вторичных энергоресурсов, тепловых помп.

Низкие темпы внедрения возобновляемых нетрадиционных источников энергии в сельское хозяйство Украины объясняются несколькими причинами. Прежде всего высокой ценой оборудования, ведь большей частью стоимость полученной энергии превышает стоимость энергии от обычных источников. Эффективность преобразования такой энергии пока что далека от теоретической границы, которая делает установки менее материалоемкими и дорогими. Надежность оборудования во многих случаях низкая. Это уменьшает коэффициент надежности этих установок, требует более частых ремонтов, удорожает эксплуатацию. Отсутствуют стандарты и гарантии на оборудование, которое производится.

Существует «замкнутый круг»: чтобы улучшить качество оборудования и снизить его цену, необходимо начать массовое промышленное производство. Промышленность может быть вовлечена в этот процесс лишь при условии существования развитого, достаточно вместительного рынка. Но такой рынок, в свою очередь, требует высокого качества и низкой цены оборудования.

Кроме этого, существуют значительные организационные проблемы. Отсутствуют специализированные организации, которые специализируются на распространении и сервисном обслуживании установленного оборудования. Наличие справочников, руководящих материалов, каталогов, проспектов, которые вмещают всю необходимую информацию о такой системе, является необходимым условием для ее более активного внедрения. Для того, чтобы заинтересовать потенциальных потребителей и убедить их в целесообразности использования такой системы, необходима широкая сеть демонстрационных центров, которые представят существующее оборудование и смогут дать советы, как получить максимальную выгоду от его использования.

Энергетический сектор характеризуется значительной инерцией. В предыдущие года существовала тенденция создания больших централизованных источников энергоснабжения. Сравнительно малые установки не вкладываются в эту идеологию, существующее законодательство не создает стимулов для производителей и пользователей такими системами. Нет законов и правил, регламентирующих взаимоотношения между небольшими частными производителями энергии и энергосистемами, в частности, тарифов на энергию, которая подается в сеть. Несмотря на то, что некоторые системы имеют уже многовековую историю применения, современные технологии их использования нужно считать новыми. Признать этот факт означает применить к ним разные льготы: уменьшение налогов, таможенных сборов, выдачу субсидий, беспроцентных кредитов, грантов.

В конце концов, важным фактором является недостаточная подготовленность и осведомленность населения о специфике таких систем, их преимуществах и недостатках. Все это не содействует широкому и интенсивному внедрению таких источников.

### **1.3 Энергосбережение в электротехнических и электротехнологических установках**

#### **1.3.1 Характеристика электроприводов сельскохозяйственных рабочих машин**

Электропривод осуществляет управляемое электромеханическое преобразование энергии, используется во всех областях сельского хозяйства, где необходимы движение и механическая работа, потребляя при этом больше 65% электроэнергии. Если информатика – мозг современных технологий, то электроприводы – их мышцы, средство практического решения большого количества задач. Большое внимание отводится расширению производства ре-

гулируемых электроприводов переменного тока. За разными источниками в промышленно развитых странах от 30% до 60% электроприводов, которые выпускаются, являются регулируемыми (в Украине до 2%), а в начале XXI столетия их часть возрастет до 65-75%. Такие высокие темпы роста производства регулируемых электроприводов обусловлены их высокой рентабельностью. Использование регулируемого электропривода позволяет сократить энергопотребление: помп –на 25%-30%, компрессоров –на 40%, вентиляторов –на 30%, центрифуг –на 50%. Учитывая то, что эти типы механизмов составляют более 50% используемых в сельском хозяйстве приводов, данное направление есть приоритетно для экономии электроэнергии [139].

Наиболее перспективными зонами внедрения регулируемых электроприводов в сельскохозяйственном производстве есть системы микроклимата животноводческих и птицеводческих ферм, установки тепло- и холодоснабжения, водоснабжения, пневмотранспортирования, системы сжатого воздуха и тому подобное, а в коммунальном хозяйстве – системы водоснабжения, теплоснабжения, канализации, кондиционирования воздуха, вентиляции зданий.

Сегодняшний день регулируемого электропривода – это частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Сформирована структура такого привода для широкого применения: сеть – выпрямитель – шины постоянного тока с конденсаторами – инвертор на транзисторных модулях с широтно-импульсной модуляцией, управляемый процессором – короткозамкнутый двигатель. Небольшая масса преобразователя частоты (около 1 кг/кВт), совершенная система защиты от перегрузок и аномальных режимов, возможность полного диагностирования состояния привода, управление от цифровых и аналоговых сигналов, простое и удобное программирование работы, простое соединение нескольких приводов, которые взаимодействуют в технологическом процессе — вот неполный перечень полезных качеств, которые связаны с направленным действием на материю в интересах человека. В

сельскохозяйственном производстве используется больше 4 млн электроприводов как регулируемых, так и нерегулируемых. В современном электроприводе асинхронный электродвигатель стал основным типом электрической машины благодаря простоте, надежности, невысокой стоимости; транзисторные модули определили вид электрического преобразователя энергии; микропроцессорные средства предоставили электроприводе высокую интеллектуальную способность. Остались в прошлом из-за невысокой эффективности электроприводы с многоскоростными асинхронными двигателями, двигателями с фазным ротором. Благодаря высокой стоимости, большим затратам меди, трудоемкости изготовления существенно сократилось использование электроприводов постоянного тока, которые на протяжении продолжительного времени не имели конкуренции в классе регулируемого привода.

Наиболее массовый асинхронный электропривод в сельском хозяйстве по количеству электроэнергии, которая потребляется, находится в диапазоне мощностей 1-10 кВт. По статистическим данным приблизительное распределение асинхронных двигателей за механизмами оценивается такими показателями: приводы вентиляторов – 37%, транспортеров – 19%, насосов – 17%, обработочных станков – 7%, смесителей – 6%, механизмов передвижения – 4%, затворов, задвижек – 4%, компрессоров – 3%. Среди исполнительных механизмов за характером нагрузки наиболее распространенными являются вентиляторы и насосы, которые составляют больше половины общего количества механизмов. Способы регулирования производительности, наиболее распространенные в Украине, основаны на дросселировании потоков и сопровождаются значительными потерями энергии и уменьшением коэффициента полезного действия.

В то же время в США, Западной Европе, Японии управление режимами работы современных механизмов осуществляется за счет изменения скорости вращения асинхронных двигателей, которые питаются от преобразователей частоты. Использование регулируемого асинхронного электропривода

позволяет уменьшить затраты электроэнергии на 20-50%.

Электропривод постоянного тока, по данным зарубежных фирм, до 2005 года в общем объеме производства регулируемых электроприводов составил лишь 15%. Однако благодаря неопровержимым преимуществам его главного представителя – общеизвестной системы генератор-двигатель, этот привод на протяжении длительного времени будет использоваться, особенно при больших мощностях (сотни киловатт) и двонаправленных потоках энергии, а также при желании избежать проблем электромагнитной совместимости, помех и тому подобного. Наверное, именно такая система, а не приводы со статистическими тиристорными преобразователями продолжают жизнь мощных электроприводов постоянного тока.

Сохранит конкурентноспособность и структура электропривода с несколькими связанными электродвигателями. Это система: параметрично нерегулируемый источник тока – управляемые по кругу возбуждения двигатели постоянного тока, хорошо приспособленная для установок, которые транспортируют длинномерные изделия (кабели, ленты, нити и тому подобное), для специальных лебедок, погрузочных агрегатов и тому подобному. Конструктивные особенности этой системы обеспечивают высокие энергетические показатели и возможность простого и эффективного управления моментом.

В классе нерегулируемого электропривода короткозамкнутый асинхронный двигатель с простейшими средствами управления был, есть и останется единым массовым типом электропривода, вопреки тому, что и здесь появляются новые решения.

Так, зарубежные специалисты серьезно занимаются проблемой создания энергосберегающих двигателей, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности которых повышаются за счет увеличения массы активных материалов и повышения их качества. Эффект здесь возможен лишь при условии продолжительной работы привода с такими двигателями в усло-

виях постоянного нагрузки. Если же нагрузка заметно меняется на протяжении рабочего цикла или, по условиям технологии, количество рабочих часов в течение года небольшое, дополнительные затраты на установку таких двигателей становятся нецелесообразными.

Намного плодотворнее усилия специалистов, направленные на рациональный выбор привода для конкретных условий технологии. Как показывает опыт, немалое количество нерегулируемых электроприводов имеет повышенную мощность двигателей (коэффициент использования 0,3-0,4), то есть используются неэффективно. Здесь станут в необходимыми прикладные компьютерные программы, которые позволяют избежать ошибок при выборе двигателей.

Из новых аппаратных средств, которые используются для усовершенствования нерегулируемого асинхронного электропривода, необходимо отметить «мягкие пускатели» – простые тиристорные устройства, которые позволяют регулировать напряжение на зажимах двигателя, и, соответственно, контролировать пуск и остановку привода, а также обеспечить энергосбережение путем уменьшения напряжения на недогруженном двигателе.

Интересная и очень важная особенность современного этапа развития электропривода – переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому в технологических установках, в которых на сегодняшний день доминировал простой нерегулируемый электропривод. Это, в первую очередь, приводы насосов и вентиляционных систем водо- и теплоснабжения зданий. Опыт использования электронных преобразователей частоты в подобных агрегатах, которые работают круглые сутки и потребляют большое количество энергии, показал, насколько большие здесь резервы энерго- и ресурсосбережения и как эффективно и просто они могут быть реализованы. Экономия при этом в таких системах достигает 50-60% электроэнергии, воды – 25%, тепловой энергии – 10%.

Процесс использования в этой сфере частотно-регулируемого элект-

тропривода будет продолжаться и расширяться, несмотря на большое количество преград, связанных с несовершенством организационных и экономических механизмов. В этом процессе, с учетом его масштабности, необходима компетентность исполнителей, чтобы достигнутый эффект не был деэмулирован недостаточно продуманными или неправильными техническими и экономическими решениями.

Сфера водо- и теплоснабжения зданий не единственная, в которой переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому приводит к кардинальным положительным изменениям в технологии и энергозатратах. Так, значительная часть докладов на XIX Всемирном энергетическом конгрессе в ноябре 1996 года, Атланта, США касались новых, часто неожиданных эффектов, полученных в разных технологических сферах: производстве продуктов, кормосмесей, транспортировки товаров и тому подобного.

В будущем нерегулируемый (по скорости) электропривод останется превосходящим типом привода. Не изменится и принципиальное техническое решение – в его основе будет, как и в прошлом, асинхронный электродвигатель. Вместе с тем необходимость решения проблемы энергосбережения принудит разработчиков внимательно относиться к выбору мощности двигателя. Будут применяться эффективные и доступные приемы энергоаудита, что базируются на широком и целенаправленном использовании компьютерных средств. Значительно больше, чем сегодня, количество мощных асинхронных электроприводов будет оснащаться плавными пускателями, которые будут выполнять также функции энергосбережения при недогруженном двигателе, защите от перенапряжений, симметрии фаз и тому подобного.

Основное отличие завтрашнего нерегулируемого по скорости асинхронного электропривода от того, что используется сегодня, будет состоять в широком использовании встроенных средств микроэлектроники для надежной защиты и диагностирования состояния привода. Аппаратные средства решают постоянный спор о том, кто виновен в том, что двигатель сгорел: про-

изводитель или потребитель – двигатель просто не сможет сгореть.

Характерным процессом, который начинается сегодня, будет переход к регулируемому электроприводу. В самом массовом применении (помпы, вентиляторы, транспортеры, дозаторы, бытовая техника) будет преобладать частотно-регулируемый асинхронный электропривод со структурой, которая сложилась на сегодня. Отличие от современного будет состоять в использовании модернизированных, специально спроектированных для частотного регулирования асинхронных двигателей, в большей интеграции в силовом канале; в усовершенствовании процессорной части. Приобретает силы конкурент массового регулируемого асинхронного электропривода – вентильно-индукционный электропривод, силовая версия одного из типов хорошо известного шагового электропривода. Его принципиальное отличие от большого количества тех, что уже разработаны и используются, например, в станках и роботах электроприводов с постоянными магнитами, синхронных, реактивных и других специальных электроприводов, – предельная простота конструкции, небольшая стоимость и высокая надежность машины и системы в целом.

Элементарный принцип действия – ближайший зубец пассивного ротора притягивает к возбужденному магниту (зубца статора) с непрерывными повторениями этого процесса для других зубцов, которые диктуются электронным коммутатором, – удовлетворительно реализуется, как показывает опыт, лишь при тонком и сложном управлении ключами коммутатора. Собственно, это обстоятельство объясняет относительно медленный выход нового привода на широкий рынок.

Ближайшее будущее электропривода — это его «интеллектуализация». Этот естественный и неминуемый процесс, который открывает все новые возможности, создает и новые проблемы. Среди них: адаптация новых принципов и алгоритмов управления к задачам электропривода с новыми аппаратными возможностями; разработка средств адекватной описи энергети-

ческих процессов в сложных электромеханических системах; создание эффективных и удобных для управления моделей *двигатель - технологический агрегат*; электромагнитная совместимость привода и сети, преобразователя и двигателя при высокочастотной широтно-импульсной модуляции; эффективный энергоаудит; пакеты прикладных компьютерных программ, с помощью которых определяется рациональное техническое решение.

Без развития силовой электроники широкое внедрение регулируемого электропривода, которое приобретает все больших масштабов, было бы маловероятным. Силовая электроника обеспечивает эффективное преобразование, управление и регулирование электрической энергии с помощью силовых полупроводниковых приборов.

### **1.3.2 Характеристика ресурсоэнергосбережения в силовых трансформаторах**

Основное количество силовых трансформаторов в агропромышленном комплексе установлено на потребительских трансформаторных подстанциях.

Указанные трансформаторные подстанции, как правило, расположены на большой территории на значительном удалении от центров технического обслуживания и обслуживается по необходимости.

На силовых трансформаторах потребительских трансформаторных подстанций для защиты отходящих линий электропередачи установлены автоматические выключатели с электромагнитными и тепловыми расцепителями.

Тепловые режимы указанных силовых трансформаторов не контролируются, отсутствуют системы диагностирования и сигнализации об эксплуатационных режимах работы силовых трансформаторов.

Это является одной из причин их преждевременного выхода из строя.

#### **1.4 Эксплуатационная надежность силового электрооборудования в агропромышленном комплексе**

Надежность силового электрооборудования в значительной степени определяется надежностью его обмоток, которая, в свою очередь, зависит от состояния изоляции. Последняя работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе длительной эксплуатации силового электрооборудования оно подвергается разнообразным эксплуатационным воздействиям.

Температура окружающей среды в условиях сельского хозяйства является наиболее распространенным фактором, воздействующим на силовое электрооборудование, работающее при широких диапазонах колебания как суточных, так и сезонных температур. Большинство силовых трансформаторов сельских трансформаторных подстанций подвержены воздействию температуры воздуха и солнечной радиации, электродвигатели насосных станций в наиболее теплые месяцы года испытывают воздействие высоких температур окружающей среды (до  $+50^{\circ}\text{C}$ ). В зимние месяцы эти агрегаты, в которых, как правило, отсутствует отопление, подвергаются воздействию низких температур (до  $-27^{\circ}\text{C}$ ).

Многие технологические линии и отдельные рабочие машины находятся либо на открытом воздухе, либо в неотопливаемых помещениях и поэтому электродвигатели привода этих машин также подвержены неблагоприятным температурным воздействиям.

Перегрузки электродвигателей нередко связаны с несовершенством рабочих машин и механизмов. Отсутствие средств автоматизации и контроля за нагрузкой кормодробилок, кормораздатчиков является тому примером. Ряд механизмов, например, дробилки, шнеки, нории порой включают под нагрузкой, зимой часто смерзаются подвижные части рабочих машин, они же нередко увеличивают массу за счет прилипания остатков кормов, навоза и

так далее, в результате чего увеличиваются силы трения и маховые моменты. Всевозможные перекосы, износы трущихся частей, ухудшение смазки затрудняют подвижность рабочих органов, увеличивают трение. Все это ведет к перегрузкам двигателей, затяжным пускам, к работе в режиме опрокидывания. Поэтому, несмотря на неполную загруженность электродвигателей в сельском хозяйстве (коэффициент загрузки составляет 0,5—0,8), значительная часть их выходит из строя по причине перегрузок [5].

Особо опасным эксплуатационным воздействием на изоляцию силового электрооборудования обладает свертток. Затяжные пуски, опрокидывания электродвигателей, возникающие при снижении напряжения, неполнофазных режимах, заклиниваниях рабочих машин, приводят к возникновению сверттоков. Силовые трансформаторы подвержены воздействию токов короткого замыкания в питаемых сетях, пусковых токов электродвигателей в условиях соизмеримой мощности.

В связи с тем, что нагрузки имеют явно выраженный сезонный характер, а мощность отдельных потребителей часто соизмерима с мощностью трансформаторов, при отсутствии регуляторов напряжения и большой протяженности сетей 0,38 кВ напряжение в сельских сетях изменяется в значительных пределах: при питании от государственных систем электроснабжения – от  $0,85U_n$  до  $1,15 U_n$ , а при питании от собственных электростанций – от  $0,8 U_n$  до  $1,2 U_n$ . В моменты пуска двигателей, особенно в условиях соизмеримой мощности, напряжение снижается до  $0,65 U_n$  [18]. Кроме того, наблюдается неравномерная нагрузка по фазам, что сопровождается перекосами напряжения. Все это также приводит к тепловым перегрузкам электродвигателей.

Для возникновения такого фактора эксплуатационного воздействия как неполнофазные режимы может быть очень много причин: перегорание одного из предохранителей на щите трансформаторной подстанции, обрыв провода линии электропередачи, повреждение контакта пусковой аппарату-

ры, повреждение контакта в коробке ввода электродвигателя, повреждение жилы кабеля, окисление алюминиевого провода в местах контакта, (особенно в животноводческих помещениях) и так далее. [18]. Довольно часто при эксплуатации электродвигателей наблюдается ухудшение условий охлаждения по причине засорения поверхностей электродвигателей продуктами переработки, снятия вентиляторов и так далее.

Изоляция обмоток асинхронных электродвигателей подвергается воздействию коммутационных перенапряжений, которые могут достигать десятикратной (и более) величины по отношению к номинальному напряжению, что является в большинстве случаев непосредственной причиной межвитковых замыканий. Коммутационные перенапряжения, представляя собой существенно случайные явления, имеют статистический характер. Их вероятная величина зависит от числа коммутационных операций, которые, в свою очередь, пропорциональны времени работы электрической машины.

Разрушительным фактором эксплуатационного воздействия для изоляционной конструкции электрических машин является вибрация. Действие вибрации на насыпные обмотки выражается в постепенном разрушении пропиточного лака, в результате чего нарушается цементация обмотки и отдельные проводники приобретают некоторую свободу перемещения. Это ведет к разрушению витковой изоляции в точках соприкосновения соседних проводников. Измерение величины вибрационного смещения (удвоенное значение амплитуды колебания) электродвигателей [7, 26] показало, что оно имеет широкий диапазон значений в пределах от 0,005 до 0,9 мм. Частота вибрации большинства корпусов электродвигателей оказалась равной 50 Гц. Особенно характерна вибрация для электродвигателей рабочих машин типа дробилок.

Сильное эксплуатационное воздействие на электрические машины в сельском хозяйстве оказывает влага и химически активные среды. Влага проникает в изоляцию машины главным образом в периоды их нерабочего состояния. Особенно интенсивно этот процесс идет во время остывания ма-

шины, так как в этот период давление в порах и капиллярах изоляции несколько ниже атмосферного. Малая вязкость и другие свойства воды способствуют ее прониканию в мельчайшие поры и гидrolитическому разрушению изоляционных материалов и расщеплению полимерных цепей. Сопротивление изоляции и ее электрическая прочность снижаются и создаются предпосылки для появления токов утечки.

Вредное действие на изоляцию оказывают химически активные вещества. Загазованность стойловых животноводческих помещений аммиаком, углекислым газом, сероводородом приводит к быстрой порче изоляции электрических машин.

Процессы старения изоляции от различных эксплуатационных воздействий активизируются и прогрессируют. Изоляционные конструкции, прошедшие период приработки и не имеющие больших скрытых дефектов, крайне редко отказывают вследствие внезапного пробоя. Разрушение изоляции происходит постепенно, причем иницирующая роль принадлежит процессам теплового старения. Даже при сравнительно невысоких температурах, когда термоокислительная деструкция незначительна, под действием тепла происходит усыхание, испарение летучих компонентов, уменьшение эластичности изоляции, повышение ее хрупкости. Последнее способствует развитию процессов механического старения. В изоляции появляются трещины и другие дефекты, она расслаивается и разрыхляется, что создает условия для возникновения ионизационных явлений. Разрушение изоляции происходит неравномерно и завершается пробоем в наиболее слабом месте. Влага и агрессивные среды способствуют ускорению и активизации процессов старения [7, 26].

Таким образом, двигатели в условиях сельскохозяйственного производства испытывают эксплуатационные воздействия графика нагрузки; температуры окружающей среды; перегрузок, вызванных особенностями рабочей машины; пусковых режимов (длительность, частота); отклонения напря-

жения на зажимах; асимметрии напряжения на зажимах; изменения условий охлаждения (засорения поверхностей корпусов, работа без вентилятора); коммутационных перенапряжений в питающей сети и возникающих в цепи электродвигателя при пусках и отключениях; толчков, вибраций, ударов со стороны рабочих машин; влажности окружающей среды; агрессивных сред.

Аналогично силовые трансформаторы в условиях сельскохозяйственного производства испытывают эксплуатационные воздействия графика нагрузки; температуры окружающей среды; перегрузок; пусковых токов электродвигателей; токов короткого замыкания в питаемых сетях; коммутационных перенапряжений в питающих сетях; влажности окружающей среды.

Эксплуатационные воздействия на электрические машины одновременно являются и эксплуатационными воздействиями на силовые кабели и провода. Поэтому они должны рассматриваться совместно.

Силовые кабели и провода испытывают эксплуатационные воздействия графика нагрузки; температуры окружающей среды; перегрузок; пусковых токов электродвигателей, токов короткого замыкания.

### **1.5 Анализ влияния эксплуатационных воздействий на развитие процессов повреждения силового электрооборудования в агропромышленном комплексе**

Обмотка статора асинхронного электродвигателя, обмотка силового трансформатора являются самыми уязвимыми элементами конструкции электрических машин. В свою очередь, в обмотках силового электрооборудования самым уязвимым элементом является их изоляционная конструкция. Поэтому надежность силового электрооборудования в основном определяется надежностью изоляционной конструкции (изоляции). Анализ работ [14—61] позволяет представить механизм развития процессов повреждения изоляции электрических двигателей в течение эксплуатации. На рисунке 1 приведена блок-схема развития повреждений изоляции асинхронных электродви-

гателей [5].

Любой асинхронный электродвигатель содержит в себе дефекты изготовления, которые можно разделить на две группы: дефекты проектирования; дефекты технологии производства.

Дефекты проектирования являются общими для всех электродвигателей одного типоразмера. К ним можно отнести высокий коэффициент заполнения пазов; малый запас теплостойкости изоляции; малый воздушный зазор; недостаточную жесткость конструкции.

Дефекты технологии производства носят общий и индивидуальный характер. К ним относятся низкое качество материалов и комплектующих изделий; локальные дефекты изоляции проводников обмотки; несовершенство технологии изготовления секций; несовершенство технологии укладки секций в паз; дефекты пайки контактов; несовершенство пропитки и сушки обмотки; дефекты материалов корпусной изоляции; несовершенство изготовления сердечника статора.

Уровень приведенных дефектов для каждого электродвигателя носит случайный характер, предопределяющий индивидуальную конструкционную надежность. Начальные дефекты технологического происхождения могут получить дальнейшее развитие вплоть до отказа в зависимости от условий эксплуатации, представляющих собой совокупность эксплуатационных воздействий. Так, например, несовершенство центровки двигателя, толчки, удары, вибрации со стороны рабочей машины приводят к вибрации обмотки, в результате чего развиваются локальные дефекты витковой изоляции.

Перегрузки электродвигателя из-за особенностей рабочей машины, пусковые режимы электродвигателя (их длительность, частота), отклонения напряжения на зажимах от номинального значения (вверх, вниз) или асимметрия напряжения на зажимах, выпадение фазы приводят к перегрузке электродвигателя по току. Перегрузка электродвигателей по току, повышение температуры окружающей среды, ухудшение условий охлаждения электродвигателя

тродвигателя (засорение, работа без вентилятора) приводят к перегреву витковой изоляции, в результате чего увеличивается ее тепловой износ, снижается сопротивление витковой изоляции, что приводит к дальнейшему развитию ее локальных дефектов. На снижение сопротивления витковой изоляции оказывают влияние высокая влажность окружающей среды и ее агрессивность.

Пусковые режимы электродвигателя (длительность, частота), коммутационные перенапряжения в питающей сети приводят к коммутационным перенапряжениям витковой изоляции, что также способствует развитию ее локальных дефектов.

Перегрузки по току электродвигателя, особенно вызванные пусковыми режимами, приводят к термомеханическим процессам, также усугубляющим локальные дефекты витковой изоляции.

Развитие локальных дефектов витковой изоляции в лобовых и пазовых частях приводит вначале к незавершенным пробоям, а впоследствии к полным витковым замыканиям и отказу электродвигателя. Параллельно с этим развиваются повреждения корпусной изоляции, которые вначале приводят к локальным дефектам, а затем переходят в незавершенные пробои и полные замыкания на корпус, приводящие также к отказу электродвигателя.

Анализ ряда работ [62—83] позволяет представить механизм развития процессов повреждения изоляции силовых трансформаторов. На рисунке 2 приведена блок-схема развития повреждений изоляции силовых трансформаторов.

Силовые трансформаторы, как и электродвигатели, содержат в себе определенные дефекты изготовления. Начальные дефекты технологического происхождения под влиянием эксплуатационных воздействий получают дальнейшее развитие. Однако в силовых трансформаторах они не являются определяющими в развитии процессов повреждения изоляции. Определяющую роль играют естественные процессы ее старения под воздействием экс-

платационных факторов.

Перегрузки силовых трансформаторов, повышение температуры окружающей среды, пусковые режимы электродвигателей, короткие замыкания в сетях, питаемых силовыми трансформаторами, приводят к перегреву изоляции, в результате чего ускоряется ее тепловой износ.

Тепловой износ изоляции является определяющим в общем ее износе, на который влияет также увлажнение масла, окисление и другие причины, снижающие механическую прочность.

Механически изношенная изоляция легко разрушается под воздействием вибраций и электродинамических усилий, возникающих при пусках крупных электродвигателей и особенно при коротких замыканиях в питаемых сетях, что приводит к отказу силовых трансформаторов в результате витковых замыканий в обмотках и междуфазных замыканий.

Аналогично электрическим машинам можно представить механизм развития процессов повреждения изоляции силовых кабелей и проводов (рисунок 3). Здесь повышение температуры окружающей среды, перегрузки по току, пусковые режимы электродвигателей, короткие замыкания в питаемых сетях также приводят к перегреву изоляции, в результате чего ускоряется ее тепловой износ и снижается механическая прочность. Дефекты технологического происхождения под воздействием теплового износа приводят к локальным дефектам изоляции. При общем снижении механической прочности под воздействием электродинамических усилий в результате действия токов коротких замыканий локальные дефекты изоляции вызывают замыкания на корпус или междуфазные замыкания, что приводит к отказу силовых кабелей или проводов.

С целью определения диагностических признаков, обоснования параметров диагностирования и критериев оценки интенсивности процессов повреждения изоляции электрических машин в течение их эксплуатации в работе проведен анализ влияния эксплуатационных воздействий на развитие этих процессов.

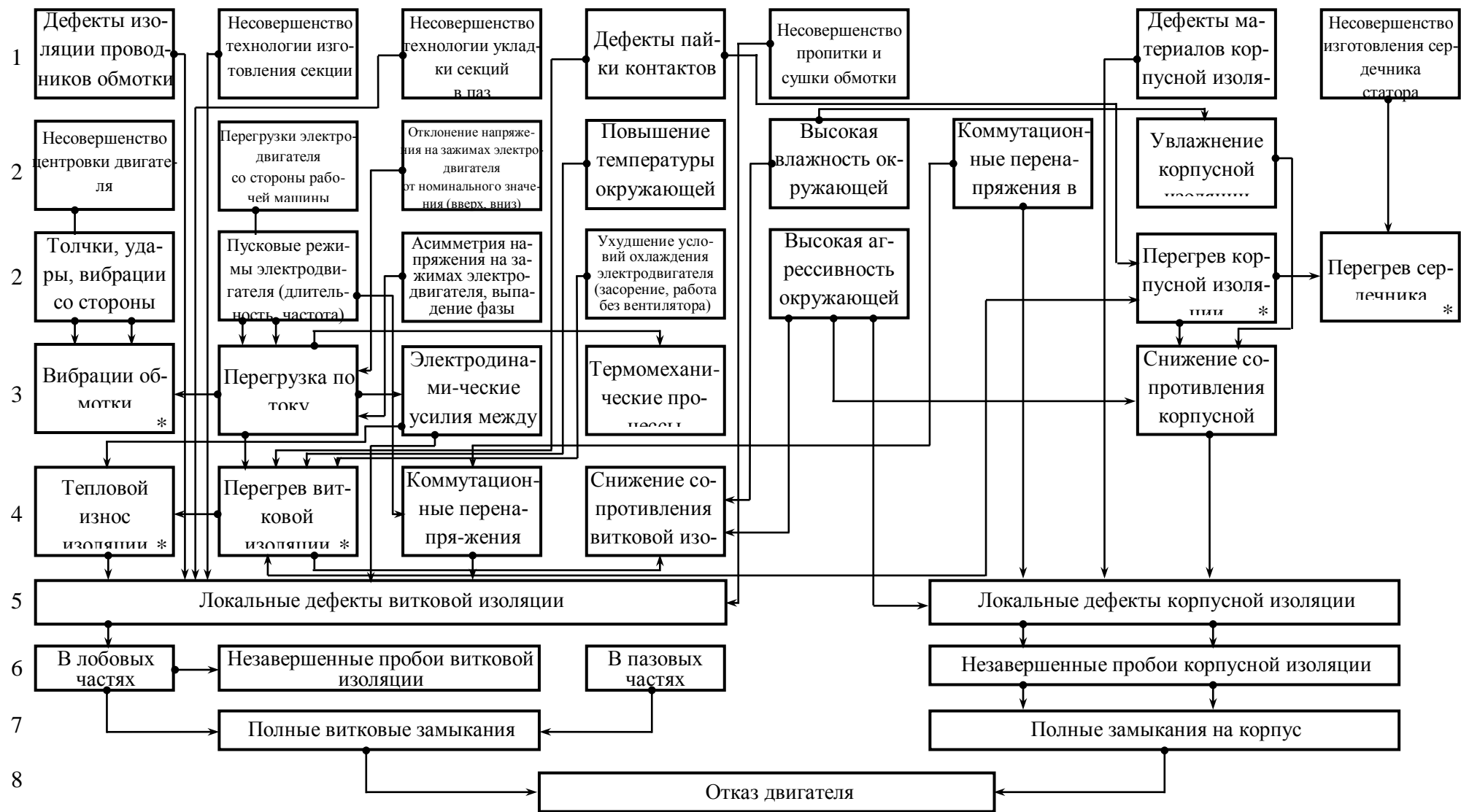


Рисунок 1.1 Блок-схема развития повреждений изоляции асинхронных двигателей: 1 – начальные дефекты технологического происхождения; 2 – эксплуатационные воздействия, приводящие к развитию начальных дефектов; 3–8 – последующие стадии развития дефектов изоляции; \* – диагностические признаки.

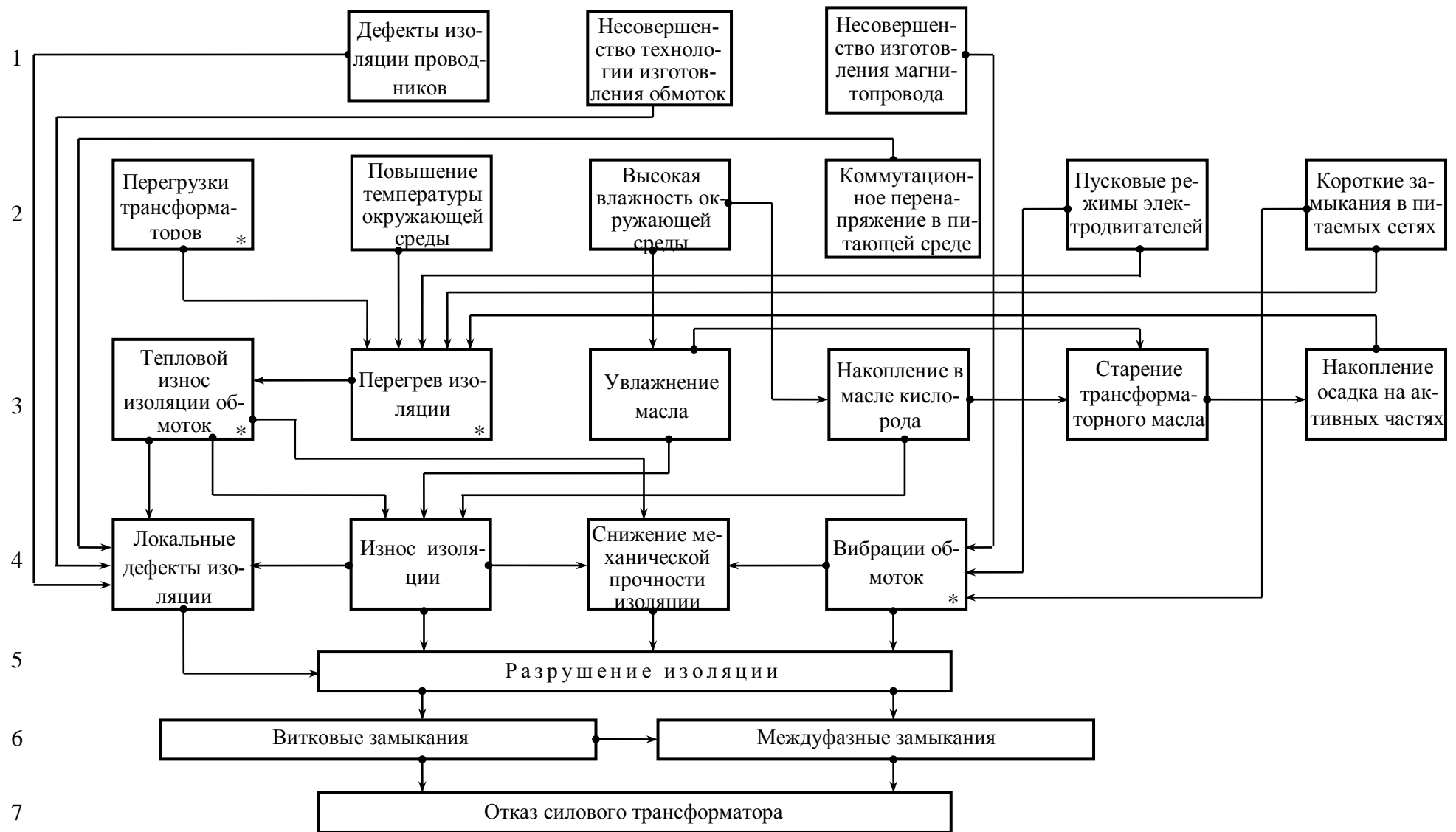


Рисунок 1.2 Блок-схема развития повреждений изоляции силового трансформатора: 1 – начальные дефекты технологического происхождения; 2 – эксплуатационные воздействия, приводящие к развитию начальных дефектов; 3–7 – последующие стадии развития дефектов изоляции; \* – диагностические признаки.

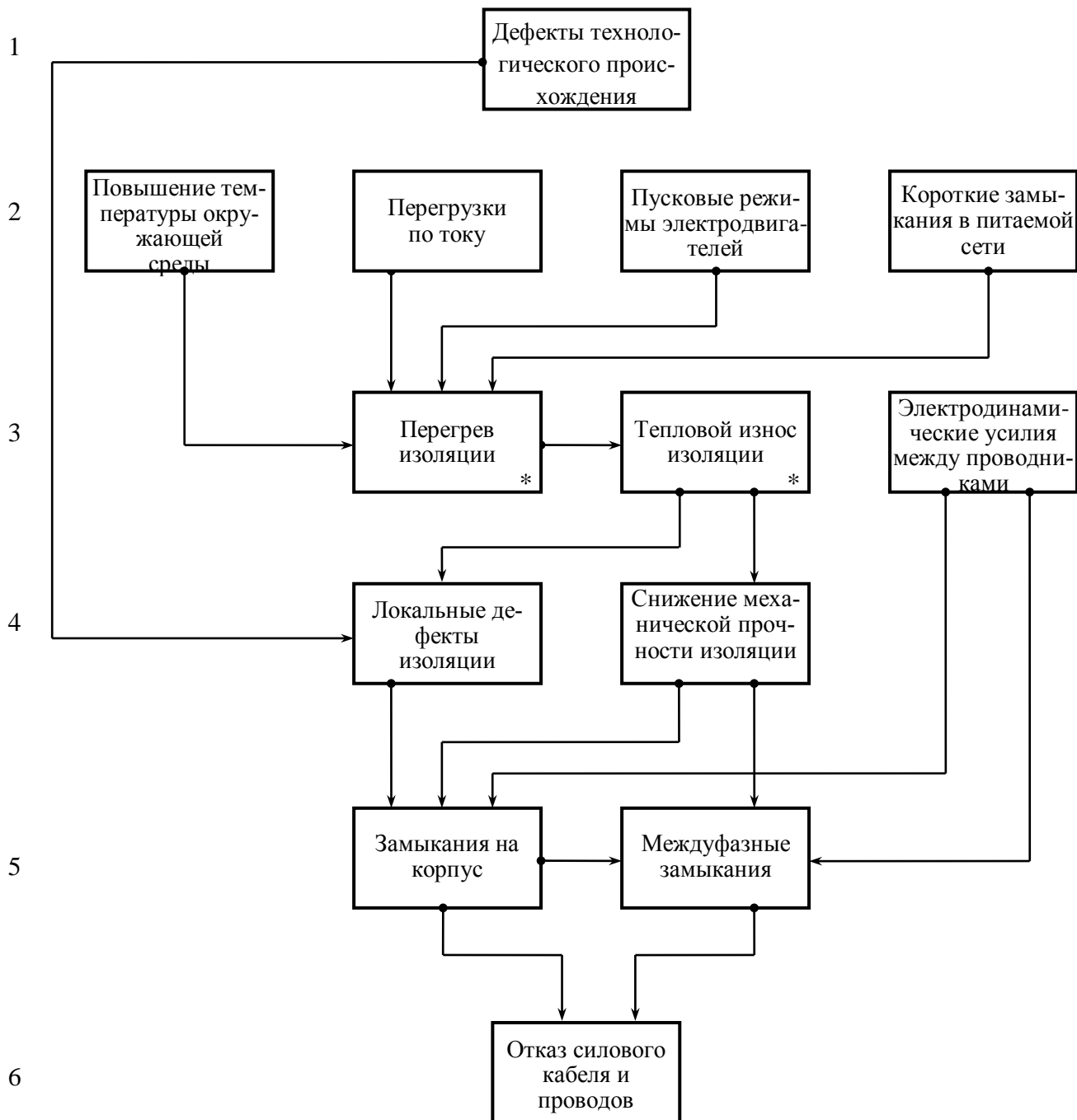


Рисунок 1.3 Блок-схема развития повреждений изоляции силовых кабелей и проводов: 1 – начальные дефекты технологического происхождения; 2 – эксплуатационные воздействия, приводящие к развитию начальных дефектов; 3–6 – последние стадии развития дефектов изоляции; \* – диагностические признаки.

## **РАЗДЕЛ 2. ПОТЕРИ АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ**

### **2.1 Общие положения**

Эксплуатационные режимы работы асинхронных электродвигателей отличаются от стандартных в силу того, что в условиях агропромышленного комплекса электродвигатели подвергаются целому ряду эксплуатационных воздействий режимного характера, которые приводят к изменению величины потребляемого электрического тока и величины напряжения питания по сравнению с номинальными значениями и, как следствие, к изменению потерь активной энергии в электродвигателе.

К таким эксплуатационным воздействиям режимного характера относятся:

- перегрузки на валу со стороны рабочих машин;
- понижение напряжения;
- повышение напряжения;
- асимметрия напряжения;
- неполнофазный режим питания;
- повышение температуры окружающей среды;
- ухудшение условий охлаждения.

### **2.2 Потери активной энергии в асинхронном электродвигателе в функции мощности на валу**

Как известно, в асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором, как преобразователе электрической энергии в механическую, на-

блюдаются следующие физические явления, которые приводят к потерям активной мощности в отдельных элементах его конструкции:

- явление теплового действия электрического тока, который протекает по обмоткам статора;
- явление теплового действия электрического тока, который протекает по короткозамкнутой обмотке ротора;
- явление теплового действия вихревых токов, которые протекают в магнитопроводе электродвигателя;
- явление перемагничивания (гистерезиса) магнитопровода электродвигателя;
- явление трения в механической системе электродвигателя (в подшипниках, воздуха об ротор);
- другие явления, которые приводят к дополнительным потерям активной мощности.

Все указанные физические явления, за исключением явления вихревых токов и перемагничивания, которые приводят к потере активной мощности, учитываются Г-образной схемой замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором [1], приведенной на рисунке 2.1.

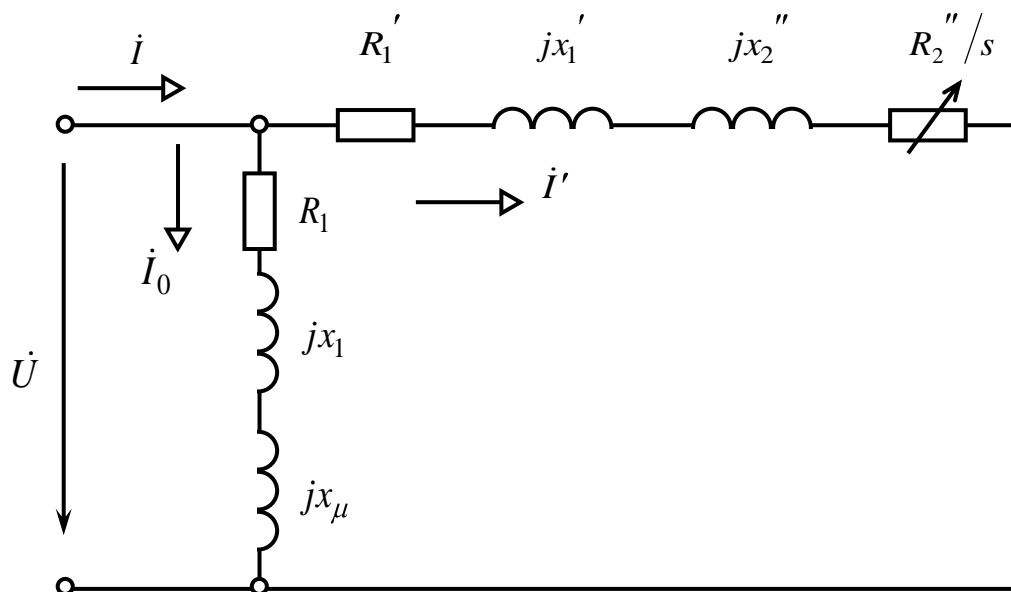


Рисунок 2.1 Схема замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (для одной фазы)

Активная мощность, которую потребляет асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, превращается в механическую  $P_{мх}$ , которая состоит из механической мощности  $P_2$ , которая передается через вал рабочей машине, механической мощности  $P_m$ , которая передается в механическую систему электродвигателя, и активной мощности  $P_\partial$ , отнесенной условно к механической, которая учитывает дополнительные потери в электродвигателе, то есть

$$P_{мх} = P_2 + P_m + P_\partial, \quad (2.1)$$

Механическая мощность  $P_{мх}$  может быть определена таким способом:

$$P_{мх} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (2.2)$$

где  $R_2''$  – приведенное активное сопротивление фазы ротора, Ом;

$I'$  – действующее значение силы электрического тока в цепи схемы замещения одной фазы электродвигателя, А;

$s$  – относительное скольжение вращающегося магнитного поля электродвигателя.

Механическая мощность  $P_2$ , которая передается рабочей машине, зависит от момента сопротивления рабочей машины  $M_c$  и угловой скорости вращения ее вала  $\omega$ , то есть:

$$P_2 = M_c \cdot \omega. \quad (2.3)$$

Механическая мощность  $P_m$ , которая передается в механическую систему электродвигателя, зависит от момента трения механической системы электродвигателя  $M_m$  и угловой скорости вращения ее вала  $\omega$ , то есть:

$$P_m = M_m \cdot \omega. \quad (2.4)$$

Дополнительные потери активной мощности в электродвигателе могут быть найдены таким способом:

$$P_\partial = P_{mx} - P_2 - P_m. \quad (2.5)$$

Другие суммарные потери активной мощности  $P_\Sigma$  могут быть найдены, используя схему замещения асинхронного электродвигателя:

$$P_\Sigma = 3(R_1' + R_2'')I'^2 + 3R_1I_0^2, \quad (2.6)$$

где  $R_1', R_2'', R_1$  – параметры схемы замещения одной фазы асинхронного электродвигателя, Ом;

$I', I_0$  – действующие значения сил электрических токов ветвей схемы замещения одной фазы электродвигателя, А.

Проверим справедливость изложенного выше на примере асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором типоразмера 4A100S2Y3 со следующими каталожными данными:

$$\begin{array}{llll} P_{2H} = 4 \text{ кВт}; & \eta_H = 0,865; & \cos\varphi_H = 0,89; & R_1' = 1,509 \text{ Ом}; \\ x_1' = 1,537 \text{ Ом}; & R_2'' = 1,006 \text{ Ом}; & x_2'' = 2,767 \text{ Ом}; & R_1 = 1,485 \text{ Ом}; \\ x_1 = 1,513 \text{ Ом}; & x_\mu = 95 \text{ Ом}; & U_H = 220 \text{ В}; & s_H = 0,033; \\ s_K = 0,28; & s_M = 0,8; & m_n = 2,0; & m_K = 2,5; & m_M = 1,6. \end{array}$$

Анализ проведем для номинального режима.

Определяем механическую мощность электродвигателя в номинальном режиме  $P_{мхн}$  таким способом:

$$P_{\text{мхн}} = 3R_2'' \frac{1 - s_n}{s_n} I_n'^2, \quad (2.7)$$

где  $s_n$  – номинальное скольжение магнитного поля электродвигателя относительно его ротора;

$I_n'$  – номинальная сила электрического тока в ветви схемы замещения асинхронного электродвигателя, А.

Последнюю находим, пользуясь схемой замещения асинхронного электродвигателя:

$$I_n' = \frac{U_n}{\sqrt{(R_1' + R_2''/s_n)^2 + (x_1' + x_2'')^2}}, \quad (2.8)$$

где  $U_n$  – номинальное фазное напряжение электродвигателя, В.

Подставив в (2.7) и (2.8) значение параметров и физических величин, находим:

$$P_{\text{мхн}} = 4112 \text{ Вт.}$$

Находим суммарные потери активной мощности в механической системе электродвигателя  $P_m$  и дополнительные  $P_\delta$ :

$$P_m + P_\delta = P_{\text{мхн}} - P_{2n}, \quad (2.9)$$

где  $P_{2n}$  – номинальная активная мощность, которая передается рабочей машине из вала электродвигателя, Вт.

Подставив значение мощностей, получим:

$$P_m + P_\delta = 4112 - 4000 = 112 \text{ Вт.}$$

Находим другие суммарные потери активной мощности:

$$P_{\Sigma n} = 3(R_1' + R_2'')I_n'^2 + 3R_1 I_0^2, \quad (2.10)$$

где

$$I_0 = \frac{U_n}{\sqrt{R_1'^2 + (x_1' + x_\mu)^2}}, \quad (2.11)$$

Подставив значение параметров и физических величин в (2.10) и (2.11), получим:

$$P_{\Sigma n} = 3(1,529 + 1,006)6,815^2 + 3 \cdot 1,485 \cdot 2,28^2 = 350 + 23 = 373 \text{ Вт.}$$

Общие суммарные потери активной мощности в асинхронном электродвигателе при номинальном режиме работы

$$\Delta P_n' = P_{\Sigma n} + P_m + P_\delta. \quad (2.12)$$

Подставив значение мощностей, получим:

$$\Delta P_n' = 373 + 112 = 485 \text{ Вт.}$$

Определим эти потери по каталожным данным:

$$\Delta P_n = \frac{P_{2n}}{\eta_n} - P_{2n}. \quad (2.13)$$

Подставив значение мощности и к.п.д., получим:

$$\Delta P_n = \frac{4000}{0,865} - 4000 = 624 \text{ Вт}.$$

Как видим, используя каталожные данные, получаем потери активной мощности в электродвигателе, значение которых превышает полученные потери расчетным путем. Это связано с тем, что Г-образная схема замещения не учитывает потери в магнитопроводе. Поэтому находим потери в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи как разницу значений потерь активной мощности, полученных по каталожным данным и рассчитанных по параметрам схемы замещения

$$\Delta P_m = \Delta P_n - \Delta P'_n = 624 - 485 = 139 \text{ Вт}. \quad (2.14)$$

Определяем постоянные потери активной мощности в асинхронном электродвигателе при номинальном режиме работы:

$$\Delta P_{const_n} = \Delta P_m + P_m + P_\partial + 3R_1 I_0^2. \quad (2.15)$$

$$\Delta P_{const_n} = 139 + 112 + 23 = 274 \text{ Вт}.$$

Определяем переменные потери активной мощности в асинхронном электродвигателе при номинальном режиме работы:

$$\Delta P_{var_H} = P_{\Sigma_H} - 3R_1 I_0^2. \quad (2.16)$$

$$\Delta P_{var_H} = 373 - 23 = 350 \text{ Вт}.$$

Определяем коэффициент потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе как отношения постоянных потерь к переменным потерям в номинальном режиме работы:

$$a = \frac{\Delta P_{const_H}}{\Delta P_{var_H}} = \frac{274}{350} = 0,78. \quad (2.17)$$

На основании изложенного принимаем следующую методику аналитического исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором в функции активной мощности, которая передается из вала электродвигателя рабочей машине, то есть  $\Delta P = f(P_2)$ :

- 1) задаемся значениями скольжения магнитного поля относительно ротора  $s$  в пределах от нуля до критического значения  $s_k$ ;
- 2) определяем квадрат силы электрического тока ветви расчетной схемы:

$$I'^2 = \frac{U_H^2}{(R_1' + R_2''/s)^2 + (x_1' + x_2'')^2}, \quad (2.18)$$

- 3) определяем механическую мощность:

$$P_{мх} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (2.19)$$

- 4) определяем потери активной мощности в механической системе

электродвигателя и дополнительные:

$$P_m + P_\partial = P_{mx} - P_2, \quad (2.20)$$

5) определяем потери активной мощности от намагничивающего тока:

$$P_0 = 3R_1 I_0^2. \quad (2.21)$$

$$I_0^2 = \frac{U_n^2}{R_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}, \quad (2.22)$$

6) определяем потери активной мощности в основной ветви расчетной схемы, в том числе  $P_{\Sigma n}$ :

$$P_\Sigma = 3(R_1' + R_2'') I'^2, \quad (2.23)$$

7) определяем потери активной мощности в электродвигателе при номинальном режиме работы без учета потерь в магнитопроводе:

$$\Delta P_n' = P_m + P_\partial + P_0 + P_{\Sigma n}, \quad (2.24)$$

8) определяем потери активной мощности в электродвигателе при номинальном режиме работы по каталожным данным:

$$\Delta P_n = \frac{P_{2n}}{\eta_n} - P_{2n}, \quad (2.25)$$

9) определяем потери в магнитопроводе:

$$\Delta P_m = \Delta P_n - \Delta P_n' \quad (2.26)$$

10) определяем суммарные потери активной мощности в электродвигателе:

$$\Delta P = P_m + P_\delta + P_0 + P_\Sigma + P_m, \quad (2.27)$$

11) определяем механическую мощность, которая передается на вал рабочей машины:

$$P_2 = P_{mx} - P_m - P_\delta. \quad (2.28)$$

Исследуем потери активной мощности в асинхронном электродвигателе с учетом роста активного сопротивления обмотки при нагревании.

Уравнение теплового баланса асинхронного электродвигателя, рассматривая последний как гомогенное тело, имеет такой вид:

$$C d\tau + L\tau dt = \Delta P dt, \quad (2.29)$$

где  $C$  - теплоемкость двигателя,  $\frac{Дж}{^\circ C}$ ;

$\tau$  - превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды,  $^\circ C$ ;

$L$  - теплоотдача электродвигателя в окружающую среду,  $\frac{Дж}{с \cdot ^\circ C}$ ;

$\Delta P$  - потери активной мощности в электродвигателе,  $Вт$ ;

$t$  - текущее время,  $с$ .

Перепишем уравнение (2.29) в другом виде:

$$\frac{C d\tau}{L dt} + \tau = \frac{\Delta P}{L}, \quad (2.30)$$

В установившемся режиме уравнение (2.30) принимает вид:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_y}{L}, \quad (2.31)$$

где  $\tau_y$  - установившееся превышение температуры обмотки, °C;

$\Delta P_y$  - потери активной мощности в электродвигателе в установившемся режиме, Вт.

Последние запишутся таким способом:

$$\Delta P_y = \Delta P_{сн} + \kappa^2 \Delta P_{мн} \left( 1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{ср} - 75) \right). \quad (2.32)$$

Подставляем (2.32) в (2.31) и получаем:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_{сн} + \kappa^2 \Delta P_{мн} \left( 1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{ср} - 75) \right)}{L}. \quad (2.33)$$

Преобразуем (2.33) и получим:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_{сн} + \kappa^2 \Delta P_{мн} \left( 1 + \alpha(\vartheta_{ср} - 75) \right)}{L - \alpha \kappa^2 \Delta P_{мн}}. \quad (2.34)$$

Выражение (2.34) в номинальном режиме принимает вид:

$$\tau_n = \frac{\Delta P_{сн} + \Delta P_{мн} \left( 1 + \alpha(\vartheta_{ср} - 75) \right)}{L - \alpha \Delta P_{мн}}, \quad (2.35)$$

откуда

$$JI = \frac{\Delta P_{сн} + \Delta P_{мн} (1 + \alpha(\vartheta_{ср} - 75)) + \alpha\tau_n \Delta P_{мн}}{\tau_n}. \quad (2.36)$$

Подставляем (2.36) в (2.35) и получаем

$$\tau_y = \tau_n \frac{\Delta P_{сн} + \kappa^2 \Delta P_{мн} (1 + \alpha(\vartheta_{ср} - 75))}{\Delta P_{сн} + \Delta P_{мн} (1 + \alpha(\vartheta_{ср} - 75)) - \alpha\tau_n \kappa^2 \Delta P_{мн} (\kappa^2 - 1)}. \quad (2.37)$$

Уравнение (2.37) в другом виде запишется таким способом:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + \kappa^2 (1 + \alpha(\vartheta_{ср} - 75))}{a + 1 + \alpha(\vartheta_{ср} - 75) - \alpha\tau_n (\kappa^2 - 1)}. \quad (2.38)$$

Потери активной мощности в обмотках электродвигателя

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma n} (1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{ср} - 75)) \kappa^2. \quad (2.39)$$

Проведем расчеты потерь активной мощности в электродвигателе типоразмера 4A100S2Y3, результаты расчета занесем в таблицу 2.1 и покажем графически на рисунке 2.2.

Таблица 2.1 – Зависимость коэффициента потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе в функции мощности на его валу

$s$	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055	0,06
$I'^2, A$	1,18	4,62	10,25	17,9	27,5	38,9	52,04	66,7	82,4	99,6	118,05	137,6
$\kappa^2$	0,025	0,1	0,22	0,38	0,59	0,83	1,12	1,43	1,77	2,14	2,54	2,96

$P_{мх}, Bm$	708	1380	2031	2647	3236	3795	4330	4831	5277	5711	6121	6506
$P_m + P_{\partial}, Bm$	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112
$P_0, Bm$	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
$P_{\Sigma}, Bm$	9	38	85	152	245	363	521	672	969	1302	1739	2362
$\tau_y, ^\circ C$	36	39	45	53	64	78	97	100	152	193	244	317
$P_m, Bm$	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
$\Delta P, Bm$	283	312	359	426	519	637	791	950	1243	1576	2013	2636
$P_2, Bm$	596	1268	1919	2535	3124	3683	4218	4713	5165	5599	6009	6394
$\frac{\Delta P}{P_2}$	0,47	0,25	0,19	0,17	0,16	0,17	0,18	0,2	0,26	0,28	0,32	0,41

Введем новое понятие - коэффициент потерь активной мощности в электродвигателе, под которым будем понимать отношение потерь активной мощности в электродвигателе к активной мощности на его валу:

$$k_n = \frac{\Delta P}{P_2}. \quad (2.40)$$

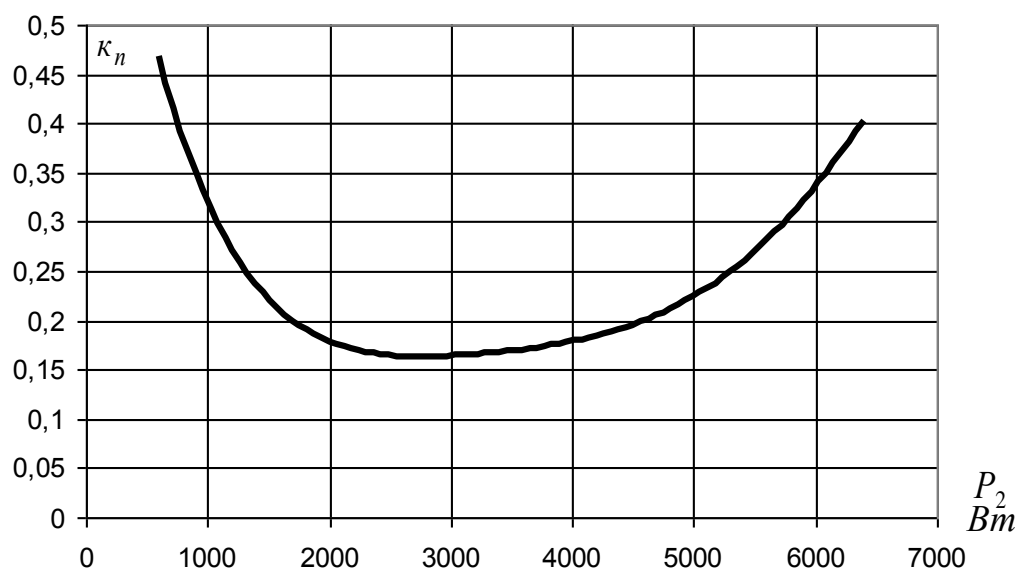


Рисунок 2.2 Зависимость коэффициента потерь в асинхронном электродвигателе в функции мощности на валу

Анализ полученной зависимости коэффициента потерь активной мощности от активной мощности на валу показывает, что она носит нелинейный экстремальный характер и позволяет оптимизировать режим загрузки асинхронного электродвигателя в функции мощности на его валу.

### 2.3 Потери активной энергии в асинхронном электродвигателе в функции скольжения

Исследуем переменные потери активной мощности в асинхронном электродвигателе в функции скольжения.

Представим Г-образную схему замещения асинхронного электродвигателя (для одной фазы) в уточненном виде (рис. 2.3)

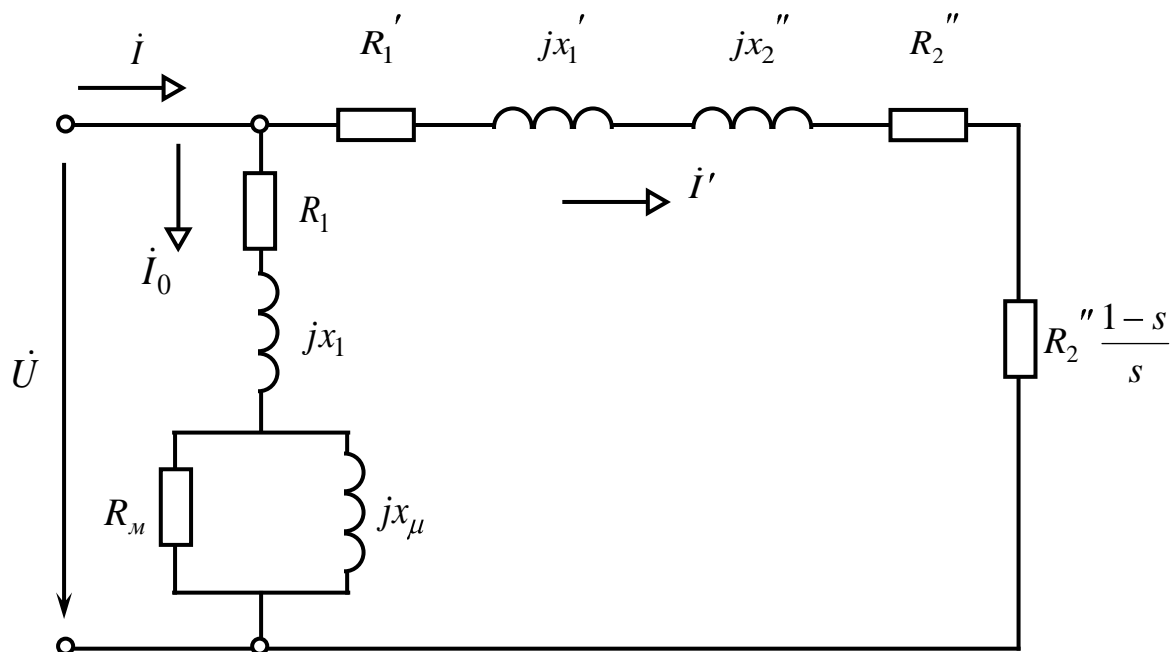


Рисунок 2.3 Уточненная схема замещения асинхронного электродвигателя (для одной фазы)

На приведенной схеме:

$R_m$  – активное сопротивление, эквивалентное потерям активной мощности в магнитопроводе ( от вихревых токов и на перемагничивание), Ом;

$R_2 \frac{1-s}{s}$  – активное сопротивление, эквивалентное активной мощности, которая передается на вал, Ом.

Для электродвигателя типоразмера 4А100S2У3 потери в магнитопроводе составляют 139 Вт, активное сопротивление, эквивалентное этим потерям, равняется 348,2 Ом.

Запишем комплекс действующего значения силы тока  $\dot{I}_0$  намагничивающего контура:

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}}{R_1 + jx_1 + \frac{R_m \cdot jx_\mu}{R_m + jx_\mu}} = I_0 e^{-j\varphi_0}. \quad (2.41)$$

Комплекс полной мощности в намагничивающем контуре, приняв  $\psi_u = 0$ :

$$\tilde{S}_0 = \dot{U} \dot{I}_0^* = UI_0 e^{j\varphi_0} = S_0 e^{j\varphi_0} \quad (2.42)$$

Построим комплекс полной мощности намагничивающего контура на комплексной плоскости (рис. 2.4).

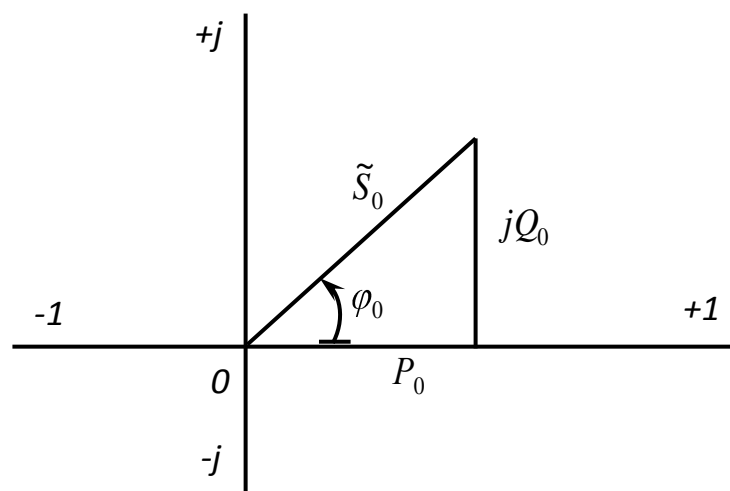


Рисунок 2.4

Проекция комплекса полной мощности на ось положительных значений представляет собой потери активной мощности в намагничивающем контуре:

$$P_0 = S_0 \cos \varphi_0 \quad (2.43)$$

Если экспериментально измерить действующее значение силы электрического тока холостого хода  $I_{xx}$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi_{xx}$ , то можно более точно рассчитать постоянные потери активной мощности при номинальном режиме ( $U = U_n$ ) с учетом дополнительных потерь и потерь в механической системе двигателя:

$$\Delta P_{сн} = 3U_n \cdot I_{xx} \cdot \cos \varphi_{xx}. \quad (2.44)$$

Запишем комплекс действующего значения силы электрического тока в другой ветви схемы замещения:

$$I' = \frac{\dot{U}}{R_1' + R_2'' + j(x_1' + x_2'') + R_2'' \frac{1-s}{s}}. \quad (2.45)$$

Введем обозначение:

$$Z = R_1' + R_2'' + j(x_1' + x_2''). \quad (2.46)$$

Тогда

$$I' = \frac{\dot{U}}{Z + R_2'' \frac{1-s}{s}}. \quad (2.47)$$

Преобразуем (2.47):

$$i' = \frac{\frac{\dot{U}}{Z}}{1 + \frac{R_2'' \frac{1-s}{s}}{Z}} = \frac{i_k'}{1 + \frac{R_2'' \frac{1-s}{s}}{z} e^{j\psi}}, \quad (2.48)$$

где

$$i_k' = \frac{\dot{U}}{Z}, \quad (2.49)$$

$$Z = z e^{j\varphi}, \quad (2.50)$$

$$\varphi = \operatorname{arcctg} \frac{R_1' + R_2''}{x_1' + x_2''}, \quad (2.51)$$

$$z = \sqrt{(R_1' + R_2'')^2 + (x_1' + x_2'')^2}, \quad (2.52)$$

$$\psi = -\varphi, \quad (2.53)$$

$$\dot{U} = U e^{j\psi_u}. \quad (2.54)$$

Уравнение (2.48) представляет собой уравнение круговой диаграммы тока  $i'$ .

Построим круговую диаграмму тока  $i'$ , приняв  $\psi_u = 0$  (рис. 2.5).

Запишем комплекс действующего значения напряжения, приняв  $\psi_u = 0$ :

$$\dot{U} = U. \quad (2.55)$$

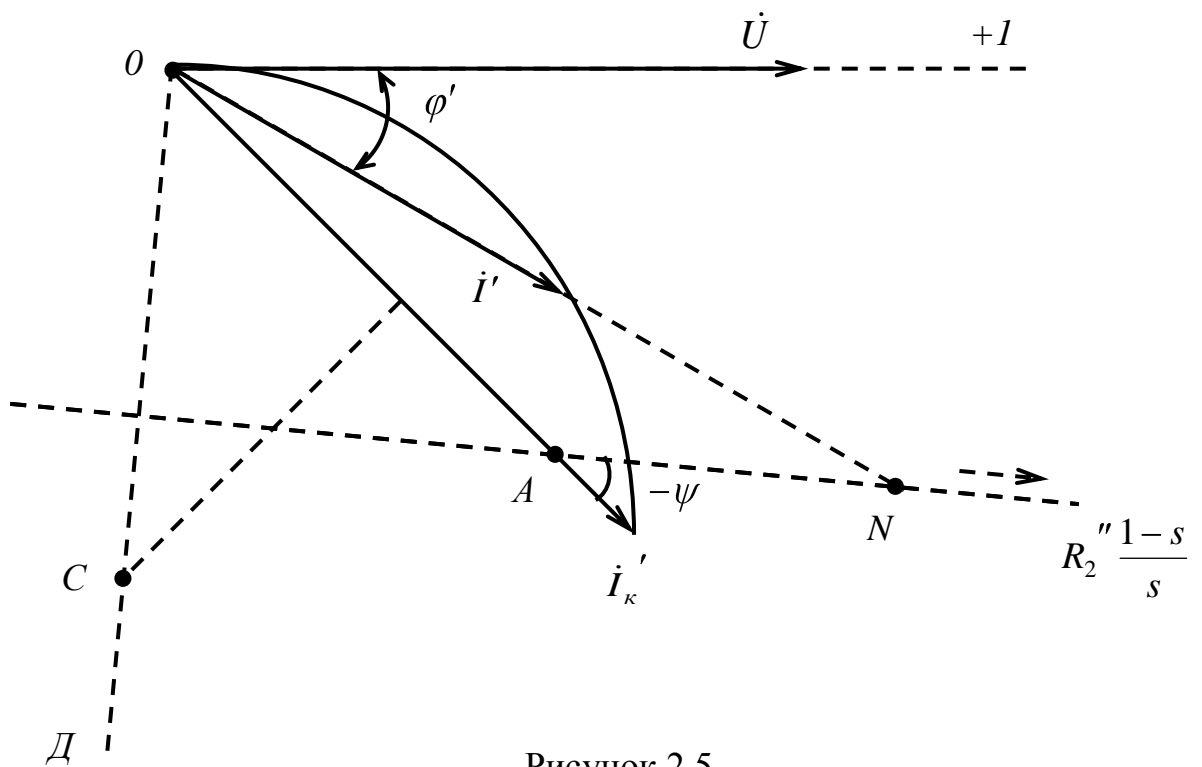


Рисунок 2.5

Запишем комплекс полной мощности в указанной ветке:

$$\tilde{S}' = \dot{U} I'^* , \quad (2.56)$$

где

$$I'^* = I' e^{j\varphi'} . \quad (2.57)$$

Тогда

$$\tilde{S}' = UI' e^{j\varphi'} = S' e^{j\varphi'} . \quad (2.58)$$

В другом виде

$$\tilde{S}' = \dot{U} \frac{I_{\kappa}'^*}{1 + \frac{R_2'' \frac{1-s}{s}}{z} e^{j\psi}}. \quad (2.59)$$

где

$$I_{\kappa}'^* = I_{\kappa}' e^{j\varphi_{\kappa}'}. \quad (2.60)$$

Подставим  $\dot{U}$  и  $I_{\kappa}'$  в (2.59) и получим:

$$\tilde{S}' = \frac{U I_{\kappa}' e^{j\varphi_{\kappa}'}}{1 + \frac{R_2'' \frac{1-s}{s}}{z} e^{j\psi}} = \frac{\tilde{S}_{\kappa}'}{1 + \frac{R_2'' \frac{1-s}{s}}{z} e^{j\psi}}. \quad (2.61)$$

Уравнение (2.61) представляет собой уравнение круговой диаграммы комплекса полной мощности  $\tilde{S}'$ .

Построим круговую диаграмму комплекса полной мощности (рис.2.6)

Проекция комплекса полной мощности  $\tilde{S}'$  на ось напряжения представляет собой общую активную мощность в этой ветке  $P'$ , то есть:

$$P' = S' \cos \varphi'. \quad (2.62)$$

Активная мощность, которая передается на вал:

$$P_2 = R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2. \quad (2.63)$$

Тогда переменные потери активной мощности:

$$\Delta P_M = 3(P' - P_2). \quad (2.64)$$

Суммарная полная активная мощность потерь:

$$\Delta P = \Delta P_{CH} + \Delta P_M. \quad (2.65)$$

Уравнение (2.64) можно записать в другом виде:

$$\Delta P_M = 3 \frac{R'_1 + R''_2}{R'_1 + R''_2/s} P', \quad (2.66)$$

Таким образом, с помощью круговой диаграммы комплекса полной мощности  $\tilde{S}'$  можно найти переменные потери активной мощности в функции скольжения  $s$ .

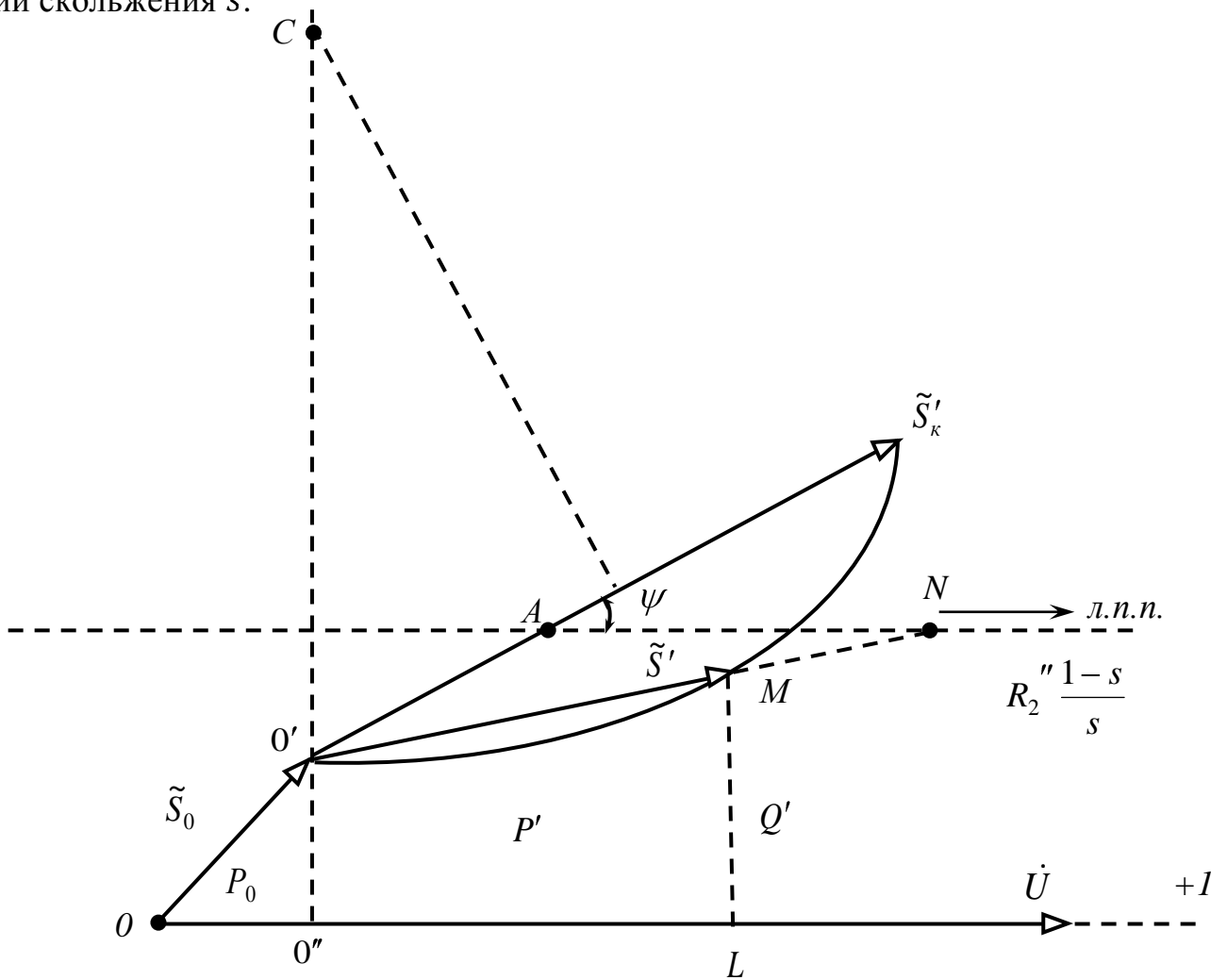


Рисунок 2.6

Для электродвигателя типоразмера 4A100S2Y3 рассчитаем круговую диаграмму комплекса полной мощности:

$$Z = R_1' + R_2'' + j(x_1' + x_2'') = 4,985e^{j60^\circ} \text{ Ом},$$

$$I_{\kappa}' = \frac{\dot{U}}{Z} = 44,13e^{-j60^\circ} \text{ А},$$

$$\tilde{S}_{\kappa}' = \dot{U} I_{\kappa}'^* = 9708,6e^{j60^\circ} \text{ ВА}.$$

## 2.4 Скольжение асинхронного электродвигателя в функции загрузки со стороны рабочей машины

Исследуем скольжение асинхронного электродвигателя в функции коэффициента загрузки рабочей машины.

Запишем основное уравнение движения электропривода рабочей машины:

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_c = M, \quad (2.67)$$

где  $J$  – момент инерции системы «электродвигатель – рабочая машина»,  
 $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$M_c$  – приведенный к валу двигателя момент сопротивления рабочей машины,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;

$M$  – момент, который развивается электродвигателем,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ .

В установившемся режиме:

$$M_c = M. \quad (2.68)$$

Запишем эмпирическое выражение момента сопротивления рабочей машины:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x; \quad (2.69)$$

$$M_{сн} = \kappa_3 M_n, \quad (2.70)$$

где  $M_0$  – момент трогания рабочей машины,  $H \cdot м$ ;

$M_{сн}$  – номинальный момент сопротивления рабочей машины при номинальной угловой скорости электродвигателя,  $H \cdot м$ ;

$\omega$  – угловая скорость рабочей машины,  $c^{-1}$ ;

$\omega_n$  – номинальная угловая скорость электродвигателя и рабочей машины,  $c^{-1}$ ;

$x$  – коэффициент, который характеризует рабочую машину (0, 1, 2, -2);

$\kappa_3$  – коэффициент загрузки рабочей машины;

$M_n$  – номинальный момент электродвигателя,  $H \cdot м$ .

Представим механические характеристики электродвигателя на рабочем участке и рабочей машины (рис.2.7)

Найдем зависимость  $M_c$  в функции коэффициента загрузки  $\kappa_3$  и скольжения, для чего подставим в (2.70) зависимости:

$$M_{сн} = \kappa_3 M_n, \quad (2.71)$$

и

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{1 - s}{1 - s_n}; \quad (2.72)$$

В результате получим:

$$M_c = M_0 + (\kappa_3 M_H - M_0) \left( \frac{1-s}{1-s_H} \right)^x ; \quad (2.73)$$

Найдем зависимость  $M$  в функции скольжения  $s$ , рассмотрев подобные треугольники:

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_H} = \frac{M}{M_H}. \quad (2.74)$$

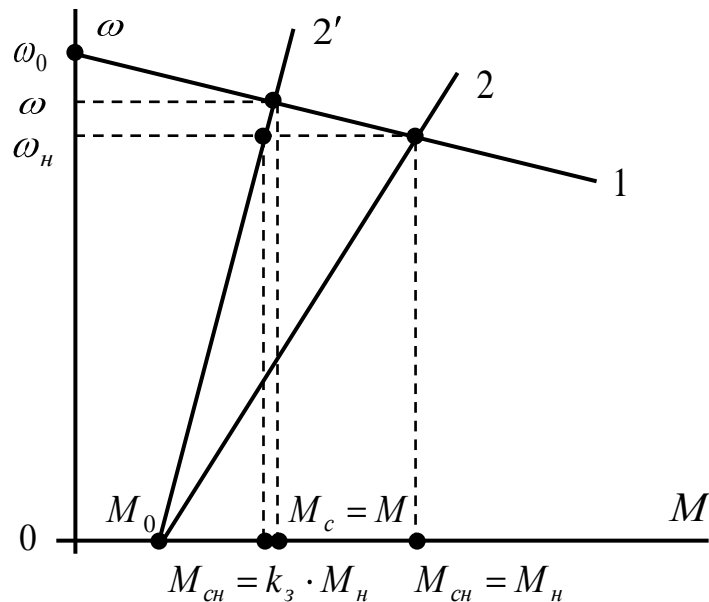


Рисунок 2.7 Механические характеристики электродвигателя 1 и рабочей машины при разной нагрузке 2 и 2'

После преобразования получаем:

$$M = M_H \frac{s}{s_H}. \quad (2.75)$$

Подставляем (2.73) и (2.75) в (2.69) и получаем:

$$M_H \frac{s}{s_H} = M_0 + (\kappa_3 M_H - M_0) \left( \frac{1-s}{1-s_H} \right)^x. \quad (2.76)$$

Перепишем (2.76) в относительных единицах:

$$\frac{s}{s_H} = m_0 + (\kappa_3 - m_0) \left( \frac{1-s}{1-s_H} \right)^x, \quad (2.77)$$

где

$$m_0 = \frac{M_0}{M_H}. \quad (2.78)$$

Найдем зависимость скольжения от коэффициента загрузки.

Для привода рабочей машины с независимой механической характеристикой ( $x = 0$ ) находим:

$$s = s_H \kappa_3. \quad (2.79)$$

Для привода рабочей машины с линейно-возрастающей механической характеристикой ( $x = 1$ ) находим:

$$s = \frac{\kappa_3 - m_0 s_H}{\frac{1-s_H}{s_H} + \kappa_3 - m_0}. \quad (2.80)$$

Для привода рабочей машины с параболической механической характеристикой ( $x = 2$ ) находим:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.81)$$

где

$$a = \kappa_3 - m_0; \quad (2.82)$$

$$b = -2(\kappa_3 - m_0) - \frac{(1-s_H)^2}{s_H}; \quad (2.83)$$

$$c = m_0(1 - s_n)^2 + (\kappa_3 - m_0). \quad (2.84)$$

Таким образом, при номинальном напряжении скольжение электродвигателя зависит от момента трогания рабочей машины  $m_0$ , коэффициента ее загрузки  $\kappa_3$  и номинального скольжения  $s_n$ .

## 2.5 Скольжение асинхронного электродвигателя в функции уровня питающего напряжения и загрузки со стороны рабочей машины

Для исследования влияния сниженного напряжения на режим работы электродвигателя воспользуемся механическими характеристиками электродвигателя на рабочем участке при номинальном напряжении (характеристика 1) и сниженном напряжении (характеристика 2), а также механической характеристикой рабочей машины (характеристика 3) (рис. 2.14).

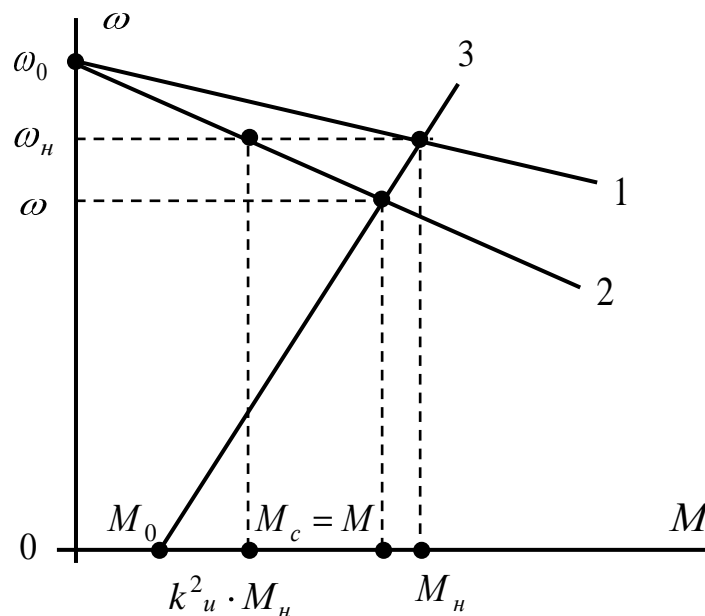


Рисунок 2.14 Механические характеристики электродвигателя и рабочей машины.

Из подобных треугольников имеем:

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_H} = \frac{M}{\kappa_u^2 M_H}, \quad (2.85)$$

откуда находим:

$$M = \frac{s}{s_H} \kappa_u^2 M_H. \quad (2.86)$$

Подставляем (2.86) и (2.73) в (2.69):

$$\frac{\kappa_u^2 M_H}{s_H} s = M_0 + (\kappa_3 M_H - M_0) \left( \frac{1-s}{1-s_H} \right)^x. \quad (2.87)$$

Перепишем уравнение в относительных единицах:

$$\kappa_u^2 \frac{s}{s_H} = m_0 + (\kappa_3 - m_0) \left( \frac{1-s}{1-s_H} \right)^x. \quad (2.88)$$

Найдем зависимость скольжения  $s$  от кратности приложенного напряжения  $\kappa_u$  и коэффициента загрузки  $\kappa_3$ .

Для привода рабочей машины с независимой механической характеристикой ( $x = 0$ ) находим:

$$s = \frac{\kappa_3}{\kappa_u^2} s_H. \quad (2.89)$$

Для привода рабочей машины с линейно-возрастающей механической характеристикой ( $x = 1$ ) находим:

$$s = \frac{\kappa_3 - m_0 s_H}{\frac{1-s_H}{s_H} \kappa_u^2 + \kappa_3 - m_0}. \quad (2.90)$$

Для привода рабочей машины с параболической механической характеристикой ( $x = 2$ ) находим:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.91)$$

где

$$a = \kappa_3 - m_0; \quad (2.92)$$

$$b = -2(\kappa_3 - m_0) - \frac{(1 - s_H)^2}{s_H} \kappa_u^2; \quad (2.93)$$

$$c = m_0(1 - s_H)^2 + (\kappa_3 - m_0). \quad (2.94)$$

Для исследования влияния повышения напряжения на режим работы электродвигателя воспользуемся механическими характеристиками электродвигателя при номинальном напряжении (характеристика 1) и повышенном напряжении (характеристика 2), а также механической характеристикой рабочей машины (характеристика 3) (рис. 2.33).

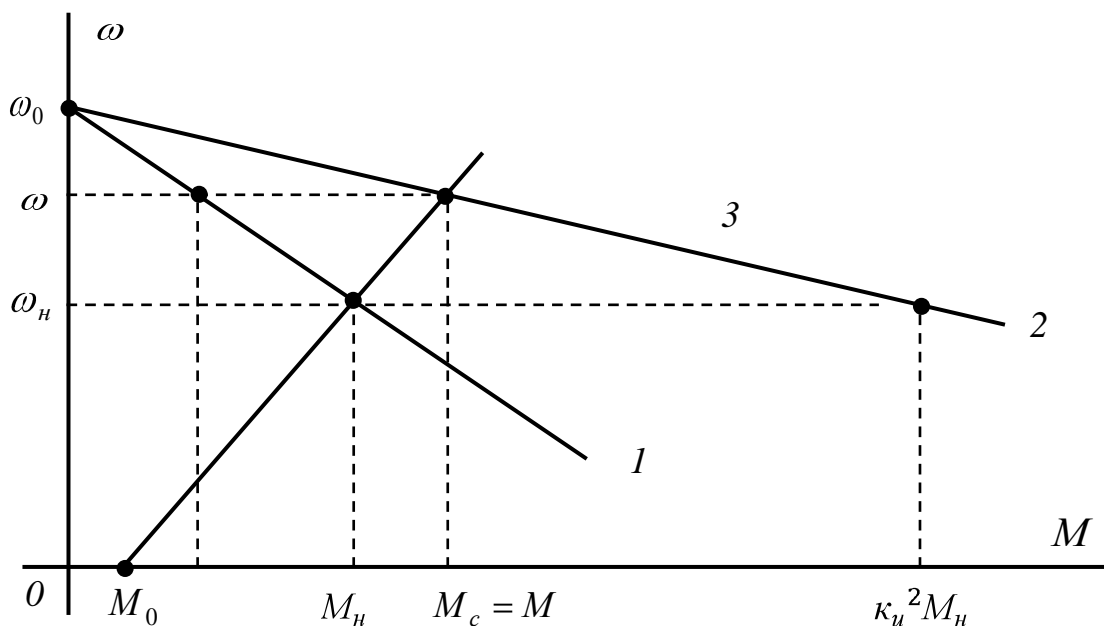


Рисунок 2.33 Механические характеристики электродвигателя и рабочей машины.

Из подобных треугольников можно записать:

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_n} = \frac{M}{M_n \kappa_u^2} \quad (2.95)$$

откуда находим:

$$M = \frac{M_n \kappa_u^2}{S_n} s. \quad (2.96)$$

Таким образом, мы получили выражение для момента, который развивается электродвигателем, аналогичное (2.86). Поэтому зависимость скольжения  $s$  от кратности приложенного напряжения и коэффициента загрузки будут описываться выражениями (2.89), (2.90), (2.91). Анализ этих зависимостей показывает, что с увеличением напряжения скольжение будет уменьшаться, и будет уменьшаться сила тока  $I'$ , но при этом будут увеличиваться намагничивающий ток и потери активной мощности в магнитопроводе.

Для привода рабочей машины с независимой механической характеристикой ( $x = 0$ ) находим:

$$s = \frac{\kappa_3}{\kappa_u^2} S_n. \quad (2.97)$$

## **2.6 Скольжение асинхронного электродвигателя в функции асимметрии питающего напряжения и загрузки со стороны рабочей машины**

В сельскохозяйственном производстве несимметрия напряжения определяется, как правило, несимметричной бытовой нагрузкой, которая носит активный характер. Поэтому принимаем с определенным допущением, что

напряжения по фазам сдвинуты на угол  $120^\circ$ , а величины напряжений отличаются.

Для условного идеального несимметричного генератора можно записать:

$$\dot{E}_A = mE_n; \quad (2.98)$$

$$\dot{E}_B = nE_n e^{-j120^\circ}; \quad (2.99)$$

$$\dot{E}_C = pE_n e^{j120^\circ}, \quad (2.100)$$

где  $m, n, p$  – коэффициенты несимметрии по фазам;

$E_n$  – номинальное значение фазной э.д.с.,  $B$ .

Коэффициенты несимметрии равняются отношению действующего значения э.д.с. фазы к номинальному значению, то есть:

$$m = \frac{E_A}{E_n}; \quad (2.101)$$

$$n = \frac{E_B}{E_n}; \quad (2.102)$$

$$p = \frac{E_C}{E_n}. \quad (2.103)$$

Разложим фазные э.д.с. на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\dot{E}_1 = \frac{1}{3} (mE_n + nE_n e^{-j120^\circ} e^{j120^\circ} + pE_n e^{j120^\circ} e^{-j120^\circ}) = \frac{E_n}{3} (m + n + p); \quad (2.104)$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_2 &= \frac{1}{3}(mE_H + nE_H e^{-j120^\circ} e^{-j120^\circ} + pE_H e^{j120^\circ} e^{j120^\circ}) = \\ &= \frac{E_H}{3}(m + ne^{-j240^\circ} + pe^{j240^\circ});\end{aligned}\quad (2.105)$$

$$\dot{E}_0 = \frac{1}{3}(mE_H + nE_H e^{-j120^\circ} + pE_H e^{j120^\circ}) = \frac{E_H}{3}(m + ne^{-j120^\circ} + pe^{j120^\circ}). \quad (2.106)$$

Запишем симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательностей электродвигателя:

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{E}_1}{R_1 + j(x_1 + x_M)} + \frac{\dot{E}_1/z'}{1 + \frac{R_2''/s}{z'} e^{j\psi}}; \quad (2.107)$$

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_1 + j(x_1 + x_M)} + \frac{\dot{E}_2/z'}{1 + \frac{R_2''/(2-s)}{z'} e^{j\psi}}; \quad (2.108)$$

$$\dot{i}_0 = 0. \quad (2.109)$$

Находим силы токов в фазах электродвигателя:

$$\dot{i}_A = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_0; \quad (2.110)$$

$$\dot{i}_B = a^2 \dot{i}_1 + a \dot{i}_2 + \dot{i}_0; \quad (2.111)$$

$$\dot{i}_C = a \dot{i}_1 + a^2 \dot{i}_2 + \dot{i}_0; \quad (2.112)$$

Находим среднеквадратичное значение силы тока электродвигателя:

$$I = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}. \quad (2.113)$$

Токи прямой и обратной последовательностей создают магнитные потоки, которые вращаются в противоположные стороны и создают вращающий и тормозной моменты (рис. 2.38).

Рассмотрим механические характеристики электродвигателя на рабочем участке (рис. 2.39).

Линеаризуем механическую характеристику, которая создана обратным магнитным потоком. Из подобных треугольников можно записать:

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{M_2}{M_{n2}}. \quad (2.114)$$

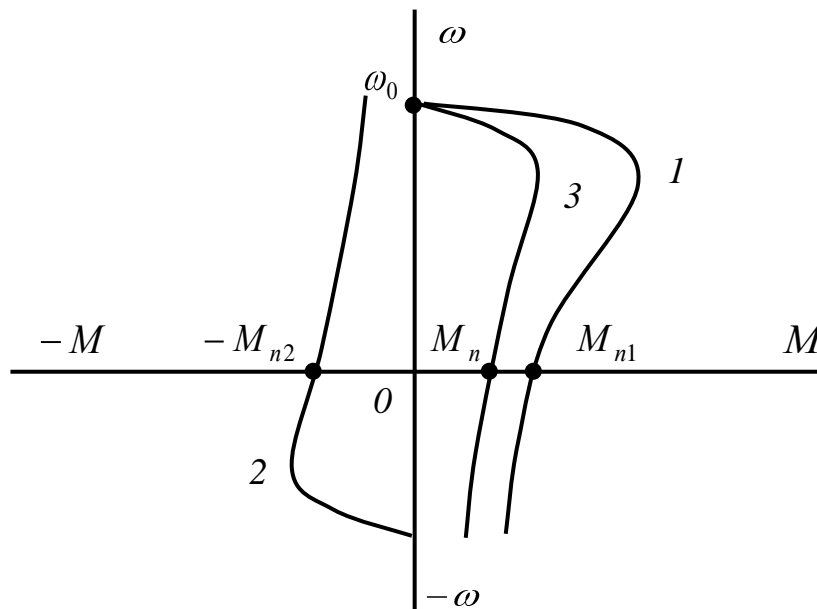


Рисунок 2.38 Механические характеристики электродвигателя:

- 1 – от действия токов прямой последовательности;
- 2 – от действия токов обратной последовательности;
- 3 – результирующая характеристика.

В свою очередь

$$M_{n2} = M_n \left( \frac{U_2}{U_H} \right)^2; \quad (2.115)$$

$$\frac{U_2}{U_n} = \frac{E_2}{E_n}, \quad (2.116)$$

где  $M_n$  – пусковой момент электродвигателя,  $H \cdot м$ ;

$U_2$  – действующее значение напряжения симметричной составляющей обратной последовательности,  $B$ ;

$U_n$  – номинальное фазное напряжение,  $B$ ;

$M_{n2}$  – пусковой момент, который создается обратным магнитным потоком,  $H \cdot м$ .

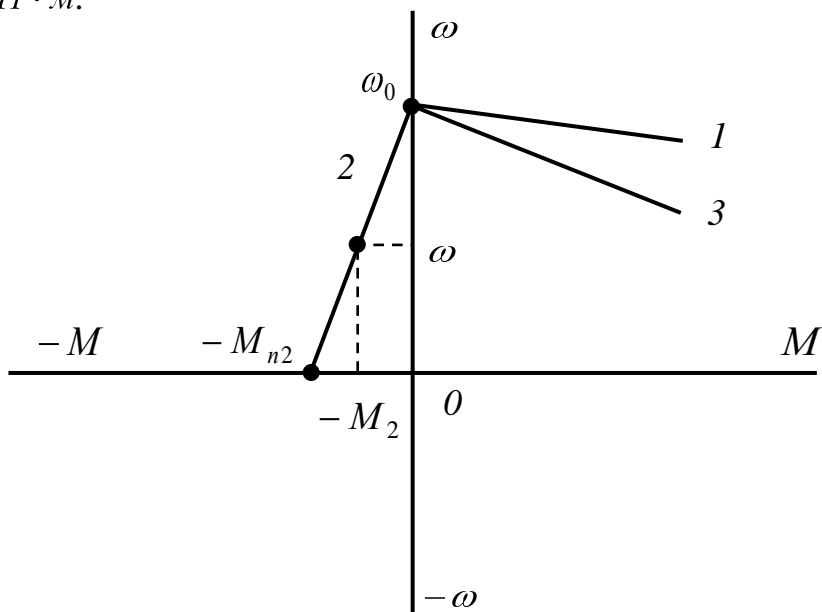


Рисунок 2.39 Механические характеристики электродвигателя на рабочем участке.

С учетом введенного обозначения получаем выражение обратного момента:

$$M_2 = M_n k_{u_2}^2 s. \quad (2.117)$$

Запишем выражение момента, который создается прямым магнитным потоком:

$$M_1 = \frac{s}{s_H} \kappa_{u_1}^2 M_n. \quad (2.118)$$

Находим выражение результирующей механической характеристики:

$$M = M_1 - M_2 = \left( \frac{\kappa_{u_1}^2 M_n}{s_H} - M_n \kappa_{u_2}^2 \right) s. \quad (2.119)$$

Подставим (2.117) и (2.118) в (2.119) и получим:

$$M = M_1 - M_2 = \left( \frac{\kappa_{u_1}^2 M_n}{s_H} - M_n \kappa_{u_2}^2 \right) s = M_0 + (\kappa_3 M_n - M_0) \left( \frac{1-s}{1-s_H} \right)^x. \quad (2.120)$$

Перепишем (2.120) в относительных единицах:

$$\left( \frac{\kappa_{u_1}^2}{s_H} - m_n \kappa_{u_2}^2 \right) s = m_0 + (\kappa_3 - m_0) \left( \frac{1-s}{1-s_H} \right)^x. \quad (2.121)$$

Находим зависимость скольжения от кратности напряжения прямой и обратной последовательностей  $\kappa_{u_1}$  и  $\kappa_{u_2}$  и коэффициента загрузки  $\kappa_3$ .

Для привода рабочей машины с независимой механической характеристикой ( $x = 0$ ) получаем:

$$s = \frac{\kappa_3}{\kappa_{u_1}^2 - m_n \kappa_{u_2}^2} s_H. \quad (2.122)$$

Для привода рабочей машины с линейно-возрастающей механической характеристикой ( $x = 1$ ) получаем:

$$s = \frac{\kappa_3 - m_0 s_H}{(1 - s_H) \left( \frac{\kappa_{u_1}^2}{s_H} - m_n \kappa_{u_2}^2 \right) + \kappa_3 - m_0}. \quad (2.123)$$

Для привода рабочей машины с параболической механической характеристикой ( $x = 2$ ) получаем:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.124)$$

где

$$a = \kappa_3 - m_0; \quad (2.125)$$

$$b = -2(\kappa_3 - m_0) - (1 - s_H) \left( \frac{\kappa_{u_1}^2}{s_H} - m_n \kappa_{u_2}^2 \right); \quad (2.126)$$

$$c = m_0(1 - s_H)^2 + (\kappa_3 - m_0). \quad (2.127)$$

Таким образом, при асимметрии напряжения скольжение электродвигателя зависит от кратности напряжений прямой и обратной последовательностей  $\kappa_{u_1}$  и  $\kappa_{u_2}$ , коэффициента загрузки  $\kappa_3$ , кратности пускового момента  $m_n$ , относительного момента трогания  $m_0$  и номинального скольжения  $s_H$ .

## 2.7 Скольжение асинхронного электродвигателя при неполнофазном питании

При неполнофазном питании, например, в результате обрыва питающего провода в цепи фазы  $A$ , расчетная схема принимает вид, приведенный на рис. 2.40

Напряжения на фазах электродвигателя, которые остались в работе:

$$\dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_N; \quad (2.128)$$

$$\dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_N, \quad (2.129)$$

где  $\dot{U}_N$  – напряжение смещения нейтрали, В.

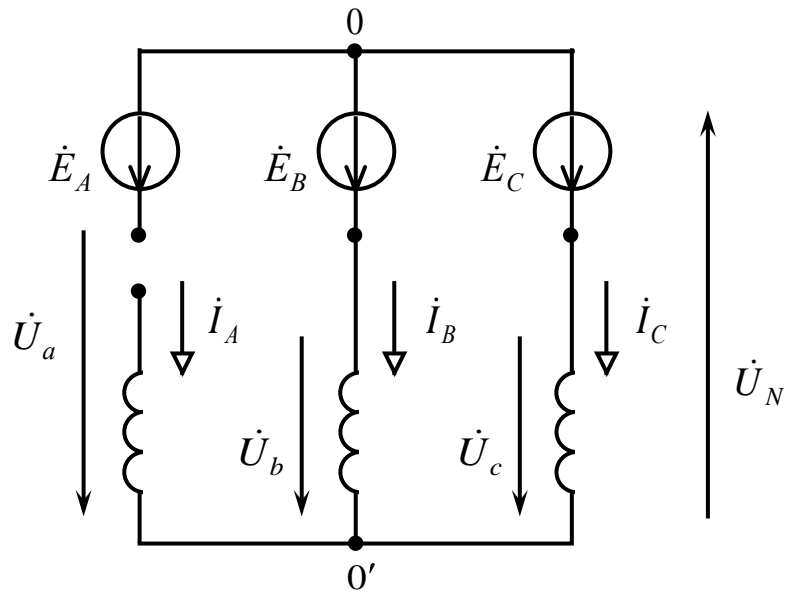


Рисунок 2.40 Расчетная схема цепи электродвигателя при обрыве в фазе А.

Найдем напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (2.130)$$

где

$$\dot{E}_A = E_n; \quad (2.131)$$

$$\dot{E}_B = E_n e^{-j120^\circ}; \quad (2.132)$$

$$\dot{E}_C = E_n e^{j120^\circ}; \quad (2.133)$$

$$Y_A = 0; \quad (2.134)$$

$$Y_B = Y_C = Y. \quad (2.135)$$

Тогда

$$\dot{U}_N = -0,5\dot{E}_A = -0,5E_n, \quad (2.136)$$

Находим напряжения на фазах, которые остались в работе:

$$\dot{U}_b = \dot{E}_B + 0,5\dot{E}_A; \quad (2.137)$$

$$\dot{U}_c = \dot{E}_C + 0,5\dot{E}_A. \quad (2.138)$$

После преобразований получаем:

$$\dot{U}_b = -j \frac{\sqrt{3}}{2} E_n; \quad (2.139)$$

$$\dot{U}_c = j \frac{\sqrt{3}}{2} E_n. \quad (2.140)$$

Напряжение в разрыве цепи:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_A + 0,5\dot{E}_A = 1,5E_n. \quad (2.141)$$

Находим токи в фазах, которые остались в работе:

$$i_A = 0; \quad (2.142)$$

$$i_B = \frac{\dot{U}_b}{R_1 + j(x_1 + x_M)} + \frac{\dot{U}_b/z'}{1 + \frac{R_2''/s}{z'} e^{j\psi}}; \quad (2.143)$$

$$i_C = \frac{\dot{U}_c}{R_1 + j(x_1 + x_M)} + \frac{\dot{U}_c/z'}{1 + \frac{R_2''/s}{z'} e^{j\psi}}. \quad (2.144)$$

Находим симметричные составляющие напряжений прямой и обратной последовательностей на фазах, которые остались в работе:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} \left( -j \frac{\sqrt{3}}{2} E_H e^{j120^\circ} + j \frac{\sqrt{3}}{2} E_H e^{-j120^\circ} \right) = \frac{\sqrt{3} E_H}{6} (e^{j30^\circ} + e^{-j30^\circ}) = \frac{E_H}{2}; \quad (2.145)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \left( -j \frac{\sqrt{3}}{2} E_H e^{-j120^\circ} + j \frac{\sqrt{3}}{2} E_H e^{j120^\circ} \right) = \frac{\sqrt{3} E_H}{6} (e^{j-210^\circ} + e^{j210^\circ}) = -\frac{E_H}{2}; \quad (2.146)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \left( -j \frac{\sqrt{3}}{2} E_H + j \frac{\sqrt{3}}{2} E_H \right) = 0. \quad (2.147)$$

Под действием симметричных составляющих напряжений протекают симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательностей, которые создают прямые и обратные вращающиеся магнитные поля. Им отвечают механические характеристики (рис. 2.41)

Скольжение электродвигателя в этом случае находим по формулам (2.122), (2.123), (2.124).

Так как кратности напряжений симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей равны между собой, то в сравнении с несимметричным неполнофазный режим более тяжелый: результирующий пусковой момент равняется нулю, скольжение при тех самых условиях больше.

Находим симметричные составляющие напряжений прямой и обратной последовательностей на фазах, которые остались в работе:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{1}{3} \left( -j \frac{\sqrt{3}}{2} 220 e^{j120^\circ} + j \frac{\sqrt{3}}{2} 220 e^{-j120^\circ} \right) = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{6} (e^{j30^\circ} + e^{-j30^\circ}) = \\ &= \frac{220}{2} = 110 \text{ В};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \frac{1}{3} \left( -j \frac{\sqrt{3}}{2} 220 e^{-j120^\circ} + j \frac{\sqrt{3}}{2} 220 e^{j120^\circ} \right) = \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{6} (e^{j-210^\circ} + e^{j210^\circ}) = -\frac{220}{2} = -110;\end{aligned}$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \left( -j \frac{\sqrt{3}}{2} 220 + j \frac{\sqrt{3}}{2} 220 \right) = 0.$$

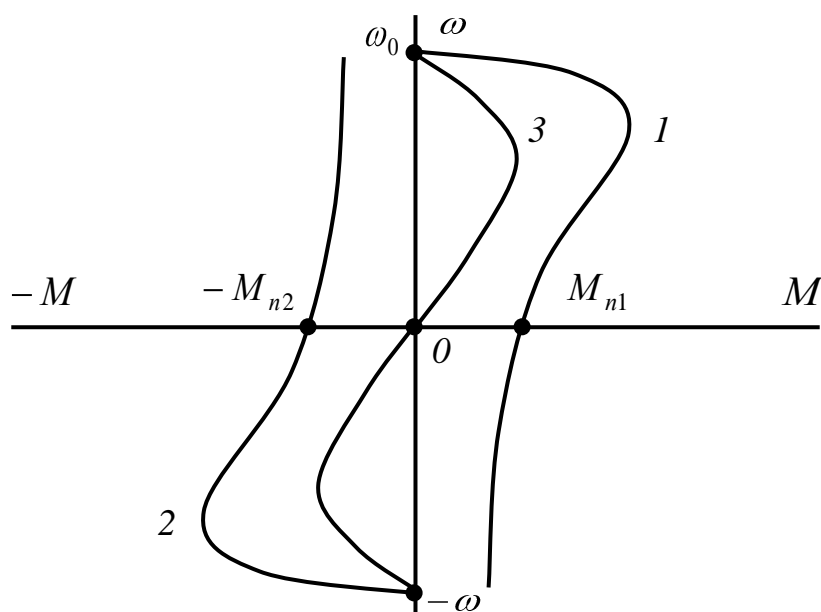


Рисунок 2.41 Механические характеристики асинхронного электродвигателя при неполнофазном питании:

- 1 – от действия токов прямой последовательности;
- 2 – от действия токов обратной последовательности;
- 3 – результирующая механическая характеристика.

Рассчитываем кратности напряжений прямой и обратной последовательностей:

$$\kappa_{u1} = \kappa_{u2} = \frac{U_1}{U_H} = \frac{U_2}{U_H} = \frac{110}{220} = 0,5. \quad (2.148)$$

Находим зависимости скольжения от кратностей напряжений прямой и обратной последовательностей  $\kappa_{u1}$ ,  $\kappa_{u2}$  и коэффициента загрузки  $\kappa_3$ .

Для привода рабочей машины с независимой механической характеристикой ( $x = 0$ ) получаем:

$$s = \frac{\kappa_3}{\kappa_{u1}^2 - m_n \kappa_{u2}^2} s_H. \quad (2.149)$$

Для привода рабочей машины с линейно-возрастающей механической характеристикой ( $x = 1$ ) получаем:

$$s = \frac{\kappa_3 - m_0 s_H}{(1 - s_H) \left( \frac{\kappa_{u1}^2}{s_H} - m_n \kappa_{u2}^2 \right) + \kappa_3 - m_0}. \quad (2.150)$$

Для привода рабочей машины с параболической механической характеристикой ( $x = 2$ ) получаем:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.151)$$

где

$$a = \kappa_3 - m_0; \quad (2.152)$$

$$b = -2(\kappa_3 - m_0) - (1 - s_H) \left( \frac{\kappa_{u_1}^2}{s_H} - m_n \kappa_{u_2}^2 \right); \quad (2.153)$$

$$c = m_0(1 - s_H)^2 + (\kappa_3 - m_0). \quad (2.154)$$

## 2.8 Потери активной энергии в асинхронном электродвигателе в функции температуры окружающей среды и загрузки со стороны рабочей машины

Установившееся превышение температуры обмотки асинхронного электродвигателя упрощенно может быть найдено таким способом:

$$\tau_y = \frac{\Delta P_{сн} + \kappa^2 \Delta P_{мн}}{A}, \quad (2.155)$$

где  $\Delta P_{сн}$  – расчетные постоянные потери активной мощности (потери в стали) в номинальном режиме работы, *Вт*;

$\Delta P_{мн}$  – расчетные переменные потери активной мощности в проводниках (потери в меди) в номинальном режиме работы, *Вт*;

$\kappa$  – кратность силы тока нагрузки относительно номинальной силы тока, *A*;

$A$  – теплоотдача электродвигателя, *Вт/°С*.

За расчетную температуру изоляции класса В принята температура  $\vartheta_p = 75^\circ\text{С}$ , класса F -  $\vartheta_p = 115^\circ\text{С}$ . Изоляция класса В при номинальной нагрузке электродвигателя ( $\kappa = 1$ ) будет иметь превышение температуры, равное длительно допустимому, то есть  $90^\circ\text{С}$ , лишь при температуре среды  $\vartheta_{ср} = -15^\circ\text{С}$ ; изоляция класса F при номинальной нагрузке электродвигателя будет иметь превышение температуры, равное длительно допустимому, то есть  $115^\circ\text{С}$ , лишь при температуре окружающего среды  $\vartheta_{ср} = 0^\circ\text{С}$ , потому что

только в этом случае потери мощности в проводниках будут равняться расчетным потерям  $\Delta P_{ми}$ . При других значениях температуры окружающей среды, а следовательно и температуры проводников, потери мощности в последних при номинальной нагрузке будут равны:

$$\Delta P'_{ми} = \Delta P_{ми} (1 + \alpha(\tau_y + \vartheta_{cp} - \vartheta_p)), \quad (2.156)$$

где  $\vartheta_{cp}$  – температура окружающей среды, °C ;

$\vartheta_p$  – расчетная температура проводников, °C .

Рассчитываем зависимость установившегося превышения температуры электродвигателя в функции кратности силы тока нагрузки относительно номинальной силы тока.

$$\tau_y = f(k). \quad (2.157)$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Зависимость установившегося превышения температуры обмотки в функции кратности силы электрического тока

$k$	0,18	0,31	0,39	0,49	0,57	0,65	0,72	0,84	1,01	1,02	1,11
$\tau_y, ^\circ\text{C}$	39,4	42,2	44,8	49,0	52,7	57,1	61,9	70,2	84,1	85,0	94,0

На основании полученных данных строим зависимость установившегося превышения температуры электродвигателя в функции кратности силы тока нагрузки относительно номинальной силы тока (рис. 2.42)

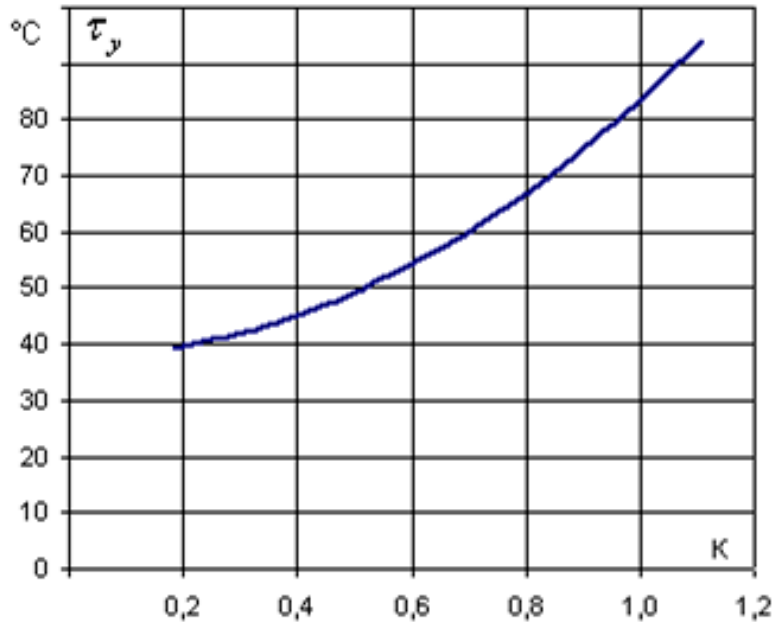


Рисунок 2.42 Зависимость установившегося превышения температуры обмотки в функции кратности силы электрического тока.

Рассчитываем зависимость потерь активной мощности при номинальной нагрузке в функции температуры окружающей среды.

$$\Delta P'_{mn} = f(\vartheta_{cp}). \quad (2.158)$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Зависимость потерь активной мощности в номинальном режиме работы в асинхронном электродвигателе в функции температуры окружающей среды

$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40
$\Delta P'_{mn}, \text{Вт}$	355,2	368,4	381,6	394,9

На основании полученных данных строим зависимость потерь активной мощности при номинальной нагрузке в функции температуры окружающей

щей среды (рис. 2.43).

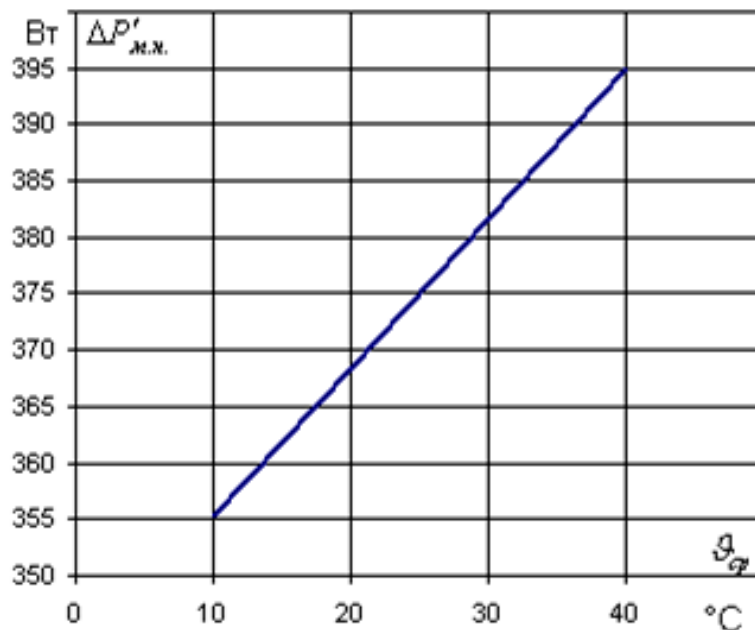


Рисунок 2.43 Зависимость потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе в функции температуры окружающей среды.

## 2.9 Потери активной энергии в асинхронном электродвигателе под влиянием комплекса эксплуатационных воздействий

Исследуем зависимость потерь активной мощности в электродвигателе типоразмера 4A100S2Y3 в функции кратности напряжения и коэффициента загрузки рабочей машины.

Результаты приведены на рисунке 2.44.

Проведем исследования зависимости коэффициента потерь от активной мощности на валу и температуры окружающей среды.

Для примера, определяем суммарные потери активной мощности  $\Delta P$  в асинхронном электродвигателе типоразмера 4A100S2Y3 с учетом температуры окружающей среды  $\theta_{ср}$  для различных значений скольжения электродвигателя  $s$ . Так же находим соответствия заданных значений скольжения  $s$

механической мощности, передаваемой на вал рабочей машины  $P_2$ .

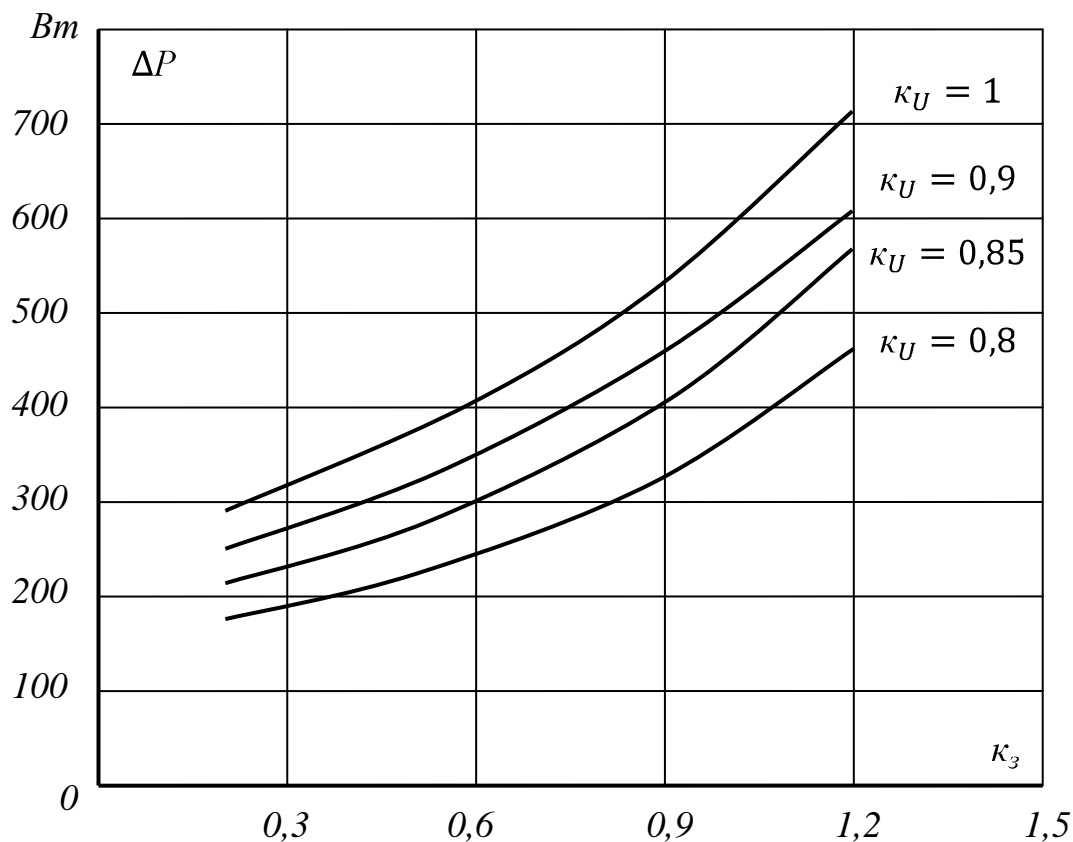


Рисунок 2.44 Зависимость потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе в функции кратности приложенного напряжения и коэффициента загрузки рабочей машины.

На основе этих данных находим коэффициент потерь  $\kappa_n$  активной мощности асинхронного электродвигателя. Результаты заносим в таблицу 2.4.

Из расчетов видно, что при увеличении температуры окружающей среды  $\vartheta_{cp}$ , суммарные потери активной мощности  $\Delta P$  и коэффициент потерь  $\kappa_n$  возрастают. На основе данных таблицы 2.4 строим зависимости коэффициента потерь активной мощности  $\kappa_n$  в функции активной мощности на валу  $P_2$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 30^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 40^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 50^\circ\text{C}$ . Графики зависимостей показаны на рисунке 2.45.

Таблица 2.4 - Результаты расчета зависимостей коэффициента потерь  $\kappa_n$  в функции активной мощности на валу  $P_2$

$s$	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,05	0,055
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$I'^2, A$	1,18	4,62	10,25	17,9	27,5	38,9	52,04	66,7	99,6	118,05
$\kappa^2$	0,025	0,1	0,22	0,38	0,59	0,83	1,12	1,43	2,14	2,54
$P_{max}, Bm$	708	1380	2031	2647	3236	3795	4330	4831	5711	6121
$P_m + P_0, Bm$	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112
$P_0, Bm$	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
$P_\Sigma, Bm$ , $\vartheta_{cp} = 10^\circ C$	8,3	33,5	75,7	135,3	220,4	328,5	477,4	664,4	1252,2	1740,6
$P_\Sigma, Bm$ , $\vartheta_{cp} = 20^\circ C$	8,6	35,0	79,0	141,1	229,6	341,6	495,5	687,8	1285,9	1775,6
$P_\Sigma, Bm$ , $\vartheta_{cp} = 30^\circ C$	9,0	36,5	82,3	146,9	238,8	354,8	513,6	711,2	1319,6	1811,1
$P_\Sigma, Bm$ , $\vartheta_{cp} = 40^\circ C$	9,4	38,0	85,6	152,8	248,0	368,0	531,7	734,6	1353,4	1847,0
$P_\Sigma, Bm$ , $\vartheta_{cp} = 50^\circ C$	9,7	39,5	88,9	158,6	257,2	381,1	549,8	757,9	1387,3	1883,3
$\tau_y, ^\circ C$ , $\vartheta_{cp} = 10^\circ C$	38,2	41,5	46,9	54,5	65,4	79,2	98,2	122,1	197,3	259,7
$\tau_y, ^\circ C$ , $\vartheta_{cp} = 20^\circ C$	37,4	40,7	46,2	54,0	65,1	79,1	98,3	122,3	197,1	258,3
$\tau_y, ^\circ C$ , $\vartheta_{cp} = 30^\circ C$	36,7	40,0	45,6	53,5	64,8	78,9	98,4	122,5	196,9	257,0

Продолжение таблицы 2.4

$\tau_y, ^\circ\text{C},$ $\vartheta_{cp} = 40^\circ\text{C}$	35,9	39,4	45,1	53,1	64,5	78,8	98,4	122,7	196,8	255,8
$\tau_y, ^\circ\text{C},$ $\vartheta_{cp} = 50^\circ\text{C}$	35,2	38,7	44,5	52,7	64,2	78,7	98,5	122,9	196,6	254,7
$P_M, \text{Bm}$	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
$\Delta P, \text{Bm},$ $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$	282,3	307,5	349,7	409,3	494,4	602,5	751,4	938,4	1526,2	2014,6
$\Delta P, \text{Bm},$ $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$	282,6	309,0	353,0	415,1	503,6	615,6	769,5	961,8	1559,9	2049,6
$\Delta P, \text{Bm},$ $\vartheta_{cp} = 30^\circ\text{C}$	283,0	310,5	356,3	420,9	512,8	628,8	787,6	985,2	1593,6	2085,1
$\Delta P, \text{Bm},$ $\vartheta_{cp} = 40^\circ\text{C}$	283,4	312,0	359,6	426,8	522,0	642,0	805,7	1008,6	1627,4	2121,0
$\Delta P, \text{Bm},$ $\vartheta_{cp} = 50^\circ\text{C}$	283,7	313,5	362,9	432,6	531,2	655,1	823,8	1031,9	1661,3	2157,3
$P_2, \text{Bm}$	596	1268	1919	2535	3124	3683	4218	4713	5599	6009
$\kappa_n,$ $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$	0,473	0,242	0,182	0,161	0,158	0,163	0,178	0,198	0,272	0,335
$\kappa_n,$ $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$	0,474	0,243	0,183	0,163	0,161	0,167	0,182	0,203	0,278	0,341
$\kappa_n,$ $\vartheta_{cp} = 30^\circ\text{C}$	0,474	0,244	0,185	0,166	0,164	0,170	0,186	0,208	0,284	0,347
$\kappa_n,$ $\vartheta_{cp} = 40^\circ\text{C}$	0,475	0,246	0,187	0,168	0,167	0,174	0,191	0,213	0,290	0,353
$\kappa_n,$ $\vartheta_{cp} = 50^\circ\text{C}$	0,476	0,247	0,189	0,170	0,170	0,177	0,195	0,218	0,296	0,359

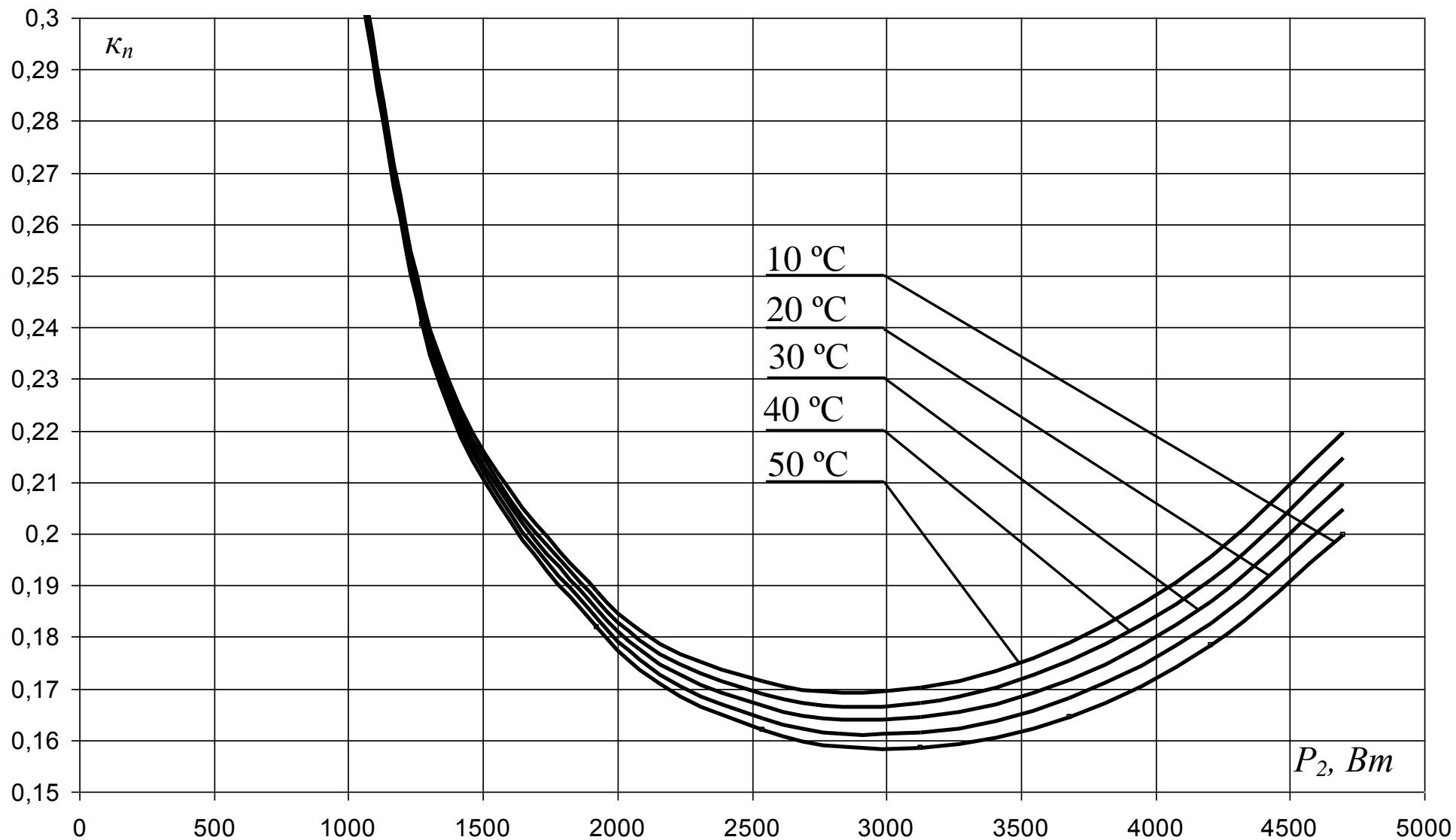


Рисунок 2.45 Зависимости коэффициента потерь активной мощности  $K_n$  в функции активной мощности на валу  $P_2$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 30^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 40^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 50^\circ\text{C}$ .

## 2.10 Способ обеспечения энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя

В результате проведенных исследований предложена математическая модель энергосберегающего режима работы асинхронного электродвигателя и алгоритм ее использования. Вариант такой математической модели приведен на примере привода рабочей машины с линейно – возрастающей механической характеристикой.

Алгоритм использования модели следующий:

1. Измеряется скольжение  $s$ .
2. Рассчитывается коэффициент загрузки рабочей машины, используя (2.80):

$$\kappa_z = \frac{\left(\frac{1 - s_H}{s_H} - m_0\right) s + m_0 s_H}{1 - s}. \quad (2.159)$$

3. Рассчитывается скольжение электродвигателя при заданном значении кратности приложенного напряжения и найденном значении коэффициента загрузки рабочей машины, используя (2.90):

$$s' = \frac{\kappa_z - m_0 s_H}{\frac{1 - s_H}{s_H} \kappa_U^2 + \kappa_z - m_0}. \quad (2.160)$$

4. Рассчитываются потери активной мощности в намагничивающем контуре при заданном значении кратности приложенного напряжения:

$$\Delta P_c' = \kappa_U^2 \Delta P_{сн}. \quad (2.161)$$

5. Рассчитываются потери активной мощности в обмотках электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{м}}' = 3(R_1' + R_2'')I'^2. \quad (2.162)$$

$$I'^2 = \frac{\kappa_U^2 U_n^2}{(R_1' + R_2''/s')^2 + (x_1' + x_2'')^2}. \quad (2.163)$$

6. Рассчитываются общие потери активной мощности:

$$\Delta P' = \Delta P_c' + \Delta P_{\text{м}}'. \quad (2.164)$$

7. Находится значение  $\kappa_U$  при условии:

$$\Delta P = \min. \quad (2.165)$$

Микропроцессорная система анализирует режим работы электродвигателя по предложенному алгоритму.

Техническая система изменяет величину подводимого напряжения к электродвигателю до оптимального значения, обеспечивая энергосберегающий эксплуатационный режим работы асинхронного электродвигателя.

Структурная схема системы обеспечения энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя приведена на рисунке 2.46.

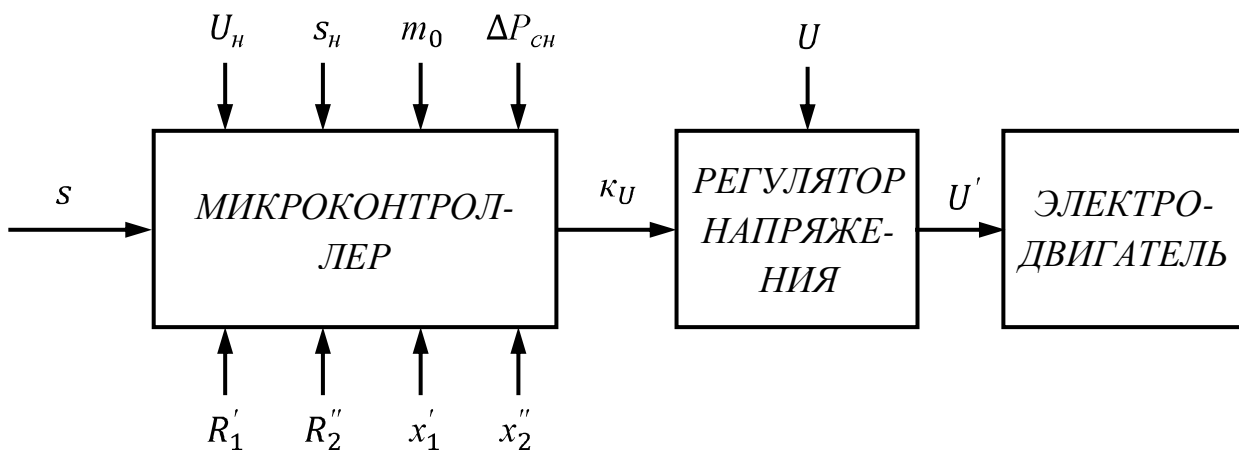


Рис. 2.46 Структурная схема системы обеспечения энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя

### РАЗДЕЛ 3. РАСХОД РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОН- НЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

#### 3.1 Общие закономерности теплового старения изоляции электрических машин

Среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции электрических машин, одним из основных является тепловое старение. При анализе эксплуатационных режимов особое значение приобретают методы расчета скорости теплового старения электрической изоляции и определение срока ее службы.

Первые работы в этом направлении имели преимущественно экспериментальный характер и относились главным образом к изоляции класса А. В результате этих работ было сформулировано так называемое «правило восьми градусов», в соответствии с которым повышение температуры изоляции на каждые восемь градусов сокращает срок ее службы вдвое [7]. Аналитически это правило выражается в виде следующего уравнения:

$$D = D_0 \cdot e^{0,0866\vartheta}, \quad (3.1)$$

где  $D_0$  – срок службы изоляции при температуре, равной нулю, ч;

$\vartheta$  – температура изоляции, °С.

Правило восьми градусов вследствие своей простоты находит широкое применение и позволяет производить ориентировочные расчёты в тех случаях, когда они относятся к сравнительно небольшим диапазонам изменения температуры. Недостатком уравнения (3.1) является его эмпирический и формальный характер, что вносит неопределённость в значения числовых

постоянных и не позволяет рассчитывать на получение этим методом достаточно надёжных результатов [7].

Более строгий подход к исследованию явлений старения изоляции заключается в применении к ним общих законов кинетики химических реакций. Я. Вант Гоффом и А. Аррениусом была найдена следующая зависимость скорости химических реакций от температуры:

$$\ln M = \frac{B}{\Theta} + A, \quad (3.2)$$

где  $M$  – постоянная времени реакции;

$\Theta$  – абсолютная температура, К;

$B$  и  $A$  – постоянные коэффициенты.

Экспериментально доказано, что окислительные процессы, происходящие в изоляции, относятся к классу мономолекулярных реакций, для которых справедливо следующее уравнение:

$$-\frac{dC}{dt} = MC \quad (3.3)$$

где  $C$  – концентрация непрореагировавших молекул в рассматриваемый момент времени,  $t$ .

Из уравнения (3.3) следует:

$$M = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{c}, \quad (3.4)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация непрореагировавших молекул.

Коэффициенты  $A$  и  $B$  имеют определённый физический смысл и связаны с постоянными, характеризующими химический состав и структуру

вещества, участвующего в реакции, соотношениями:

$$A = \ln(Pz), \quad (3.5)$$

$$P = \frac{\Delta S}{lR}, \quad (3.6)$$

$$B = -\frac{Ea}{R}, \quad (3.7)$$

где  $z$  – число столкновений между реагирующими молекулами в единицу времени;

$P$  – фактор вероятности надлежащей ориентации молекул при столкновении;

$\Delta S$  – энтропия активации – величина, характеризующая долю общего числа столкновений, при которых молекулы ориентированы надлежащим образом;

$R=8,317$  – универсальная газовая постоянная, Дж/град моль;

$Ea$  – энергия активации, то есть избыточное (по сравнению со средней величиной) количество энергии, которым должна обладать молекула, чтобы преодолеть энергетический барьер и оказаться способной к данному химическому взаимодействию.

Объединяя приведенные выше уравнения, можно получить уравнение Вант Гоффа – Аррениуса:

$$M = Ae^{-\frac{Ea}{R\Theta}}, \quad (3.8)$$

Решая совместно уравнения (3.4) и (3.8) и обозначая срок службы изоляции через  $D$ , получим:

$$D = e^{-\frac{Ea}{R\Theta} - G}, \quad (3.9)$$

где

$$G = \ln A - \ln \ln \frac{C_0}{c}. \quad (3.10)$$

Зная срок службы изоляции  $D_n$  при температуре  $\Theta_n$ , можно найти срок службы изоляции  $D$  при температуре  $\Theta$ :

$$D = D_n e^{B\left(\frac{1}{\Theta} - \frac{1}{\Theta_n}\right)}. \quad (3.11)$$

Значения  $B$  для различных изоляционных материалов определяются экспериментально [5].

Найдём скорость теплового износа изоляции (в базовых часах за час) при заданной ее температуре  $\Theta$ :

$$\varepsilon = \frac{D_n}{D}, \quad (3.12)$$

где  $D_n$  – базовый ресурс изоляции, бч;

$D$  - срок службы изоляции при температуре  $\Theta$ , ч.

Подставим значение  $D$  по (3.11), получим:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B\left(\frac{1}{\Theta} - \frac{1}{\Theta_n}\right)}. \quad (3.13)$$

### **3.2 Закономерности старения изоляции под воздействием температуры и электродинамических сил**

Изоляция обмоток электрической машины и силового трансформатора в процессе эксплуатации может испытывать сжатие под действием электро-

динамических сил. В большинстве случаев указанные силы имеют циклический, знакопеременный характер, причём наиболее типичной является частота 100 Гц [7]. Периодически при сверхтоках (пуск и реверс электродвигателей, короткие замыкания в питаемых сетях) электродинамические силы увеличиваются в десятки раз вследствие увеличения токов в обмотках и квадратичной зависимости электродинамических сил от сверхтоков.

Если даже принять, что статические нагрузки не приводят к очевидным изменениям структуры изоляции (хотя на самом деле и это имеет место), они все же способствуют ее старению. В соответствии с кинетической теорией прочности твёрдых тел разрушение материала можно рассматривать как постепенный термоактивационный процесс, в котором механическое напряжение представляет собой фактор, облегчающий и ускоряющий термическое разрушение. Кроме того циклические знакопеременные электродинамические силы приводят к вибрации обмоток, что также способствует механическому разрушению изоляции. В свете этих представлений уравнение Вант Гоффа – Аррениуса (3.8) можно записать в следующем виде [244]:

$$M = Ae^{-\frac{Ea-\gamma\sigma}{R\Theta}} \quad (3.14)$$

где  $A$  – параметр, связанный с периодом собственных тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке и выраженный в единицах времени;

$\sigma$  – напряжение механической нагрузки,  $H/m^2$ ;

$\gamma$  – структурный коэффициент, характеризующий степень уменьшения энергетического барьера под действием напряжения.

Решая совместно уравнение (3.4) и (3.14) и обозначая срок службы изоляции через  $D$ , получим:

$$D = e^{\left(\frac{Ea - \gamma\sigma}{R\Theta} - G\right)} \quad (3.15)$$

Так как электродинамические силы имеют квадратичную зависимость от силы тока, то можем записать:

$$\gamma\sigma = \lambda\kappa^2, \quad (3.16)$$

где  $\lambda$  – коэффициент пропорциональности, Дж/моль;

$\kappa$  – кратность сверхтока, потребляемого обмоткой электрической машины.

Тогда (3.15) принимает вид

$$D = e^{\left(\frac{Ea - \gamma\kappa^2}{R\Theta} - G\right)}. \quad (3.17)$$

Зная срок службы изоляции  $D_n$  при температуре  $\Theta_n$  и номинальном токе  $I_n$  ( $\kappa = I$ ) с учётом влияния электродинамических усилий на износ изоляции, можно найти срок службы изоляции при температуре  $\Theta$  и токе  $I = \kappa I_n$ :

$$D = D_n e^{\left(\frac{Ea - \gamma\kappa^2}{R\Theta} - \frac{Ea - \lambda}{R\Theta_n}\right)}. \quad (3.18)$$

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  можем записать следующим образом:

$$\lambda = x \cdot Ea, \quad (3.19)$$

где  $x < I$  – относительный коэффициент.

Тогда можем записать:

$$D = D_n e^{B \left( \frac{1-xk^2}{\Theta} - \frac{1-x}{\Theta_n} \right)}. \quad (3.20)$$

Найдём скорость теплового износа изоляции по (3.12):

$$\varepsilon = \frac{D_n}{D_0}.$$

Подставив (3.20) в (3.12). Получаем:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B \left( \frac{1-x}{\Theta_n} - \frac{1-xk^2}{\Theta} \right)}. \quad (3.21)$$

Из формулы (3.21) видно, что, если не учитывать влияние электродинамических сил на износ изоляции (в этом случае  $x = 0$ ), то формула (3.21) принимает вид (3.13), где учитывается только влияние температуры.

Чтобы найти величину относительного коэффициента  $x$ , необходимо знать скорость износа изоляции  $\varepsilon$  при определённом значении кратности сверхтока  $k$  и номинальной температуре изоляции  $\Theta_n$ . Для этого случая (3.21) запишем следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{\frac{B}{\Theta_n}(k^2-1)}. \quad (3.22)$$

Из (3.22) видно, что при  $k = 1$ ,  $\varepsilon = 1 \frac{\Theta_n}{\Theta}$ , что соответствует скорости теплового износа изоляции при номинальной температуре последней. Определение зависимости  $\varepsilon = f(k)$  при  $\Theta = const$  требует проведения специальных исследований.

В качестве примера определим приближенно величину относительного коэффициента  $x$  для электродвигателя привода дробилок, воспользовав-

шись нагрузочной диаграммой электродвигателя привода дробилки и статистическими данными срока службы электродвигателя привода дробилок, который в среднем составляет около 12000 часов работы электродвигателя 3000 часов приходится на работу с коэффициентом загрузки  $\kappa = 1,4$ . Если принять, что электродвигатель всё время работает при номинальной температуре, тогда скорость износа изоляции в период действия пиков нагрузки составляет 2,66 бч/ч. Подставив в (3.22) значение  $\varepsilon = 428 K$ , находим величину относительного коэффициента в первом приближении:  $x = 0,034$ .

### 3.3 Влияние воздействия химически активных сред и влаги на износ изоляции

Важным фактором старения изоляции является воздействие химически активных сред и влаги. В качестве критерия химической активности среды можно принять концентрацию агрессивного агента в относительных единицах  $c$ . Тогда скорость износа изоляции от совокупного воздействия температуры, электродинамических сил и химически активной среды можно представить, дополнив формулу (3.21) составляющей скорости износа от воздействия агрессивного агента:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B \left( \frac{1-x}{\Theta_n} - \frac{1-x\kappa^2}{\Theta} \right)} m^c, \quad (3.23)$$

где  $m$  – постоянный коэффициент;

$c$  – концентрация агрессивного агента в относительных единицах.

В качестве критерия влажности среды можно принять относительную влажность  $\eta$ . Тогда скорость износа изоляции от совокупного воздействия температуры, электродинамических сил, химически активной среды и влажности можно представить, дополнив формулу (3.23) составляющей скорости износа от воздействия влажности:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B \left( \frac{1-x}{\Theta_n} - \frac{1-xk^2}{\Theta} \right)} m^c n^\eta, \quad (3.24)$$

где  $n$  – постоянный коэффициент;

$\eta$  – относительная влажность.

Значения постоянных коэффициентов  $m$  и  $n$  могут быть определены путём проведения специальных исследований.

### 3.4 Тепловые переходные процессы в асинхронном электродвигателе как системе двух тел

Асинхронный электродвигатель с точки зрения его нагрева представляет собой гетерогенное тело. Описание процесса его нагрева как гомогенного тела приводит к значительным погрешностям. А учитывая экспоненциальную зависимость скорости теплового износа изоляции от ее температуры, в этом случае получаются значительные отклонения от фактических значений скорости расхода ресурса изоляции. Поэтому представляет как научный, так и практический интерес исследование нагрева электродвигателя как гетерогенного тела.

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором с точки зрения его нагрева с достаточной степенью точности может рассматриваться как система двух тел – обмотки и стали (рис. 3.1). Тела 1 и 2 (обмотка и сталь) обладают теплоемкостями  $C_1$  и  $C_2$  и связаны между собой тепловой проводимостью  $J_{12}$ , а с окружающей средой – тепловыми проводимостями  $J_1$  и  $J_2$ . В теле 1 выделяются потери  $P_1$ , в теле 2 – потери  $P_2$ . Предполагается, что теплоемкости и тепловые проводимости не зависят от температуры, теплоемкость окружающей среды  $C_{cp}$  равна бесконечности, температура окружающей среды  $\vartheta_{cp}$  постоянна.

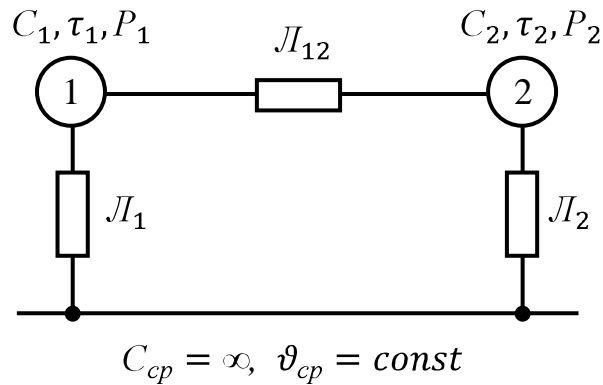


Рисунок 3.1 Тепловая схема замещения асинхронного электродвигателя

Составим уравнение теплового баланса для каждого тела – обмотки (тело 1) и стали (тело 2):

$$P_{10}(1 + \alpha\tau_1)dt = C_1d\tau_1 + L_1\tau_1dt + L_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt, \quad (3.25)$$

$$P_2dt + L_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt = C_2d\tau_2 + L_2\tau_2dt, \quad (3.26)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – превышения температуры соответственно обмотки и стали над температурой окружающей среды, °С;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала проводника обмотки, 1/°С.

Перепишем уравнения (3.25) и (3.26) в операторной форме

$$(pC_1 + L_1 + L_{12} - \alpha P_{10})\tau_1 - L_{12}\tau_2 = \frac{P_{10}}{p}, \quad (3.27)$$

$$-L_{12}\tau_1 + (pC_2 + L_2 + L_{12})\tau_2 = \frac{P_2}{p}, \quad (3.28)$$

Решив систему уравнений, найдем превышение температуры об-

мотки в операторной форме:

$$\tau_1(p) = \frac{l_1 p + t_1}{p(\kappa p^2 + l_1 p + t_1)}, \quad (3.29)$$

где

$$l_1 = C_2 P_{10}, \quad (3.30)$$

$$t_1 = P_{10}(L_2 + L_{12}) - L_{12}P_2, \quad (3.31)$$

$$\kappa = C_1 \cdot C_2, \quad (3.32)$$

$$l = C_1(L_2 + L_{12}) + C_2(L_1 + L_{12} - \alpha P_{10}), \quad (3.33)$$

$$t = (L_1 + L_{12} - \alpha P_{10})(L_2 + L_{12}) - L_{12}^2. \quad (3.34)$$

Обозначим

$$F_1(p) = l_1 p + t_1, \quad (3.35)$$

$$F_2(p) = \kappa p^2 + l_1 p + t_1. \quad (3.36)$$

Перепишем (3.29) с учетом введенных обозначений:

$$\tau_1(p) = \frac{F_1(p)}{pF_2(p)}. \quad (3.37)$$

Уравнение  $F_2(p) = 0$  имеет два различных и не равных нулю корня –  $p_1$  и  $p_2$ , поэтому

$$\tau_1 = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \frac{F_1(p_1)}{p_1 F_2(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_2'(p_2)} e^{p_2 t}. \quad (3.38)$$

где  $F_2'(p) = 2kp + l$ .

Выведем формулу установившегося превышения температуры обмотки асинхронного электродвигателя. Из (3.38) при  $t = \infty$  получаем:

$$\tau_{1y} = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} = \frac{t_1}{t}. \quad (3.39)$$

Подставив значения  $t_1$  и  $t$  по (3.30) и (3.34), получим

$$\tau_{1y} = \frac{P_{10} + \frac{L_{12}}{L_2 + L_{12}} P_2}{L_1 - \frac{L_2 \cdot L_{12}}{L_2 + L_{12}} - \alpha P_{10}}, \quad (3.40)$$

$$P_{10} = 3r_0 I^2, \quad (3.41)$$

где  $r_0$  – сопротивление обмотки при температуре окружающей среды,

*Ом*;

$I$  – сила электрического тока, потребляемого электродвигателем,

*А*.

Введем обозначения:

$$L_1' = L_1 - \frac{L_1 \cdot L_{12}}{L_2 + L_{12}}, \quad \frac{L_{12}}{L_2 + L_{12}} = \kappa_{12}. \quad (3.42)$$

Перепишем уравнение (3.40):

$$\tau_{1y} = \frac{3r_0 I^2 + \kappa_{12} P_2}{L'_1 - 3\alpha r_0 I^2}. \quad (3.43)$$

В формуле (3.43) неизвестными величинами являются  $\kappa_{12}$  и  $L'_1$ . Введем новую величину – превышение температуры обмотки в опыте короткого замыкания  $\tau_{1к}$ , которая может быть определена экспериментальным путем из опыта короткого замыкания, условиями проведения которого являются равенство нулю потерь в стали ( $P_2 = 0$ ) и равенство тока двигателя номинальному ( $I = I_n$ ) при номинальной частоте вращения электродвигателя ( $\omega = \omega_n$ ).

При опыте короткого замыкания формула (3.43) принимает вид:

$$\tau_{1к} = \frac{3r_0 I_n^2}{L'_1 - 3r_0 \alpha I_n^2}. \quad (3.44)$$

где  $\tau_{1к}$  – установившееся превышение температуры обмотки в опыте короткого замыкания.

Из (3.44) находим

$$L'_1 = 3r_0 I_n^2 \left( \frac{1}{\tau_{1к}} + \alpha \right). \quad (3.45)$$

Подставляем (3.45) в (3.43) и получаем:

$$\tau_{1y} = \frac{3r_0 I^2 + \kappa_{12} P_2}{3r_0 I_n^2 \left( \frac{1}{\tau_{1к}} + \alpha \right) - 3r_0 \alpha I^2}. \quad (3.46)$$

В номинальном режиме работы  $I = I_n$ ,  $\tau_{1y} = \tau_{1н}$  и формула (3.46) после подстановки указанных значений принимает вид:

$$\tau_{1н} = \frac{3r_0 I_n^2 + \kappa_{12} P_2}{3r_0 I_n^2 \frac{1}{\tau_{1к}}}, \quad (3.47)$$

откуда получаем:

$$\kappa_{12} = \frac{\frac{\tau_{1н}}{\tau_{1к}} \cdot 3r_0 I_n^2 + 3r_0 I_n^2}{P_2}. \quad (3.48)$$

Подставив (3.48) в (3.46), получим:

$$\tau_{1у} = \frac{3r_0 I^2 + \frac{\tau_{1н}}{\tau_{1к}} \cdot 3r_0 I_n^2 - 3r_0 I_n^2}{3r_0 I_n^2 \left( \frac{1}{\tau_{1к}} + \alpha \right) - 3r_0 \alpha I^2}. \quad (3.49)$$

При нагрузке, отличной от номинальной,  $I = \kappa I_n$  и выражение (3.49) принимает вид:

$$\tau_{1у} = \frac{\tau_{1н} + \tau_{1к}(\kappa^2 - 1)}{1 - \alpha \tau_{1к}(\kappa^2 - 1)}. \quad (3.50)$$

Полученная формула позволяет вычислить значение установившегося превышения температуры обмотки в функции кратности тока нагрузки электродвигателя по отношению к номинальному с учетом влияния роста сопротивления обмотки при нагревании.

Единственной величиной, требующей экспериментального определения, является превышение температуры в опыте короткого замыкания  $\tau_{1к}$  (в дальнейшем будем называть превышением температуры короткого замыкания).

Найдем способ определения значения  $\tau_{1к}$  по паспортным данным электродвигателя, рассуждая следующим образом: в номинальном режиме

работы превышение температуры обмотки также будет номинальным и может быть найдено по выражению:

$$\tau_{1н} = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н}}{A}, \quad (3.51)$$

где  $\Delta P_{с.н}$  и  $\Delta P_{м.н}$  – номинальные потери соответственно в стали и в меди электродвигателя, *Вт*;

$A$  – эквивалентная теплоотдача обмотки, *Дж/с°С*.

В опыте короткого замыкания это уравнение приобретает вид:

$$\tau_{1к} = \frac{\Delta P_{м.н}}{A}. \quad (3.52)$$

Решая совместно уравнения (3.51) и (3.52), находим

$$\tau_{1к} = \frac{\tau_{1н}}{1 + \alpha}, \quad (3.53)$$

где

$$\alpha = \frac{\Delta P_{с.н}}{\Delta P_{м.н}}. \quad (3.54)$$

Подставив теперь (3.54) в (3.51), получаем:

$$\tau_{1к} = \tau_{1н} \frac{a + \kappa^2}{1 + a - \alpha \tau_{1н} (\kappa^2 - 1)}, \quad (3.55)$$

Таким образом, установившееся превышение температуры обмотки зависит от кратности тока электродвигателя, коэффициента потерь и материала проводника, которому соответствует температурный коэффициент сопротивления  $a$ .

Уравнение нагрева обмотки электродвигателя:

$$\tau_1 = \tau_{1y} + \tau'_{1y} e^{-\frac{t}{T'}} + \tau''_{1y} e^{-\frac{t}{T''}}, \quad (3.56)$$

$$\kappa = \frac{I}{I_H}. \quad (3.57)$$

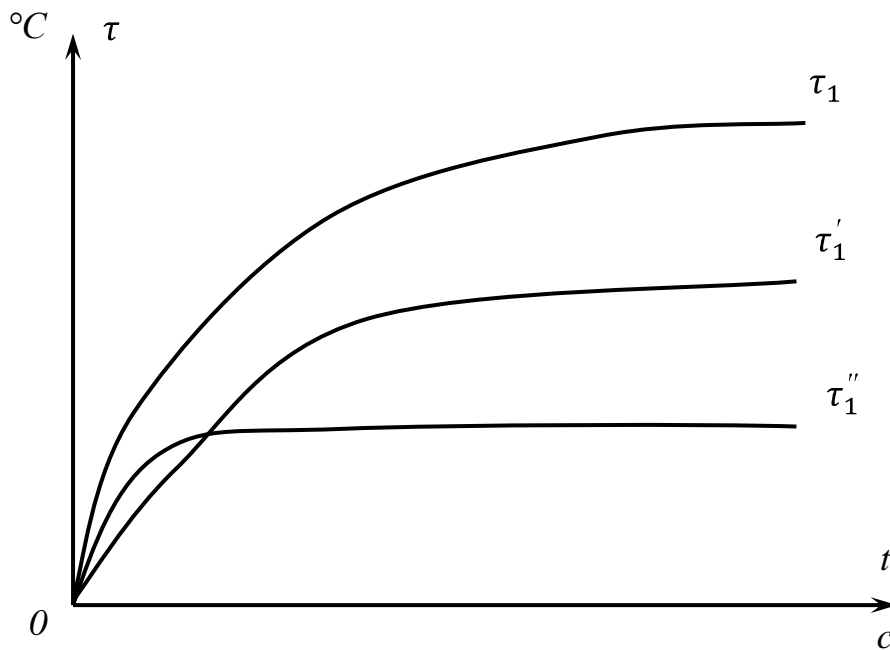


Рис. 3.2 Зависимости  $\tau_1 = f(t)$ ,  $\tau'_1 = f'(t)$ ,  $\tau''_1 = f''(t)$  для электродвигателя

Перепишем уравнения (3.25) и (3.26) для установившегося режима в опытах холостого хода и короткого замыкания:

$$L_1 \tau_{1к} + L_{12} \tau_{12к} = P_{10} (1 + \alpha \tau_{1к}), \quad (3.58)$$

$$L_2 \tau_{2к} - L_{12} \tau_{12к} = 0, \quad (3.59)$$

$$L_2 \tau_{2х} - L_{12} \tau_{12х} = P_2, \quad (3.60)$$

где  $\tau_{1к}$  и  $\tau_{1х}$  – установившееся превышение температуры тела 1 в опытах короткого замыкания и холостого хода, °С;

$\tau_{2к}$  и  $\tau_{2х}$  – установившееся превышение температуры тела 2 в опытах короткого замыкания и холостого хода, °С.

Решив систему уравнений (3.57), (3.58), (3.59), находим выражения проводимостей:

$$L_1 = \frac{P_{10}(1 + \alpha\tau_{1k})\tau_{2k}\tau_{12x} + P_2\tau_{12k}\tau_{2k} - P_{10}(1 + \alpha\tau_{1k})\tau_{12k}\tau_{2x}}{\tau_{1k}\tau_{2k}\tau_{12x} - \tau_{1k}\tau_{12k}\tau_{2x}}, \quad (3.61)$$

$$L_{12} = \frac{P_2\tau_{2k}}{\tau_{12k}\tau_{2x} - \tau_{2k}\tau_{12x}}, \quad (3.62)$$

$$L_2 = \frac{P_2\tau_{12k}}{\tau_{12k}\tau_{2x} - \tau_{2k}\tau_{12x}}. \quad (3.63)$$

Таким образом, проведя опыты короткого замыкания и холостого хода можно определить по их результатам тепловые проводимости  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_{12}$ .

Это позволяет при необходимости точно описывать тепловые переходные процессы при перегрузке электродвигателей.

Для примера приводим кривые нагрева электродвигателя типоразмера 4A100S2У3 (рисунок 3.3): кривая 1 – экспериментальная кривая нагрева электродвигателя при номинальной нагрузке, кривая 2 – расчетная кривая нагрева электродвигателя при номинальной нагрузке, рассматривая электродвигатель как гомогенное тело, для которого постоянная времени нагрева равна 1840 секунд. Анализ кривых показывает, что между экспериментальной кривой и расчетной наблюдается значительное расхождение. Учитывая экспоненциальную зависимость скорости теплового износа изоляции от ее температуры, скорость расхода ресурса изоляции, если тепловой процесс электродвигателя описывать как гомогенное тело, будет иметь большие погрешности. Поэтому, рассматривая электродвигатель с точки зрения нагрева как гетерогенное тело, будут значительно уменьшены погрешности определения расхода ресурса изоляции.

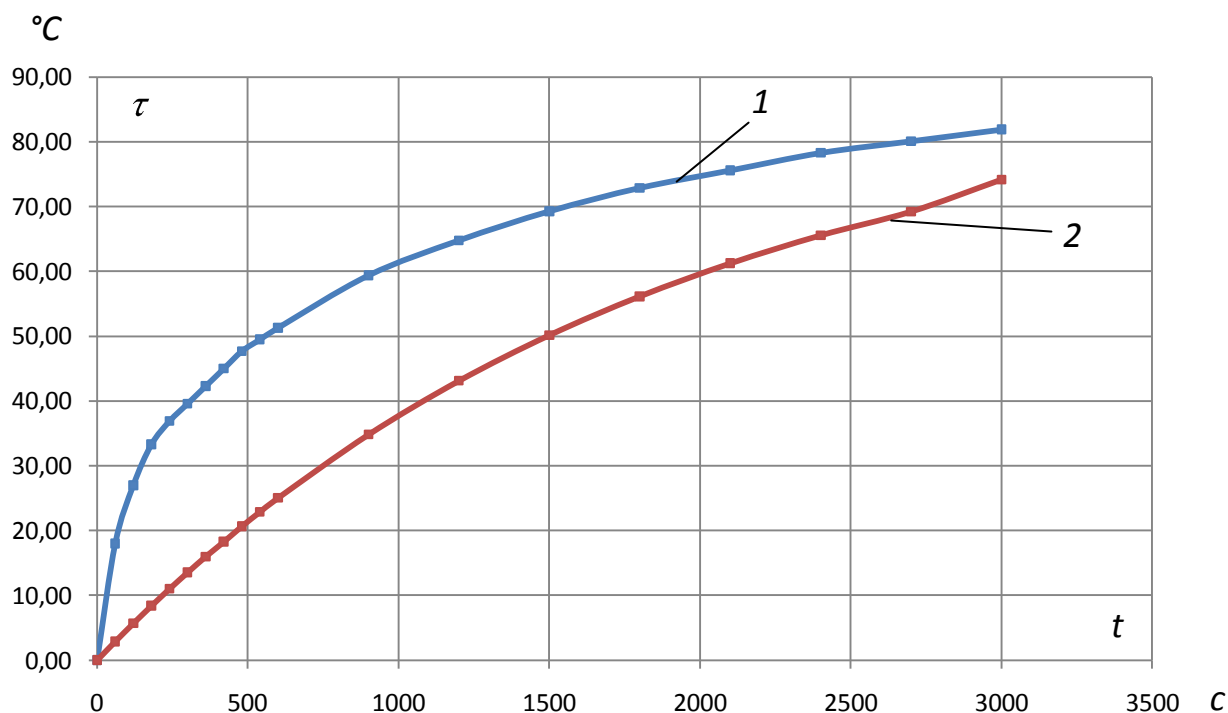


Рисунок 3.3 Кривые нагрева электродвигателя типоразмера 4A100S2Y3: кривая 1 – экспериментальная кривая нагрева электродвигателя при номинальной нагрузке, кривая 2 – расчетная кривая нагрева электродвигателя при номинальной нагрузке

### 3.5 Способ диагностирования расхода ресурса изоляции асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в эксплуатационных условиях

В результате проведенных исследований предложена математическая модель диагностирования расхода ресурса изоляции асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, например, привода насосных агрегатов подкачивающих и перекачивающих насосных станций орошения.

Алгоритм использования модели следующий:

- 1) Измеряется сила электрических токов, которые потребляет электродвигатель и сигнал подается на вход микропроцессора через каждый интервал времени  $t_i$ .
- 2) Находится среднеквадратичное значение силы электрического тока и его

кратность  $\kappa_i$ .

3) Рассчитывается превышение температуры обмоток электродвигателя:

$$\tau_i = \tau_{iy} + \tau'_{iy} e^{-\frac{t_i}{T'_i}} + \tau'_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T'_i}} + \tau''_{iy} e^{-\frac{t_i}{T''_i}} + \tau''_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T''_i}}, \quad (3.53)$$

$$\tau_{iy} = \tau_{1n} \frac{a + \kappa_i^2}{a + 1 - a\tau_n(\kappa_i^2 - 1)}, \quad (3.54)$$

$$\tau'_{iy} = \frac{l_{i1}p_{i1} + t_{i1}}{p_{i1}(2\kappa p_{i1} + l_i)}, \quad (3.55)$$

$$\tau''_{iy} = \frac{l_{i1}p_{i2} + t_{i1}}{p_{i2}(2\kappa p_{i2} + l_i)}, \quad (3.56)$$

$$l_{i1} = C_2 3r_0 \kappa_i^2 I_n, \quad (3.57)$$

$$t_{i1} = 3r_0 \kappa_i^2 I_n^2 (J_{i1} + J_{i2}) - J_{i2} P_2, \quad (3.58)$$

$$\kappa = C_1 C_2, \quad (3.59)$$

$$l_i = C_1 (J_{i1} + J_{i2}) + C_2 (J_{i1} + J_{i2} - 3\alpha r_0 \kappa_i^2 I_n^2), \quad (3.60)$$

$$p_{i1,2} = \frac{-l_{i1} \pm \sqrt{l_{i1}^2 - 4\kappa t_{i1}}}{2\kappa}, \quad (3.61)$$

$$T'_i = \frac{1}{p_{i1}}, \quad (3.62)$$

$$T''_i = \frac{1}{p_{i2}}. \quad (3.63)$$

4) Определяется скорость износа изоляции:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n e^{B \left( \frac{1-x}{\Theta_n} - \frac{1-xk_i^2}{\Theta_i} \right)}, \quad (3.63)$$

$$\Theta_i = \tau_i + \vartheta_{cp_i}. \quad (3.63)$$

Сравнивается значение скорости износа изоляции на  $i$ -том участке с номинальным значением скорости износа изоляции  $\varepsilon_n = 1 \text{ бч/ч}$  и в случае когда  $\varepsilon_i > \varepsilon_n$  подается сигнал, если  $\varepsilon_i$  находится в пределе от 1 до 2. Если же  $\varepsilon_i$  больше двух, то электродвигатель отключается от сети.

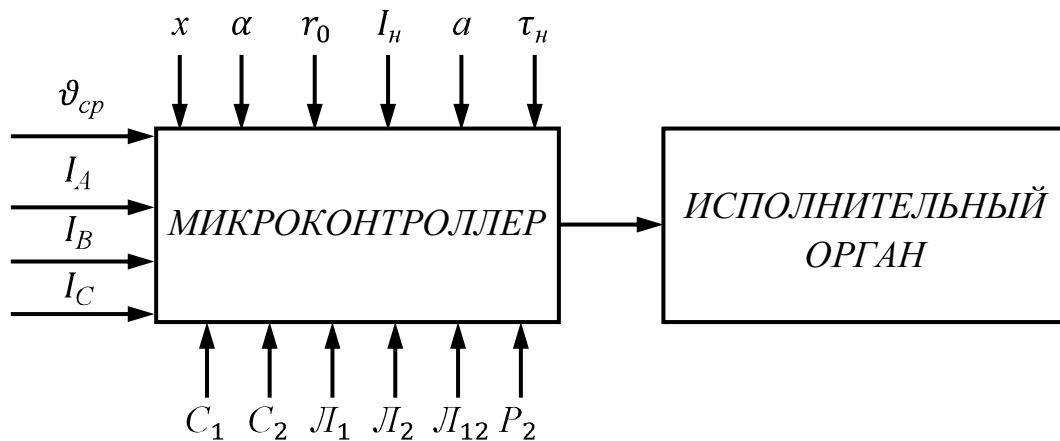


Рис. 3.4 Структурная схема диагностирования расхода ресурса изоляции асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором привода насосных агрегатов подкачивающих и перекачивающих насосных станций

## РАЗДЕЛ 4. РАСХОД РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

### 4.1 Тепловые переходные процессы в силовом трансформаторе как системе трех тел

Анализ конструкции и режимов работы силовых трансформаторов показывает, что в эксплуатационных условиях основным износом изоляции его обмоток является тепловой износ. Поэтому исследование тепловых переходных процессов в силовом трансформаторе с целью более точного их описания представляет собой важную научную задачу.

Силовой трансформатор с точки зрения его нагрева с достаточной степенью точности может рассматриваться как система трёх тел - обмотки, магнитопровода и масла. На рисунке 4.1 представлена тепловая схема замещения силового трансформатора как системы трёх тел.

Тела  $1, 2$  и  $3$  (обмотка, магнитопровод и масло) обладают теплоёмкостями соответственно  $C_1, C_2$  и  $C_3$ ; связаны между собой тепловыми проводимостями  $L_{12}, L_{13}$  и  $L_{23}$ ; с окружающей средой тело  $3$  связано тепловой проводимостью  $L_3$ ; теплоёмкость окружающей среды принята равной бесконечности; в теле  $1$  выделяются потери активной мощности  $P_1$ , в теле  $2$  – потери  $P_2$ , в теле  $3$  – потери равны нулю. Предполагается, что теплоёмкости и тепловые проводимости практически не зависят от температуры; температура окружающей среды  $\vartheta_{cp}$  принята постоянной.

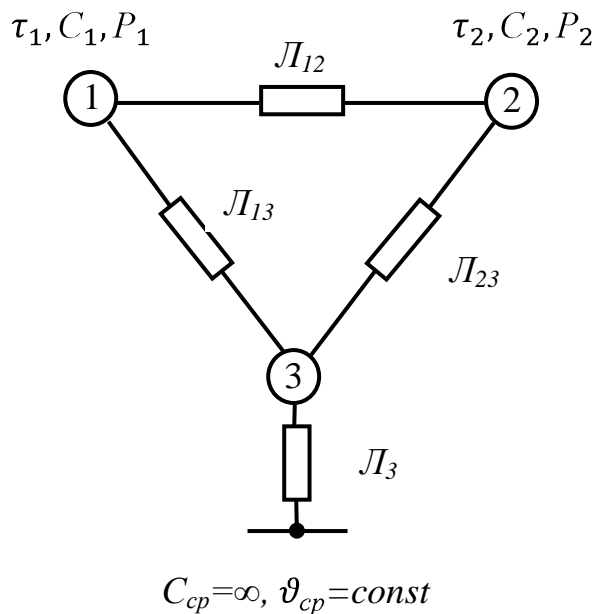


Рисунок 4.1 Тепловая схема замещения силового трансформатора как системы трёх тел

Составим дифференциальное уравнение теплового баланса для каждого тела - обмотки, магнитопровода и масла:

$$P_{10}(1 + \alpha\tau)dt = C_1 d\tau_1 + L_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt + L_{13}(\tau_1 - \tau_3)dt; \quad (4.1)$$

$$P_2 dt + L_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt = C_2 d\tau_2 + L_{23}(\tau_2 - \tau_3)dt; \quad (4.2)$$

$$L_{13}(\tau_1 - \tau_3)dt + L_{23}(\tau_2 - \tau_3)dt = C_3 d\tau_3 + L_3 \tau_3 dt, \quad (4.3)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  и  $\tau_3$  – превышения температуры тел 1, 2 и 3 над температурой окружающей среды, °C;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала проводников обмотки, 1/°C;

$P_{10}$  – потери активной мощности в обмотке при температуре, равной температуре окружающей среды, определяемые по формуле:

$$P_{10} = 3r_0 I^2, \quad (4.4)$$

где  $I$  – сила электрического тока, потребляемого трансформатором,  $A$ ;  
 $r_0$  – эквивалентное активное сопротивление обмоток трансформатора,  $Ом$ .

Перепишем дифференциальные уравнения в операторной форме:

$$(pC_1 + L_{12} + L_{13} - \alpha P_{10})\tau_1 - L_{12}\tau_2 - L_{13}\tau_3 = \frac{P_{10}}{p}; \quad (4.5)$$

$$-L_{12}\tau_1 + (pC_2 + L_{12} + L_{23})\tau_2 - L_{23}\tau_3 = \frac{P_2}{p}; \quad (4.6)$$

$$-L_{13}\tau_1 - L_{23}\tau_2 + (pC_3 + L_{13} + L_{23} + L_3) = 0. \quad (4.7)$$

Решив систему уравнений, найдём превышение температуры обмотки в операторной форме:

$$\tau_1(p) = \frac{l_1 p^2 + t_1 p + r_1}{p(\kappa p^3 + l p^2 + t p + r)}, \quad (4.8)$$

где

$$l_1 = C_2 \cdot C_3 \cdot P_{10}, \quad (4.9)$$

$$l = (L_{12} + L_{13} - \alpha P_{10})C_2 C_3 + (L_{12} + L_{23})C_1 C_3 + (L_{13} + L_{23} + L_3)C_1 C_2, \quad (4.10)$$

$$t_1 = (L_{12} + L_{23})C_3 P_{10} + (L_{13} + L_{23} + L_3)C_2 P_{10} + L_{12} P_2 C_3, \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} t = & (L_{12} + L_{23})(L_{12} + L_{13} - \alpha P_{10})C_3 + \\ & + (L_{13} + L_{23} + L_3)(L_{12} + L_{13} - \alpha P_{10})C_2 + \\ & + (L_{12} + L_{23})(L_{13} + L_{23} + L_3)C_1 - L_{13}^2 C_2 - L_{12}^2 C_2 - L_{23}^2 C_1, \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$r_1 = (L_{12} + L_{23})(L_{13} + L_{23} + L_3)P_{10} + L_{12}L_{23}P_2 + \\ + L_{12}P_2(L_{13} + L_{23} + L_3) - L_{23}^2P_{10}, \quad (4.13)$$

$$r = (L_{12} + L_{23})(L_{13} + L_{23} + L_3)(L_{12} + L_{13} - \alpha P_{10}) - 2L_{12}L_{13}L_{23} - \\ - (L_{12} + L_{23})L_{13}^2 - (L_{13} + L_{23} + L_3)L_{12}^2 - (L_{12} + L_{13} - \alpha P_{10})L_{23}^2, \quad (4.14)$$

$$\kappa = C_1C_2C_3 \quad (4.15)$$

Обозначим:

$$F_1(p) = l_1p^2 + t_1p + r_1, \quad (4.16)$$

$$F_2(p) = \kappa p^3 + lp^2 + tp + r, \quad (4.17)$$

$$\tau_1(p) = \frac{F_1(p)}{pF_2(p)}. \quad (4.18)$$

Уравнение  $F_2(p)=0$  имеет три различных и не равных нулю корня –  $p_1, p_2, p_3$ , ПОЭТОМУ:

$$\tau_1 = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \frac{F_1(p_1)}{p_1F_2'(p_1)}e^{p_1t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2F_2'(p_2)}e^{p_2t} + \frac{F_1(p_3)}{p_3F_2'(p_3)}e^{p_3t}, \quad (4.19)$$

где

$$F_2'(p) = 3\kappa p^2 + 2lp + t. \quad (4.20)$$

Выведем теперь формулу установившегося превышения температуры обмотки трансформатора. Из уравнения (4.19) при  $t = \infty$  получаем:

$$\tau_{1y} = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} = \frac{r_1}{r}. \quad (4.21)$$

Подставив значения  $r_l$  и  $r$  по формулам (4.13) и (4.14) и, преобразовав, получим:

$$\tau_{1y} = \frac{P_{10} + nP_2}{L_9 - \alpha P_{10}}, \quad (4.22)$$

где

$$n = \frac{L_{13}L_{23} + L_{12}(L_3 + L_{13} + L_{23})}{(L_{12} + L_{23})(L_3 + L_{13} + L_{23}) - L_{23}^2}; \quad (4.23)$$

$$L_9 = \frac{(L_{12} + L_{13})(L_{12} + L_{23})(L_3 + L_{13} + L_{23}) - 2L_{12}L_{13}L_{23} -}{(L_{12} + L_{23})(L_3 + L_{13} + L_{23}) - L_{23}^2} - \quad (4.24)$$

$$- \frac{L_{23}^2(L_{12} + L_{13}) - L_{12}^2(L_3 + L_{13} + L_{23}) - L_{13}^2(L_{12} + L_{23})}{(L_{12} + L_{23})(L_3 + L_{13} + L_{23}) - L_{23}^2}.$$

Перепишем уравнение (4.22) с учётом (4.4):

$$\tau_{1y} = \frac{3r_0I^2 + nP_2}{L_9 - 3r_0\alpha I^2}, \quad (4.25)$$

Так же, как и при исследовании нагревания обмоток электродвигателя, введём новую величину – превышение температуры обмотки в опыте короткого замыкания, обозначив её  $\tau_{1к}$ . Под превышением температуры обмотки  $\tau_{1к}$  будем понимать установившееся превышение температуры обмотки в опыте короткого замыкания трансформатора, условиями проведения которого является равенство нулю потерь в стали ( $P_2=0$ ) и равенство номинально-

му значению тока в обмотке ( $I = I_n$ ).

При опыте короткого замыкания формула (4.25) принимает вид:

$$\tau_{1к} = \frac{3r_0 I_n^2}{J_{\vartheta} - r_0 \alpha I_n^2}, \quad (4.26)$$

откуда

$$J_{\vartheta} = 3r_0 I_n^2 \left( \frac{1}{\tau_{1к}} + \alpha \right), \quad (4.27)$$

Подставляем (4.27) в (4.25) и получаем:

$$\tau_{1у} = \frac{3r_0 I^2 + nP_2}{3r_0 \alpha I_n^2 \left( \frac{1}{\tau_{1к}} + \alpha \right) - 3r_0 \alpha I^2}. \quad (4.28)$$

В номинальном режиме работы трансформатора ток  $I = I_n$ , установившееся превышение температуры обмотки  $\tau_{1у} = \tau_{1н}$  и формула (4.28) принимает вид:

$$\tau_{1н} = \frac{3r_0 I_n^2 + nP_2}{3r_0 \alpha I_n^2 \frac{1}{\tau_{1к}}}, \quad (4.29)$$

откуда находим:

$$n = \frac{\left( \frac{\tau_{1н}}{\tau_{1к}} - 1 \right) 3r_0 I_n^2}{P_2}. \quad (4.30)$$

Подставив (4.30) в (4.28), получим:

$$\tau_{1y} = \frac{3r_0 I^2 + \left(\frac{\tau_{1H}}{\tau_{1K}} - 1\right) 3r_0 I_H^2}{3r_0 \alpha I_H^2 \left(\frac{1}{\tau_{1K}} + \alpha\right) - 3r_0 \alpha I^2}. \quad (4.31)$$

При нагрузке, отличной от номинальной,  $I = \kappa I_H$ . Подставив это значение в (4.31) и преобразовав, получим следующее выражение для определения установившегося превышения температуры обмотки трансформатора в функции кратности тока нагрузки по отношению к его номинальному значению:

$$\tau_{1y} = \frac{\tau_{1H} + \tau_{1K}(\kappa^2 - 1)}{1 - \alpha \tau_{1K}(\kappa^2 - 1)}. \quad (4.32)$$

Рассуждая аналогично, как и для электродвигателя, можем записать:

$$\tau_H = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{м.н}}{A}, \quad (4.33)$$

где  $\Delta P_{с.н}$  и  $\Delta P_{м.н}$  – номинальные потери активной мощности в стали и меди трансформатора, Вт;

$A$  – эквивалентная теплоотдача обмотки, Дж/с °С.

В опыте короткого замыкания это выражение принимает вид:

$$\tau_{1K} = \frac{\Delta P_{м.н}}{A}. \quad (4.34)$$

Решая совместно уравнения (4.33) и (4.34), находим:

$$\tau_{1K} = \frac{\tau_{1H}}{1 + a'}, \quad (4.35)$$

где  $a$  – отношение номинальных потерь в стали к номинальным потерям в меди трансформатора.

Подставив (4.35) в (4.32), получаем:

$$\tau_{1y} = \tau_{1н} = \frac{a + \kappa^2}{a + 1 - \alpha\tau(\kappa^2 - 1)}. \quad (4.36)$$

Таким образом, установившееся превышение температуры обмотки силового трансформатора, как и асинхронного электродвигателя, зависит от кратности тока трансформатора, коэффициента потерь и температурного коэффициента сопротивления материала проводников обмотки  $a$ .

Уравнение нагрева обмотки силового трансформатора:

$$\tau_1 = \tau_{1y} + \tau'_{1y} e^{-\frac{t}{T'}} + \tau''_{1y} e^{-\frac{t}{T''}} + \tau'''_{1y} e^{-\frac{t}{T'''}} \quad (4.37)$$

$$\kappa = \frac{I}{I_n} \quad (4.38)$$

Запишем уравнения (4.1), (4.2) для установившегося режима в опытах холостого хода и короткого замыкания:

$$L_{12}(\tau_{1к} - \tau_{2к}) + L_{13}(\tau_{1к} - \tau_{3к}) = P_{10}(1 + \alpha\tau_{1к}); \quad (4.39)$$

$$L_{12}(\tau_{1к} - \tau_{2к}) + L_{23}(\tau_{2к} - \tau_{3к}) = 0; \quad (4.40)$$

$$L_{12}(\tau_{1х} - \tau_{2х}) + L_{23}(\tau_{1к} - \tau_{3к}) = P_2. \quad (4.41)$$

где  $\tau_{1к}, \tau_{2к}, \tau_{3к}$  – превышения температуры тел 1,2,3 в опыте короткого замыкания, °C;

$\tau_{1х}, \tau_{2х}, \tau_{3х}$  – превышения температуры тел 1,2,3 в опыте холостого хода, °C.

Решив систему уравнений (4.30), (4.40), (4.41), находим выражения

проводимостей:

$$L_{12} = \frac{P_2 \tau_{23к}}{\tau_{12х} \cdot \tau_{23к} - \tau_{12к} \cdot \tau_{23х}}; \quad (4.42)$$

$$L_{13} = \frac{P_{10}(1 + \alpha\tau_{1к}) \cdot \tau_{23к} \cdot \tau_{12х} - P_{10}(1 + \alpha\tau_{1к}) \cdot \tau_{12к} \cdot \tau_{23х} - P_2 \cdot \tau_{23к} \cdot \tau_{12к}}{\tau_{12х} \cdot \tau_{13к} \cdot \tau_{23к} - \tau_{12к} \cdot \tau_{13к} \cdot \tau_{23х}}; \quad (4.43)$$

$$L_{23} = \frac{P_2 \tau_{12к}}{\tau_{12х} \cdot \tau_{23к} - \tau_{12к} \cdot \tau_{23х}}; \quad (4.44)$$

где  $\tau_{12к}, \tau_{12х}$  – превышения температуры между телами 1 и 2 в опытах короткого замыкания, холостого хода, °С;

$\tau_{13к}$  – превышение температуры между телами 1 и 3 в опыте короткого замыкания, °С;

$\tau_{23к}, \tau_{23х}$  – превышения температуры между телами 2 и 3 в опытах короткого замыкания, холостого хода, °С.

В номинальном режиме работы можем записать:

$$L_3 \cdot \tau_{3н} = P_{10}(1 + \alpha\tau_{1н}) + P_2, \quad (4.45)$$

откуда находим:

$$L_3 = \frac{P_{10}(1 + \alpha\tau_{1н}) + P_2}{\tau_{3н}}, \quad (4.46)$$

где  $\tau_{1н}, \tau_{3н}$  – превышения температуры тел 1, 3 в номинальном режиме, °С.

Для примера приводим данные нагрева силового трансформатора типа ТМ-160/10 при номинальной нагрузке, начиная от холодного состояния []:

$$\tau_{1х} = 7,26 \text{ °С},$$

$$\tau_{2х} = 12,49 \text{ °С},$$

$$\tau_{3х} = 5,64 \text{ °С},$$

$$\tau_{1к} = 43,86 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\tau_{2к} = 34,06 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\tau_{3к} = 26,5 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$L_{12} = 40,1 \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{ }^\circ\text{C}},$$

$$L_{13} = 130 \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{ }^\circ\text{C}},$$

$$L_{23} = 51,99 \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{ }^\circ\text{C}},$$

$$L_3 = 100 \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{ }^\circ\text{C}},$$

$$\tau_{1у} = 61,933 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\tau'_{1у} = 47,577 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\tau''_{1у} = 0,138 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\tau'''_{1у} = 14,555 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$T' = 10525 \text{ с},$$

$$T'' = 1666 \text{ с},$$

$$T''' = 146 \text{ с}.$$

Запишем уравнение нагрева обмотки силового трансформатора типа ТМ-160/10, начиная с холодного состояния:

$$\tau_1 = 61,993 - 47,577e^{-\frac{t}{10525}} + 0,138e^{-\frac{t}{1666}} - 14,555e^{-\frac{t}{246}} \quad (4.47)$$

и представим графически на рисунке 4.2:

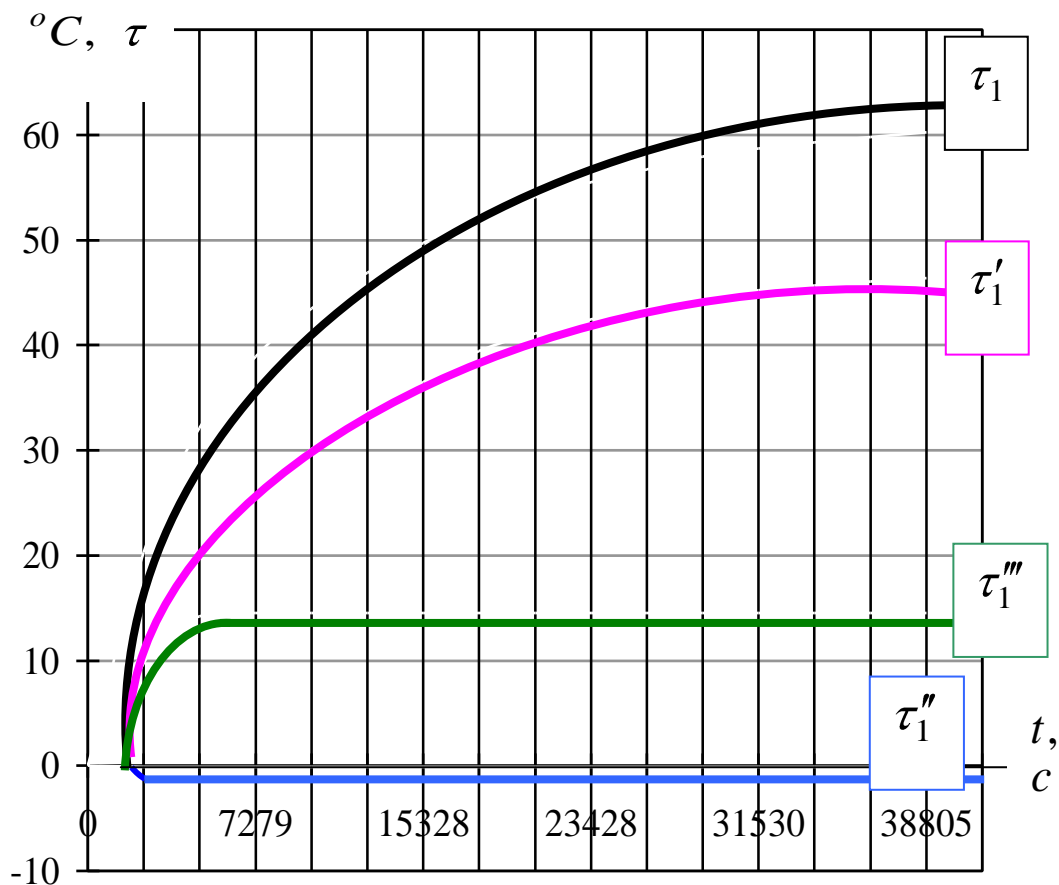


Рис. 4.2 Зависимости  $\tau_1 = f(t)$ ,  $\tau_1' = f(t)$ ,  $\tau_1'' = f(t)$ ,  $\tau_1''' = f(t)$  для силового трансформатора ТМ 160/10.

Таким образом, при проведении опытов холостого хода, короткого замыкания и номинального режима работы необходимо измерять превышения температуры каждого из трёх тел.

На основании опытов холостого хода, короткого замыкания и номинального режима возможно определение проводимостей тепловой схемы замещения силового трансформатора как гетерогенного тела.

## 4.2 Тепловые переходные процессы в силовом трансформаторе при циклической нагрузке

Как правило, нагрузка силовых трансформаторов не является постоянной. Чаще всего она носит циклический характер. Поэтому представляет интерес исследование теплового переходного процесса силового трансформатора при циклической нагрузке в квазиустановившемся состоянии.

Нагрузку силового трансформатора будем задавать в виде графика, которому будет соответствовать график тепловой нагрузки, например, приведенный на рис. 4.3. При работе силового трансформатора с циклической нагрузкой через определенное количество циклов практически наступит квазиустановившийся режим, при котором

$$\tau_0 = \tau_n \quad (4.48)$$

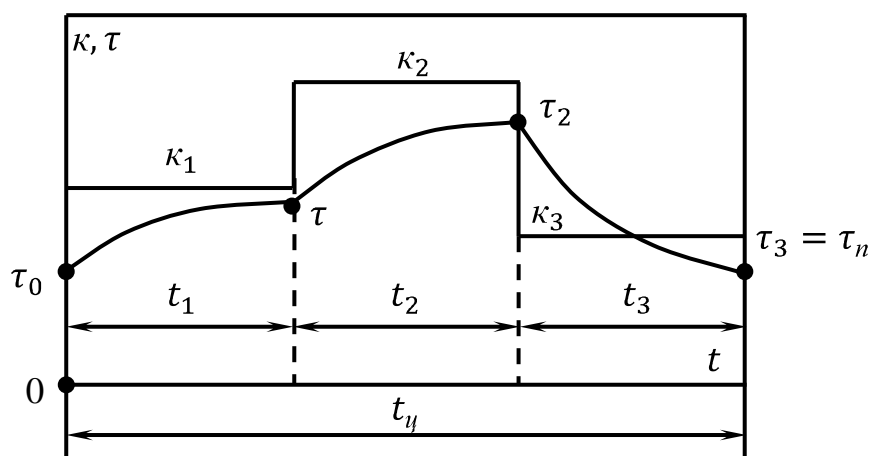


Рисунок 4.3 Графики токовой и тепловой нагрузок обмотки силового трансформатора при циклическом режиме работы в квазиустановившемся состоянии

Для расчета теплового переходного процесса необходимо определить превышение температуры в начале цикла  $\tau_0$ , равное превышению температуры в конце цикла  $\tau_n$ . Принимаем  $t_1 = t_2 = t_3 = t_i$ . Тогда можем записать систему уравнений:

$$\tau_1 = \tau_{1y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}}\right) + \tau_3 e^{-\frac{t_i}{T}}, \quad (4.49)$$

$$\tau_2 = \tau_{2y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}}\right) + \tau_1 e^{-\frac{t_i}{T}}, \quad (4.50)$$

$$\tau_3 = \tau_{3y} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}}\right) + \tau_2 e^{-\frac{t_i}{T}}, \quad (4.51)$$

где  $T$  – эквивалентная постоянная времени нагрева силового трансформатора, °C;

$\tau_{1y}, \tau_{2y}, \tau_{3y}$  – установившиеся превышения температуры для каждого участка, °C.

Введем обозначение  $b = e^{-\frac{t}{T}}$  и перепишем уравнения в виде:

$$\tau_1 - b\tau_3 = (1 - b)\tau_{1y}, \quad (4.52)$$

$$-b\tau_1 + \tau_2 = (1 - b)\tau_{2y}, \quad (4.53)$$

$$-b\tau_2 + \tau_3 = (1 - b)\tau_{3y}. \quad (4.54)$$

Решив эту систему уравнений относительно  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ , получим:

$$\tau_1 = \frac{1 - b}{1 - b^3} (\tau_{1y} + b^2\tau_{2y} + b\tau_{3y}), \quad (4.55)$$

$$\tau_2 = \frac{1 - b}{1 - b^3} (\tau_{2y} + b^2\tau_{3y} + b\tau_{1y}), \quad (4.56)$$

$$\tau_3 = \frac{1 - b}{1 - b^3} (\tau_{3y} + b^2\tau_{1y} + b\tau_{2y}). \quad (4.57)$$

Аналогично (4.57) можно записать выражение для расчета превышения температуры в конце цикла при  $n$  равных участках графика:

$$\tau_n = \frac{1-b}{1-b^n} (b^{n-1}\tau_{1y} + b^{n-2}\tau_{2y} + b^{n-3}\tau_{3y} + \dots + b^{n-n}\tau_{ny}). \quad (4.58)$$

Таким образом, можем записать:

$$\tau_0 = \frac{1-b}{1-b^n} \sum_1^n b^{n-i}\tau_{iy}. \quad (4.59)$$

где

$$i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (4.60)$$

Найдем еще одну связь, просуммировав уравнения (4.55), (4.56) и (4.57):

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \frac{1-b}{1-b^3} (\tau_{1y} + \tau_{2y} + \tau_{3y})(1 + b + b^2). \quad (4.61)$$

После преобразований получаем:

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = \tau_{1y} + \tau_{2y} + \tau_{3y}. \quad (4.62)$$

Очевидно, что если график имеет  $n$  равных участков, справедливо выражение:

$$\sum_1^n \tau_i = \sum_1^n \tau_{iy}. \quad (4.63)$$

### 4.3 Влияние графика нагрузки на процессы теплового износа изоляции силового трансформатора

В качестве объекта исследования принимаем условный силовой трансформатор со следующими данными: класс изоляции – *A*, номинальное превышение температуры обмотки  $\tau_n = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ , температурный коэффициент сопротивления материала проводников обмотки  $\alpha = 0,004 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , коэффициент потерь  $a = 0,2$ ; эквивалентная постоянная времени нагрева  $T = 3 \text{ часа}$ . Температура окружающей среды принята равной  $\vartheta_{cp} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Зададимся графиком нагрузки (табл. 4.1), который представлен в виде функции  $\kappa = f(t)$ . Затем сделаем перестановку очередности следования нагрузки по времени так, как это показано на рис. 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8. Кроме того, определим тепловой износ изоляции, заменив реальный график среднеквадратичным значением нагрузки (рис. 4.9).

Таблица 4.1 – График суточной нагрузки силового трансформатора

$t, \text{ ч}$	$\kappa$	$t, \text{ ч}$	$\kappa$
0 – 1	0,425	12 – 13	0,625
1 – 2	0,425	13 – 14	0,925
2 – 3	0,425	14 – 15	1,125
3 – 4	0,425	15 – 16	1,125
4 – 5	0,425	16 – 17	0,875
5 – 6	0,425	17 – 18	1,0
6 – 7	0,425	18 – 19	1,0
7 – 8	0,875	19 – 20	1,0
8 – 9	1,25	20 – 21	1,0
9 – 10	1,25	21 – 22	1,0
10 – 11	1,0	22 – 23	1,0
11 – 12	1,0	23 – 24	0,425

Составляем следующий алгоритм определения теплового износа изоляции. Вначале определяем превышение температуры обмотки в начале цикла в квазиустановившемся состоянии по (60):

$$\tau_0 = \frac{1-b}{1-b^n} \sum_1^n b^{n-i} \tau_{iy}. \quad (4.64)$$

Установившееся превышение температуры обмотки на  $i$ -м участке графика определяем по (122):

$$\tau_{iy} = \tau_n \frac{a + \kappa_i^2}{a + 1 - \alpha \tau (\kappa_i^2 - 1)}. \quad (4.65)$$

Превышение температуры в конце  $i$ -го участка графика определяем по (123):

$$\tau_i = \tau_{iy} \left( 1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T}}. \quad (4.66)$$

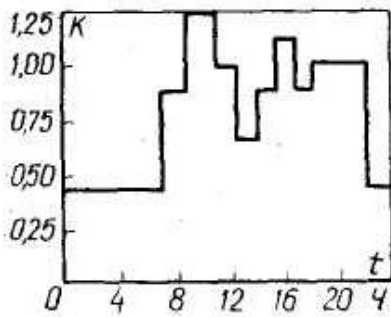


Рисунок 4.4 – График нагрузки №1

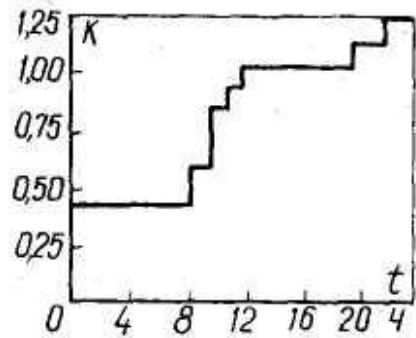


Рисунок 4.5 – График нагрузки №2

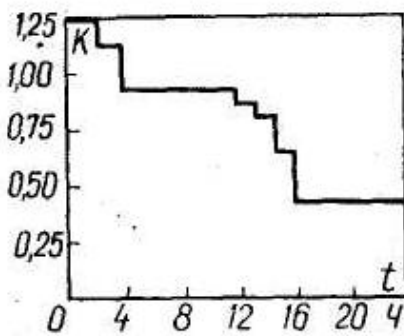


Рисунок 4.6 – График нагрузки №3

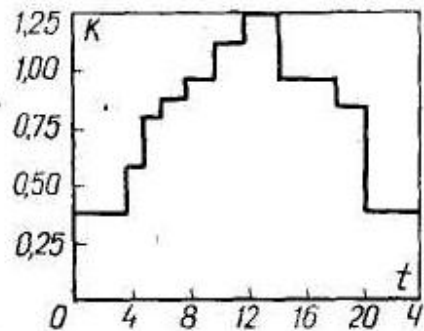


Рисунок 4.7 – График нагрузки №4

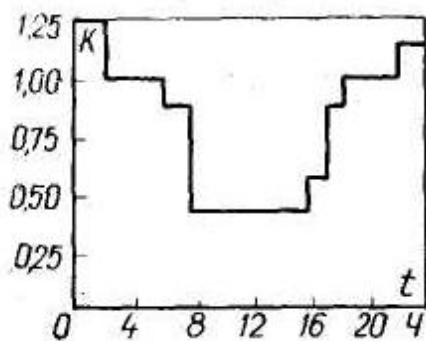


Рисунок 4.8 – График нагрузки №5

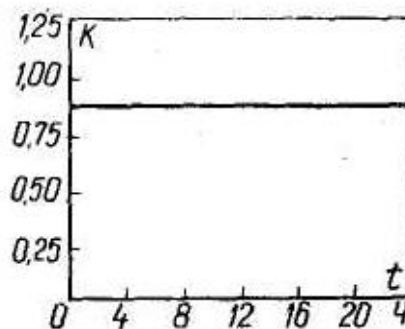


Рисунок 4.9 – График нагрузки №6

Тепловой износ изоляции обмоток силового трансформатора на  $i$ -м участке определяем как  $\int \varepsilon_i dt$  с учетом (14) и (123):

$$E_i = \int_0^{t_i} e^B \left( \frac{1}{\Theta_n} \frac{1}{\tau_{iy} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_{ie} e^{-\frac{t}{T}} + \vartheta_{cp} + 273} \right) dt. \quad (4.67)$$

Суммарный тепловой износ изоляции силового трансформатора за цикл работы определяем следующим образом:

$$E = \sum_1^n E_i. \quad (4.68)$$

Результаты исследований влияния графика нагрузки на тепловой износ изоляции силового трансформатора (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Суточные тепловые износы изоляции

Температура окружающей среды, °C	Суточный тепловой износ изоляции в базовых часах для графиков нагрузки					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
20	3,55	4,87	4,03	5,82	5,73	1,64

На основании результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы: влияние графика нагрузки на процесс теплового износа изоляции происходит путем формирования графика теплового процесса обмоток, который определяет среднюю скорость теплового износа изоляции за один цикл работы силового трансформатора, форма графика нагрузки силового трансформатора существенно влияет на величину суммарного теплового износа изоляции за цикл работы; наибольший тепловой износ изоляции наблюдается при выпуклой форме графика (отклонение составляет 64 %); замена же реального графика нагрузки силового трансформатора среднеквадратичным значением нагрузки приводит к значительно заниженному значению суточного теплового износа изоляции (в 2 – 3,5 раза) против теплового износа при реальном графике нагрузки, поэтому оценка загрузки силового трансформатора по среднеквадратичным значениям мощности может привести к существенным ошибкам.

#### **4.4 Способ дистанционного функционального диагностирования режимов работы силовых трансформаторов**

В связи с тем, что силовые трансформаторы потребительских трансформаторных подстанций в агропромышленном комплексе не обслуживаются постоянно и расположены на значительной территории, с целью своевременного выявления аномальных режимов работы разработан способ дистанционного функционального диагностирования режимов работы силовых трансформаторов.

Алгоритм диагностирования следующий:

- 1) Через каждый час ( $t_i = 1$ ) измеряются силы токов нагрузки силового трансформатора, находится их среднеквадратичное значение и коэффициент кратности  $k_i$ .
- 2) Рассчитывается превышение температуры изоляции на время замера:

$$\tau_i = \tau_{iy} + \tau'_{iy} e^{-\frac{t_i}{T_i}} + \tau'_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T_i}} + \tau''_{iy} e^{-\frac{t_i}{T_i}} + \tau''_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T_i}} + \tau'''_{iy} e^{-\frac{t_i}{T_i}} + \tau'''_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T_i}}, \quad (4.69)$$

$$\tau_{iy} = \tau_H \frac{a + \kappa_i^2}{a + 1 - \alpha \tau_H (\kappa_i^2 - 1)}, \quad (4.70)$$

$$\tau'_{iy} = \frac{l_{i1} P_{i1}^2 + t_{i1} P_{i1} + r_{i1}}{P_{i1} (3\kappa P_{i1}^2 + 2l_i P_{i1} + r_i)}, \quad (4.71)$$

$$\tau''_{iy} = \frac{l_{i1} P_{i2}^2 + t_{i1} P_{i2} + r_{i1}}{P_{i2} (3\kappa P_{i2}^2 + 2l_i P_{i2} + r_i)}, \quad (4.72)$$

$$\tau'''_{iy} = \frac{l_{i1} P_{i3}^2 + t_{i1} P_{i3} + r_{i1}}{P_{i3} (3\kappa P_{i3}^2 + 2l_i P_{i3} + r_i)}, \quad (4.73)$$

$$l_1 = C_2 C_3 3r_0 \kappa_i^2 I_H^2, \quad (4.74)$$

$$l = (\mathcal{J}_{12} + \mathcal{J}_{13} - \alpha 3r_0 \kappa_i^2 I_H^2) C_2 C_3 + (\mathcal{J}_{12} + \mathcal{J}_{23}) C_1 C_3 + (\mathcal{J}_{13} + \mathcal{J}_{23} + \mathcal{J}_3) C_1 C_2, \quad (4.75)$$

$$t_1 = (\mathcal{J}_{12} + \mathcal{J}_{23}) C_3 3r_0 \kappa_i^2 I_H^2 + (\mathcal{J}_{13} + \mathcal{J}_{23} + \mathcal{J}_3) C_2 3r_0 \kappa_i^2 I_H^2 + \mathcal{J}_{12} P_2 C_3, \quad (4.76)$$

$$t = (\mathcal{J}_{12} + \mathcal{J}_{23}) (\mathcal{J}_{12} + \mathcal{J}_{13} - \alpha 3r_0 \kappa_i^2 I_H^2) C_3 + (\mathcal{J}_{13} + \mathcal{J}_{23} + \mathcal{J}_3) (\mathcal{J}_{12} + \mathcal{J}_{13} - \alpha 3r_0 \kappa_i^2 I_H^2) C_2 + (\mathcal{J}_{12} + \mathcal{J}_{23}) (\mathcal{J}_{13} + \mathcal{J}_{23} + \mathcal{J}_3) C_1 - \mathcal{J}_{13}^2 C_2 - \mathcal{J}_{12}^2 C_2 - \mathcal{J}_{23}^2 C_1, \quad (4.77)$$

$$r_1 = (\mathcal{J}_{12} + \mathcal{J}_{23}) (\mathcal{J}_{13} + \mathcal{J}_{23} + \mathcal{J}_3) 3r_0 \kappa_i^2 I_H^2 + \mathcal{J}_{12} \mathcal{J}_{23} P_2 + \mathcal{J}_{12} P_2 (\mathcal{J}_{13} + \mathcal{J}_{23} + \mathcal{J}_3) - \mathcal{J}_{23}^2 3r_0 \kappa_i^2 I_H^2, \quad (4.78)$$

$$r = (L_{12} + L_{23})(L_{13} + L_{23} + L_3)(L_{12} + L_{13} - \alpha 3r_0 \kappa_i^2 I_n^2) - \quad (4.79)$$

$$- 2L_{12}L_{13}L_{23} - (L_{12} + L_{23})L_{13}^2 - (L_{13} + L_{23} + L_3)L_{12}^2 -$$

$$- (L_{12} + L_{13} - \alpha 3r_0 \kappa_i^2 I_n^2)L_{23}^2,$$

$$\kappa = C_1 C_2 C_3. \quad (4.80)$$

Корни  $p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}$  находятся из уравнения:

$$\kappa p_i^3 + l_i p_i^2 + t_i p_i + r_i = 0, \quad (4.81)$$

$$T_i' = \frac{1}{p_{i1}}, \quad (4.82)$$

$$T_i'' = \frac{1}{p_{i2}}, \quad (4.83)$$

$$T_i''' = \frac{1}{p_{i3}}. \quad (4.84)$$

3) Находится скорость теплового износа изоляции на  $i$ -м участке графика:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n e^{B\left(\frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{\Theta_i}\right)}, \quad (4.85)$$

$$\Theta_i = \tau_i + \vartheta_{cp} + 273. \quad (4.86)$$

4) Сравнивается скорость теплового износа изоляции обмоток силового трансформатора с допустимым значением и в случае, если  $\varepsilon_i > \varepsilon_\delta$ , подается сигнал.

На рисунке 4.10 представлена структурная схема дистанционного функционального диагностирования силового трансформатора.

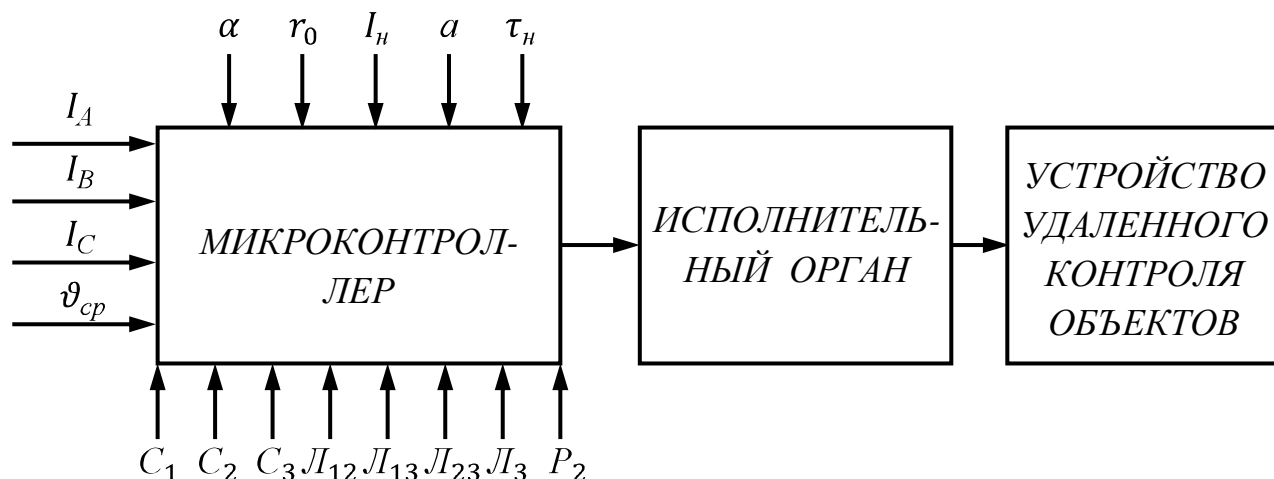


Рис. 4.10 Структурная схема дистанционного функционального диагностирования силового трансформатора

#### 4.5 Ресурсосберегающий режим параллельной работы силовых трансформаторов

Исследуем расход ресурса изоляции обмоток (тепловой износ) силового трансформатора в зависимости от его загрузки и температуры окружающей среды.

Введем понятие коэффициента расхода ресурса изоляции, под которым будем понимать отношение величины расхода ресурса изоляции за заданное время к кратности полной мощности, отдаваемой силовым трансформатором, то есть:

$$k_{pp} = \frac{E_i}{k_i}, \quad (4.87)$$

где  $E_i$  – тепловой износ изоляции обмоток силового трансформатора при заданной кратности отдаваемой полной мощности и длительности времени его работы, бч;

$k_i$  – кратность отдаваемой полной мощности силового трансфор-

матора.

В свою очередь

$$\kappa_i = \frac{S_i}{S_n}, \quad (4.88)$$

где  $S_i$  – отдаваемая полная мощность силового трансформатора, ВА;

$S_n$  – номинальная полная мощность силового трансформатора, ВА.

Тепловой износ изоляции обмоток силового трансформатора находим по следующему выражению:

$$E_i = t_i \varepsilon_n e^{B \left( \frac{1}{\Theta_n} \frac{1}{\tau_n \frac{a+1-\alpha\tau_n(\kappa_i^2-1)}{a+\kappa_i^2} + \vartheta_{cp} + 273} \right)}, \quad (4.89)$$

где  $t_i$  – длительность  $i$ -го участка работы силового трансформатора, ч;

$\varepsilon_n$  – номинальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

$B$  – показатель, характеризующий класс изоляции, К;

$\Theta_n$  – абсолютная номинальная температура изоляции, К;

$\tau_n$  – номинальное превышение температуры изоляции, °С;

$a$  – отношение номинальных потерь в стали к номинальным потерям в меди в силовом трансформаторе;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала обмоток, 1/°С;

$\vartheta_{cp}$  – температура окружающей среды, °С.

Для исследуемого силового трансформатора принимаем следующие исходные данные:

$$t_i = 1 \text{ ч}$$

$$\varepsilon_n = 1 \text{ бч/ч}$$

$$B = 9500 \text{ К}$$

$$\Theta_n = 378 \text{ К}$$

$$\tau_n = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$a = 0,25$$

$$\alpha = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_{cp} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Исследуем коэффициент расхода ресурса изоляции  $\kappa_{pp_i}^1$  при одном работающем трансформаторе и  $\kappa_{pp_i}^2$  при двух работающих трансформаторах. Результаты заносим в таблицы 4.3 и 4.4 и представляем графически на рисунках 4.11 и 4.12.

Таблица 4.3 – График коэффициента расхода ресурса,  $\vartheta_{cp} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$\kappa_i$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4
$\kappa_{pp_i}^1$	0,2	0,1	0,1	0,1	0,12	0,15	0,21	0,33	0,56	1	1,84	3,5	6,9
$\kappa_{pp_i}^2$		0,4		0,2		0,2		0,2		0,24	0,3		0,42

Таблица 4.4 – График коэффициента расхода ресурса,  $\vartheta_{cp} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

$\kappa_i$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4
$\kappa_{pp_i}^1$	0,1	0,05	0,03	0,04	0,05	0,06	0,1	0,7	2,7	5,1	19,2	39	80,2
$\kappa_{pp_i}^2$		0,2		0,1		0,06		0,08		0,09	0,12		0,2

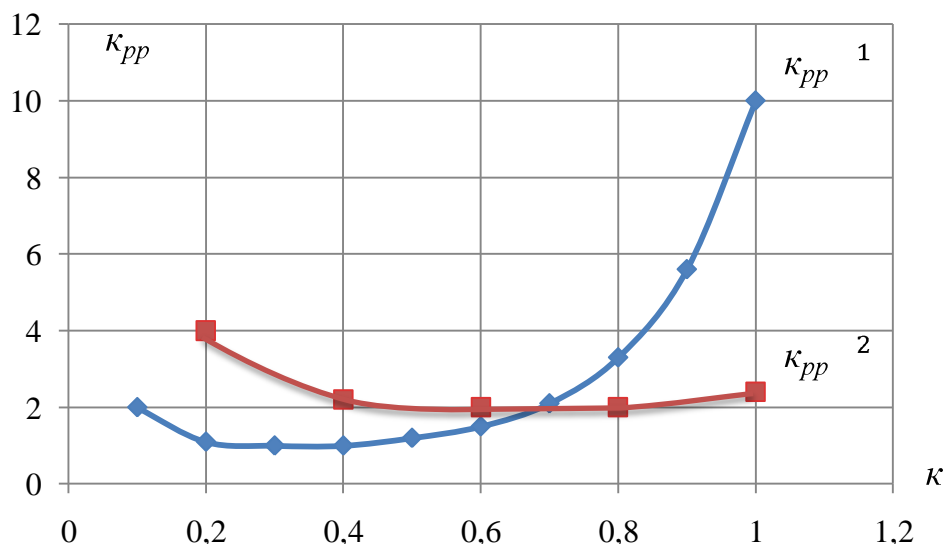


Рисунок 4.11 Зависимости коэффициента расхода ресурса при одном и двух параллельно работающих силовых трансформаторах и температуре окружающей среды 40°С

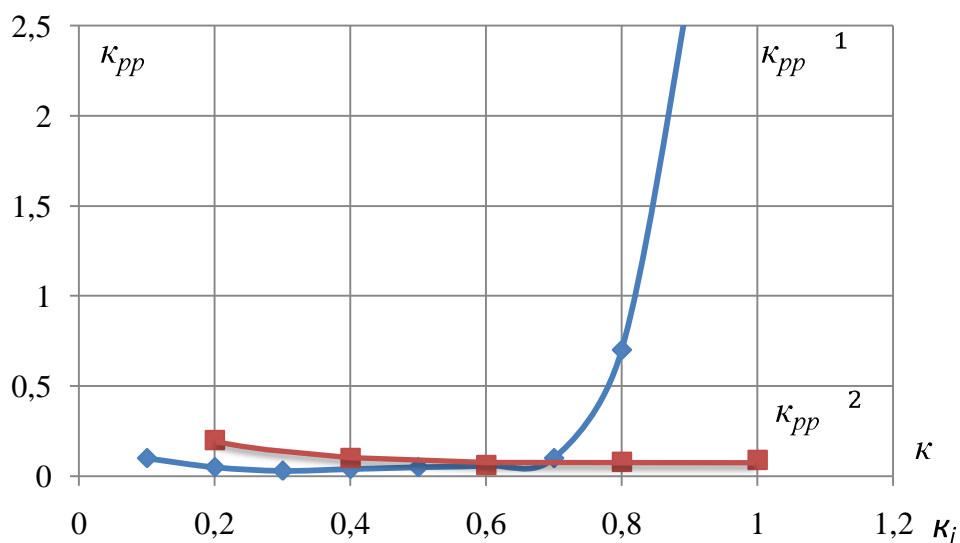


Рисунок 4.12 Зависимости коэффициента расхода ресурса при одном и двух параллельно работающих силовых трансформаторах и температуре окружающей среды 30°С

Учитывая то, что коэффициенты потерь силовых трансформаторов примерно одинаковые, полученные результаты расхода ресурса изоляции силового трансформатора справедливы для марок трансформаторов с коэффициентом потерь, находящимся в пределах 0,25. Поэтому включение второго трансформатора на параллельную работу необходимо производить при кратности загрузки первого трансформатора  $\kappa = 0,7$ .

## **РАЗДЕЛ 5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В УС- ЛОВИЯХ СОИЗМЕРИМОЙ МОЩНОСТИ**

### **5.1 Постановка вопроса**

В условиях агропромышленного комплекса из-за совместного электропитания бытовой и производственной нагрузок, большой протяженности линий электропередачи часто возникают случаи, когда асинхронные электродвигатели привода рабочих машин сельскохозяйственного производства оказываются в условиях соизмеримой мощности.

Эти условия, характеризуются, прежде всего, значительным понижением напряжения при пуске, что может привести к затяжным или несостоявшимся пускам. Кроме этого, часто наблюдается асимметрия приложенного напряжения, что еще более усугубляет пусковые режимы. Поэтому исследование электромеханических и тепловых процессов при пуске асинхронных двигателей привода рабочих машин основных классов при пониженном напряжении и при его асимметрии представляет как теоретический, так и практический интерес, что является задачей этой главы.

### **5.2 Электромеханические переходные процессы при пуске асинхронных двигателей**

Асинхронные двигатели работают в паре с рабочими машинами, которые обладают различными механическими характеристиками, описываемыми эмпирической формулой [1]:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (5.1)$$

где  $M_c$  – текущий момент сопротивления на валу рабочей машины,

$H \cdot м$ ;

$M_{сн}$  – номинальный момент сопротивления на валу рабочей машины при номинальной угловой скорости,  $H \cdot м$ ;

$M_0$  – момент сопротивления трения в движущихся частях рабочей машины, приведенный к ее валу,  $H \cdot м$ ;

$\omega_n$  – номинальная угловая скорость вала рабочей машины,  $рад/с$ ;

$\omega$  – текущая угловая скорость вала рабочей машины,  $рад/с$ ;

$x$  – коэффициент, характеризующий изменение момента сопротивления при изменении угловой скорости вала рабочей машины.

Рассмотрим электромеханические переходные процессы при пуске асинхронных электродвигателей привода рабочих машин с механическими характеристиками следующих категорий: независящими от скорости ( $x = 0$ ); линейно-возрастающими ( $x = 1$ ); нелинейно-возрастающими ( $x = 2$ ); нелинейно-спадающими ( $x = -1$ ).

При этом будем считать, что номинальный момент сопротивления на валу рабочей машины при полной ее нагрузке равен номинальному моменту приводного электродвигателя, то есть

$$M_{сн} = M_n. \quad (5.2)$$

Если рабочая машина загружается не полностью, то номинальный момент сопротивления рабочей машины меньше номинального момента приводного электродвигателя и равен

$$M_{сн} = \kappa_3 M_n, \quad (5.3)$$

где  $\kappa_3$  – коэффициент загрузки рабочей машины;

$M_n$  – номинальный момент асинхронного двигателя,  $H \cdot м$ .

Тогда (5.1) переписется в следующем виде:

$$M_c = M_0 + (\kappa_3 M_n - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (5.4)$$

Механическую характеристику электродвигателя представим при асимметрии питающей сети, линеаризовав ее отдельные участки (рис. 5.1)

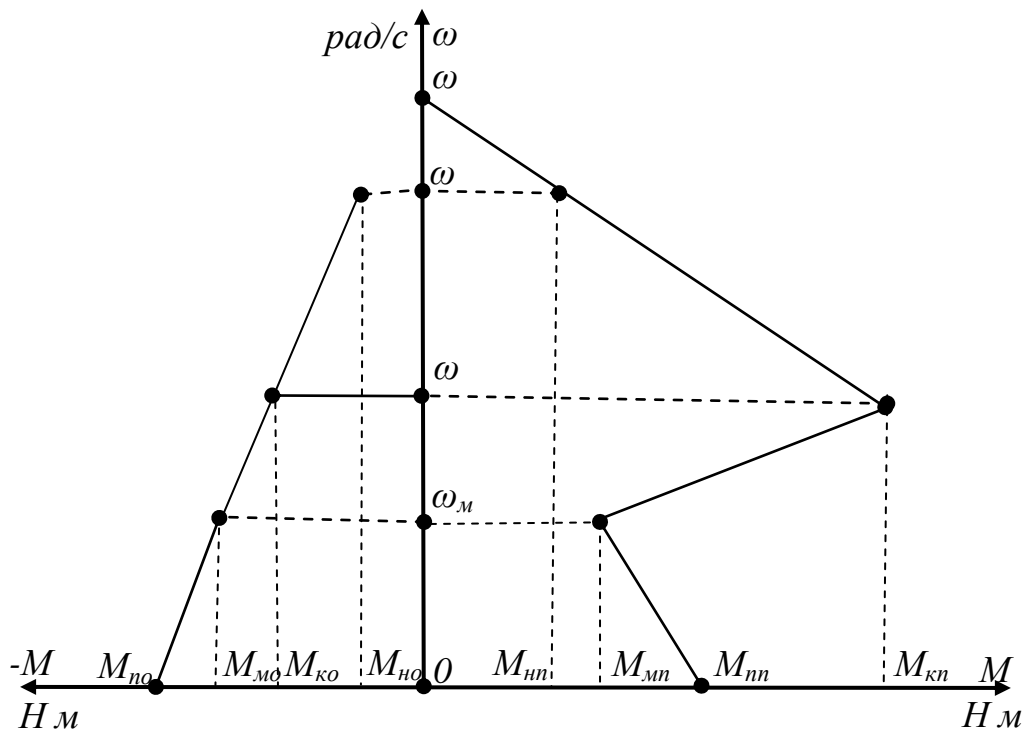


Рис. 2.1 Линеаризованная механическая характеристика электродвигателя при асимметрии питающей сети.

Запишем выражения прямых и обратных моментов:

$$M_{нп} = \kappa_{U1}^2 M_n, \quad (5.4a)$$

$$M_{но} = \kappa_{U2}^2 M_H, \quad (5.4б)$$

$$M_{кн} = \kappa_{U1}^2 \mu_{кн} M_H, \quad (5.4в)$$

$$M_{ко} = \kappa_{U2}^2 \mu_{ко} M_H, \quad (5.4г)$$

$$M_{мн} = \kappa_{U1}^2 \mu_{мн} M_H, \quad (5.4д)$$

$$M_{мо} = \kappa_{U2}^2 \mu_{мо} M_H, \quad (5.4е)$$

$$M_{нн} = \kappa_{U1}^2 \mu_{нн} M_H, \quad (5.4ж)$$

$$M_{но} = \kappa_{U2}^2 \mu_{но} M_H, \quad (5.4з)$$

где  $\kappa_{U1}$  и  $\kappa_{U2}$  – кратности напряжений прямой и обратной последовательностей;

$M_{нн}$ ,  $M_{кн}$ ,  $M_{мн}$ ,  $M_{нн}$  – моменты: номинальный, критический, минимальный, пусковой от напряжения симметричной составляющей прямой последовательности, Н·м;

$M_{но}$ ,  $M_{ко}$ ,  $M_{мо}$ ,  $M_{но}$  – моменты: номинальный, критический, минимальный, пусковой от напряжения симметричной составляющей обратной последовательности, Н·м;

$\mu_{кн}$ ,  $\mu_{мн}$ ,  $\mu_{нн}$  – кратность моментов: критического, минимального, пускового от напряжения симметричной составляющей прямой последовательности;

$\mu_{ко}$ ,  $\mu_{мо}$ ,  $\mu_{но}$  – кратность моментов: критического, минимального, пускового от напряжения симметричной составляющей обратной последовательности.

В основу электромеханического переходного процесса положим уравнение движения системы «электродвигатель – рабочая машина», считая момент инерции системы величиной постоянной:

$$M = I \frac{d\omega}{dt} + M_c, \quad (5.5)$$

где  $M$  – момент, развиваемый двигателем,  $H \cdot м$ ;

$I$  – момент инерции системы «электродвигатель – рабочая машина»,  $кг \cdot м^2$ ;

$t$  – текущее время,  $с$ ;

$\omega$  – угловая скорость вала электродвигателя,  $рад/с$ .

### 5.2.1 Электромеханический переходный процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с независимой от скорости механической характеристикой

Рассмотрим электромеханический переходный процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с независимой от скорости механической характеристикой ( $x = 0$ ).

Для такой рабочей машины:

$$M_{сн} = k_3 M_n. \quad (5.6)$$

Момент, развиваемый электродвигателем на первом участке механической характеристики:

$$M = (M_{nn} - M_{no}) - \frac{(M_{nn} - M_{no}) - (M_{mn} - M_{mo})}{\omega_m} \omega, \quad (5.7)$$

где  $\omega_m$  – минимальная угловая скорость электродвигателя,  $рад/с$ .

Подставим (5.6) и (5.7) в (5.5) и получим уравнение движения системы на первом участке разнога электродвигателя:

$$I \frac{d\omega}{dt} + \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} M_H - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} M_H) - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} M_H - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} M_H)}{\omega_M} \omega + \kappa_3 M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} M_H - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} M_H) = 0, \quad (5.8)$$

Перепишем уравнение (5.8) в относительных единицах:

$$\frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}}{\omega_M} \omega + \kappa_3 - \kappa_{U1}^2 \mu_{nn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{no} = 0, \quad (5.9)$$

Перепишем уравнение (5.9):

$$\frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo})}{\omega_M} \omega + \kappa_3 - \kappa_{U1}^2 \mu_{nn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{no} = 0. \quad (5.10)$$

Решив уравнение (5.10), находим выражение текущей угловой скорости на первом участке разгона электродвигателя:

$$\omega = \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo})} \omega_M \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right), \quad (5.11)$$

где

$$T_1 = \frac{I \omega_M}{M_H (\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo}))}. \quad (5.12)$$

Приняв при  $t_1$   $\omega = \omega_M$ , находим из уравнения (5.11) время разгона электродвигателя на первом участке:

$$t_1 = T_1 \ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} - \kappa_3}. \quad (5.13)$$

Момент, развиваемый электродвигателем на втором участке разгона:

$$\begin{aligned}
 M = & (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H + \\
 & + \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H}{\omega_k - \omega_M} \omega - \\
 & - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H}{\omega_k - \omega_M} \omega_M,
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

где  $\omega_k$  – критическая угловая скорость, *рад/с*.

Подставив (5.14) и (5.6) в (5.5), получим:

$$\begin{aligned}
 I \frac{d\omega}{dt} - & \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H}{\omega_k - \omega_M} \omega + \\
 & - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H}{\omega_k - \omega_M} \omega_M + \\
 & + \kappa_3 M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H = 0.
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

Перепишем уравнение (5.15) в относительных единицах:

$$\begin{aligned}
 \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} - & \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo})}{\omega_k - \omega_M} \omega + \\
 & - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo})}{\omega_k - \omega_M} \omega_M + \\
 & + \kappa_3 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) = 0.
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

Перепишем уравнение (5.16):

$$\begin{aligned}
 \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} - & \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - \mu_{mo})}{\omega_k - \omega_M} \omega + \\
 & - \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - \mu_{mo})}{\omega_k - \omega_M} \omega_M + \\
 & + \kappa_3 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) = 0.
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

Решив уравнение (5.17), находим выражение текущей угловой скорости на втором участке разгона электродвигателя:

$$\omega = \omega_M + \frac{\kappa_3 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo})}{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mo}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - \mu_{mo})} (\omega_K - \omega_M) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \quad (5.18)$$

где

$$T_2 = \frac{I(\omega_K - \omega_M)}{M_H (\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo}))}. \quad (5.19)$$

Приняв при  $t_2$   $\omega = \omega_K$ , находим из уравнения (5.18) время разгона электродвигателя на втором участке:

$$t_2 = T_2 \ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} - \kappa_3}. \quad (5.20)$$

Момент, развиваемый электродвигателем на третьем участке разгона:

$$\begin{aligned} M &= (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H + \\ &+ \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2) M_H}{\omega_H - \omega_K} \omega - \\ &- \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2) M_H}{\omega_H - \omega_K} \omega_M. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Подставим (5.21) и (5.6) в (5.5) и получим:

$$\begin{aligned} I \frac{d\omega}{dt} - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2) M_H}{\omega_K - \omega_M} \omega + \\ - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2) M_H}{\omega_K - \omega_M} \omega_M + \\ + \kappa_3 M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_K = 0. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Перепишем уравнение (5.22) в относительных единицах:

$$\begin{aligned} \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} \omega - \\ - \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} \omega_K + \\ + \kappa_3 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) = 0. \end{aligned} \quad (5.23)$$

Перепишем уравнение (5.23):

$$\begin{aligned} \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - 1) \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - 1)}{\omega_H - \omega_K} \omega - \\ - \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - 1) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - 1) - \kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} \omega_K + \\ + \kappa_3 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) = 0. \end{aligned} \quad (5.24)$$

Решив уравнение (5.24), находим выражение текущей угловой скорости на третьем участке разгона электродвигателя:

$$\omega = \omega_K + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2} (\omega_H - \omega_K) \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) \quad (5.25)$$

где

$$T_3 = \frac{I(\omega_H - \omega_K)}{M_H (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2)}. \quad (5.26)$$

Приняв при  $t_3$   $\omega = \kappa \omega_H$ , находим из уравнения (5.25) время разгона электродвигателя на третьем участке:

$$t_3 = T_3 \ln \frac{1}{1 - \frac{(\kappa\omega_n - \omega_k)(\kappa_{U1}^2\mu_{kn} - \kappa_{U2}^2\mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2)}{(\omega_n - \omega_k)(\kappa_{U1}^2\mu_{kn} - \kappa_{U2}^2\mu_{ko} - \kappa_3)}}} \quad (5.27)$$

### 5.2.2 Электромеханический переходный процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с линейно-возрастающей механической характеристикой

Рассмотрим электромеханический переходный процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с линейно-возрастающей механической характеристикой ( $x=I$ )

Для такой рабочей машины момент сопротивления равен:

$$M_c = M_0 + (\kappa_3 M_n - M_0) \frac{\omega}{\omega_n} \quad (5.28)$$

На первом участке разгона электродвигателя момент, развиваемый электродвигателем, описывается уравнением (5.7).

Подставив (5.28) и (5.7) в уравнение (5.5), получим уравнение движения системы на первом участке разгона электродвигателя:

$$\begin{aligned} & I \frac{d\omega}{dt} - (\kappa_{U1}^2\mu_{mn} - \kappa_{U2}^2\mu_{no})M_n + \\ & + \frac{(\kappa_{U1}^2\mu_{mn} - \kappa_{U2}^2\mu_{no})M_n - (\kappa_{U1}^2\mu_{mn} - \kappa_{U2}^2\mu_{mo})M_n}{\omega_m} \omega + \\ & + m_0 M_n - (\kappa_3 M_n - m_0 M_n) \frac{\omega}{\omega_n} = 0. \end{aligned} \quad (5.29)$$

Перепишем уравнение (5.29) в относительных единицах:

$$\begin{aligned}
& I \frac{d\omega}{dt} - (\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no}) + \\
& + \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no}) - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo})}{\omega_M} \omega + \\
& + m_0 - (\kappa_3 - m_0) \frac{\omega}{\omega_H} = 0.
\end{aligned} \tag{5.30}$$

Перепишем уравнение (5.30):

$$\begin{aligned}
& \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo})}{\omega_M} \omega + \\
& + m_0 + \frac{(\kappa_3 - m_0)}{\omega_H} \omega - (\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no}) = 0.
\end{aligned} \tag{5.31}$$

Решив уравнение (5.31), находим выражение текущей угловой скорости на первом участке разгона электродвигателя:

$$\omega = \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - m_0}{\frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo})}{\omega_M} + \frac{(\kappa_3 - m_0)}{\omega_H}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right), \tag{5.32}$$

где

$$T_1 = \frac{I}{M_H \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mo}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} + \mu_{mo})}{\omega_M} + \frac{(\kappa_3 - m_0)}{\omega_H}}. \tag{5.33}$$

Приняв при  $t_1$   $\omega = \omega_M$ , находим из уравнения (5.32) время разгона электродвигателя на первом участке:

$$t_1 = T_1 \ln \frac{1}{1 - \frac{\omega_M}{\gamma}}, \tag{5.34}$$

где

$$\gamma = \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - m_0}{M_H \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{mn} - \mu_{mo}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} + \mu_{mo})}{\omega_M} + \frac{(\kappa_3 - m_0)}{\omega_H}}. \quad (5.35)$$

На втором участке разгона электродвигателя момент, развиваемый электродвигателем, описывается уравнением (5.14). Подставим (5.14) и (5.28) в уравнение (5.5) и получим уравнение движения системы на втором участке разгона электродвигателя:

$$\begin{aligned} & I \frac{d\omega}{dt} - (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - \\ & - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H}{\omega_K - \omega_M} \omega + \\ & + \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H}{\omega_K - \omega_M} \omega_M + \\ & + m_0 M_H - (\kappa_3 M_H - m_0 M_H) \frac{\omega}{\omega_H} = 0. \end{aligned} \quad (5.36)$$

Перепишем уравнение (5.36) в относительных единицах:

$$\begin{aligned} & \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \left( \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H} - \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U1}^2 \mu_{mo}}{\omega_K - \omega_M} \right) \omega + \\ & + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}}{\omega_K - \omega_M} \omega_M + \\ & + m_0 - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} = 0. \end{aligned} \quad (5.37)$$

Перепишем уравнение (5.37):

$$\begin{aligned} & \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \left( \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H} - \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} + \mu_{mo})}{\omega_K - \omega_M} \right) \omega + \\ & + \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - \mu_{mo})}{\omega_K - \omega_M} \omega_M + \\ & + m_0 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) = 0. \end{aligned} \quad (5.38)$$

Решив уравнение (5.38), находим выражение текущей угловой скорости на втором участке разгона электродвигателя:

$$\omega = \omega_M e^{-\frac{t}{T_2}} + \gamma \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right), \quad (5.39)$$

где

$$\gamma = \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} - m_0 - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U1}^2 \mu_{mo}) \omega_M}{\omega_K - \omega_M}}{\frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H} - \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U1}^2 \mu_{mo}}{\omega_K - \omega_M}}, \quad (5.40)$$

$$T_2 = \frac{I}{M_H \gamma}. \quad (5.41)$$

Приняв при  $t_2$   $\omega = \omega_K$ , находим из уравнения (5.39) время разгона электродвигателя на втором участке:

$$t_2 = T_2 \ln \frac{\omega_M - \gamma}{\omega_K - \gamma}. \quad (5.42)$$

На третьем участке разгона электродвигателя момент, развиваемый электродвигателем, описывается уравнением (5.21). Подставим (5.21) и (5.28) в уравнение (5.5) и получим уравнение движения системы на третьем участке:

$$I \frac{d\omega}{dt} - (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) M_H - (\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2) M_H}{\omega_K - \omega_M} \omega + \quad (5.43)$$

$$+ \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko})M_H - (\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2)M_H}{\omega_K - \omega_M} \omega_K +$$

$$+ m_0 M_y - (\kappa_3 M_H - m_0 M_H) \frac{\omega}{\omega_H} = 0.$$

Перепишем уравнение (5.43) в относительных единицах:

$$\frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \kappa_{U1}^2 \mu_{kn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} +$$

$$- \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} \omega -$$

$$- \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} \omega_K +$$

$$+ m_0 + \frac{(\kappa_3 - m_0)\omega}{\omega_H} = 0. \quad (5.44)$$

Перепишем уравнение (5.44):

$$\frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} - \left( \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - 1) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - 1)}{\omega_H - \omega_K} + \frac{(\kappa_3 - m_0)}{\omega_H} \right) \omega -$$

$$- \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - 1) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - 1)}{\omega_H - \omega_K} \omega_K + m_0 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) = 0. \quad (5.45)$$

Решив уравнение (5.45), находим выражение текущей угловой скорости на третьем этапе разгона электродвигателя:

$$\omega = \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - m_0 + \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U1}^2)\omega_K}{\omega_H - \omega_K}}{\frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2)\omega_K}{\omega_H - \omega_K} + \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H}} \times$$

$$\times \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) + \omega_K e^{-\frac{t}{T_3}}, \quad (5.46)$$

где

$$T_3 = \frac{I}{M_H \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{кн} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ко} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} + \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H}}. \quad (5.47)$$

Приняв при  $t_3$   $\omega = \kappa \omega_H$ , находим из уравнения (2.46) время разгона электродвигателя на третьем участке:

$$t_3 = T_3 \ln \frac{\omega_K - \alpha}{\omega_H - \alpha}. \quad (5.48)$$

где

$$\alpha = \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{кн} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ко} - m_0 + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{кн} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ко} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} \omega_K}{\frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{кн} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ко} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} + \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H}}. \quad (5.49)$$

### 5.2.3 Электромеханический переходный процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с нелинейно-возрастающей механической характеристикой

Рассмотрим электромеханический переходной процесс системы «электродвигатель – рабочая машина» с нелинейно-возрастающей механической характеристикой ( $x = 2$ ).

Для такой рабочей машины момент сопротивления равен:

$$M_c = M_0 + (\kappa_3 M_H - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^2. \quad (5.50)$$

На первом участке разгона электродвигателя момент, развиваемый электродвигателем, описывается уравнением (5.7).

Подставив (5.50) и (5.7) в уравнение (5.5), получим уравнение движе-

ния системы на первом участке разгона электродвигателя:

$$I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_3 M_H - m_0 M_H}{\omega_H^2} \omega^2 + \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}) M_H}{\omega_M} \omega +$$

$$+ m_0 M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no}) M_H = 0. \quad (5.51)$$

Перепишем уравнение (5.51) в относительных единицах:

$$I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H^2} \omega^2 + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}}{\omega_M} \omega +$$

$$+ m_0 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no}) = 0. \quad (5.52)$$

Перепишем уравнение (5.52):

$$I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H^2} \omega^2 + \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo})}{\omega_M} \omega +$$

$$+ m_0 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no}) = 0. \quad (5.53)$$

Решив уравнение (5.53), находим выражение текущей угловой скорости на первом участке разгона электродвигателя:

$$\omega = \frac{2c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right)}{(b - \sqrt{b^2 - 4ac}) e^{-\frac{t}{T_1}} - (b + \sqrt{b^2 - 4ac})}, \quad (5.54)$$

где

$$a = \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H^2}, \quad (5.55)$$

$$b = \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo})}{\omega_M}, \quad (5.56)$$

$$c = m_0 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no}) = 0. \quad (5.57)$$

$$T_1 = \frac{I}{M_H \sqrt{b^2 - 4ac}} \quad (5.58)$$

Приняв при  $t_1$   $\omega = \omega_H$ , находим из уравнения (5.54) время разгона электродвигателя на первом участке:

$$t_1 = T_1 \ln \left| \frac{2c + \omega_M (b - \sqrt{b^2 - 4ac})}{2c + \omega_M (b + \sqrt{b^2 - 4ac})} \right|. \quad (5.59)$$

На втором участке разгона электродвигателя момент, развиваемый электродвигателем, описывается уравнением (5.14). Подставим (5.14) и (5.50) в уравнение (5.5) и получим уравнение движения системы на втором участке разгона электродвигателя:

$$\begin{aligned} I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_3 M_H - m_0 M_H}{\omega_H^2} \omega^2 - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{\kappa n} - \kappa_{U2}^2 \mu_{\kappa o} - \kappa_{U1}^2 \mu_{\mu n} + \kappa_{U2}^2 \mu_{\mu o}) M_H}{\omega_{\kappa} - \omega_M} \omega + \\ + \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{\kappa n} - \kappa_{U2}^2 \mu_{\kappa o} - \kappa_{U1}^2 \mu_{\mu n} + \kappa_{U2}^2 \mu_{\mu o}) M_H}{\omega_{\kappa} - \omega_M} \omega_M + \\ + m_0 M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{\mu n} - \kappa_{U2}^2 \mu_{\mu o}) M_H = 0. \end{aligned} \quad (5.60)$$

Перепишем уравнение (5.60) в относительных единицах:

$$\begin{aligned} I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H^2} \omega^2 - \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{\kappa n} - \kappa_{U2}^2 \mu_{\kappa o} - \kappa_{U1}^2 \mu_{\mu n} + \kappa_{U2}^2 \mu_{\mu o}}{\omega_{\kappa} - \omega_M} \omega + \\ + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{\kappa n} - \kappa_{U2}^2 \mu_{\kappa o} - \kappa_{U1}^2 \mu_{\mu n} + \kappa_{U2}^2 \mu_{\mu o}}{\omega_{\kappa} - \omega_M} \omega_M + m_0 - \kappa_{U1}^2 \mu_{\mu n} - \kappa_{U2}^2 \mu_{\mu o} = 0. \end{aligned} \quad (5.61)$$

Перепишем уравнение (5.61):

$$\begin{aligned} & \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H^2} \omega^2 - \frac{\kappa_{U1}^2(\mu_{\kappa n} - \mu_{\kappa o}) - \kappa_{U2}^2(\mu_{mn} - \mu_{mo})}{\omega_{\kappa} - \omega_M} \omega + \\ & + \frac{\kappa_{U1}^2(\mu_{\kappa n} - \mu_{\kappa o}) - \kappa_{U2}^2(\mu_{mn} - \mu_{mo})}{\omega_{\kappa} - \omega_M} \omega_M + m_0 - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} = 0. \end{aligned} \quad (5.62)$$

Решив уравнение (5.62), находим выражение текущей угловой скорости на втором участке разгона электродвигателя:

$$\omega = \frac{\omega_M(b - \sqrt{b^2 - 4ac}) + 2c - (\omega_M(b + \sqrt{b^2 - 4ac}) + 2c)e^{-\frac{t}{T_2}}}{(2a\omega_M + b - \sqrt{b^2 - 4ac})e^{-\frac{t}{T_2}} - (2a\omega_M + b + \sqrt{b^2 - 4ac})}, \quad (5.63)$$

где

$$a = \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_H^2}, \quad (5.64)$$

$$b = -\frac{\kappa_{U1}^2(\mu_{\kappa n} - \mu_{mo}) - \kappa_{U2}^2(\mu_{\kappa o} - \mu_{mo})}{\omega_{\kappa} - \omega_M}, \quad (5.65)$$

$$c = \frac{\kappa_{U1}^2(\mu_{\kappa n} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2(\mu_{\kappa o} - \mu_{mo})}{\omega_{\kappa} - \omega_M} + m_0 - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} = 0. \quad (5.66)$$

$$T_2 = \frac{I}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \quad (5.67)$$

Приняв при  $t_2$   $\omega = \omega_{\kappa}$ , находим из уравнения (5.63) время разгона электродвигателя на втором участке:

$$t_2 = T_2 \ln \frac{\omega_{\kappa}(2a\omega_M + b - \sqrt{b^2 - 4ac}) + \omega_M(b + \sqrt{b^2 - 4ac}) + 2c}{\omega_{\kappa}(2a\omega_M + b + \sqrt{b^2 - 4ac}) + \omega_M(b - \sqrt{b^2 - 4ac}) + 2c}. \quad (5.68)$$

На третьем участке разгона электродвигателя момент, развиваемый электродвигателем, описывается уравнением (5.21). Подставим (5.21) и (5.50) в уравнение (5.5) и получим уравнение движения системы на третьем участке:

$$\begin{aligned}
& I \frac{d\omega}{dt} + \frac{(\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2)M_H - m_0 M_H}{\omega_H^2} \omega^2 + \\
& + \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko})M_H - (\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2)M_H}{\omega_H - \omega_K} \omega - \\
& - \frac{(\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko})M_H - (\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2)M_H}{\omega_H - \omega_K} \omega_K + \\
& + m_0 M_H - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko})M_H = 0.
\end{aligned} \tag{5.69}$$

Перепишем уравнение (5.69) в относительных единицах:

$$\begin{aligned}
& \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2 - m_0}{\omega_H^2} \omega^2 + \\
& + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} \omega - \\
& - \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_H - \omega_K} \omega_K + \\
& + m_0 - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} = 0.
\end{aligned} \tag{5.70}$$

Перепишем уравнение (5.70):

$$\begin{aligned}
& \frac{I}{M_H} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\kappa_{U1}^2 - \kappa_{U2}^2 - m_0}{\omega_H^2} \omega^2 + \\
& + \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - 1) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - 1)}{\omega_H - \omega_K} \omega - \\
& - \frac{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - 1) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - 1)}{\omega_H - \omega_K} \omega_K + \\
& + m_0 - (\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{ko}) = 0.
\end{aligned} \tag{5.71}$$

Решив уравнение (5.71), находим выражение текущей угловой скорости на третьем участке разгона электродвигателя:

$$\omega = \frac{\omega_{\kappa}(b - \sqrt{b^2 - 4ac}) + 2c - (\omega_{\kappa}(b + \sqrt{b^2 - 4ac}) + 2c)e^{-\frac{t}{T_3}}}{(2a\omega_{\kappa} + b - \sqrt{b^2 - 4ac})e^{-\frac{t}{T_3}} - (2a\omega_{\kappa} + b + \sqrt{b^2 - 4ac})}, \quad (5.72)$$

где

$$a = \frac{\kappa_3 - m_0}{\omega_n^2}, \quad (5.73)$$

$$b = \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{\kappa n} - \kappa_{U2}^2 \mu_{\kappa o} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_n - \omega_{\kappa}}, \quad (5.74)$$

$$c = \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{\kappa n} - \kappa_{U2}^2 \mu_{\kappa o} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2}{\omega_n - \omega_{\kappa}} \omega_{\kappa} + m_0 - \kappa_{U1}^2 \mu_{\kappa n} + \kappa_{U2}^2 \mu_{\kappa o} \quad (5.75)$$

$$T_3 = \frac{I}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \quad (5.76)$$

Приняв при  $t_3$   $\omega = \kappa\omega_n$ , находим из уравнения (5.72) время разгона электродвигателя на втором участке:

$$t_3 = T_3 \ln \frac{\kappa\omega_n(2a\omega_{\kappa} + b - \sqrt{b^2 - 4ac}) + \omega_{\kappa}(b + \sqrt{b^2 - 4ac}) + 2c}{\kappa\omega_n(2a\omega_{\kappa} + b + \sqrt{b^2 - 4ac}) + \omega_{\kappa}(b - \sqrt{b^2 - 4ac}) + 2c}. \quad (5.77)$$

### 5.3 Тепловые переходные процессы при пуске асинхронного электродвигателя в условиях соизмеримой мощности

#### 5.3.1 Общие положения.

Тепловой переходный процесс при пуске асинхронного электродвигателя скоротечен, поэтому с достаточной степенью тонности можем принять,

что он протекает адиабатически.

Запишем уравнение теплового баланса для обмотки статора:

$$C d\tau = P_0(1 + \alpha\tau)dt, \quad (5.78)$$

где  $C$  – теплоемкость обмотки, Дж/°С;

$P_0$  – потери активной мощности в обмотке статора при температуре окружающей среды, Вт;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала проводника обмотки, 1/°С;

$\tau$  – превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды, °С;

$t$  – текущее время, с.

Перепишем уравнение в следующем виде:

$$T_n \frac{d\tau}{dt} - \tau - \frac{1}{\alpha} = 0, \quad (5.79)$$

где

$$T_n = \frac{C}{\alpha P_0}. \quad (5.80)$$

Решив уравнение (5.79), находим выражение текущего превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды и выражение скорости нарастания температуры обмотки:

$$\tau = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{нач} \right) e^{\frac{t}{T_n}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (5.81)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T_n} \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{нач} \right) e^{\frac{t}{T_n}}, \quad (5.82)$$

где  $\tau_{нач}$  – начальное превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды, °C.

Потери активной мощности в обмотке при температуре окружающей среды:

$$P_0 = 3r_0 I_n^2, \quad (5.83)$$

где  $r_0$  – активное сопротивление фазы обмотки статора при температуре окружающей среды, Ом;

$I_n$  – действующее значение силы пускового электрического тока, протекающего по обмотке статора, А.

Активное сопротивление фазы обмотки статора при температуре окружающей среды:

$$r_0 = r_{20} \left( 1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 20) \right), \quad (5.84)$$

где  $r_{20}$  – активное сопротивление фазы обмотки статора при температуре, равной 20 °C;

$\vartheta_{cp}$  – температура окружающей среды, °C.

Действующее значение силы пускового электрического тока найдем как модуль комплекса действующего значения силы пускового электрического тока, найденного по Г-образной схеме замещения асинхронного электродвигателя (рис. 5.2):

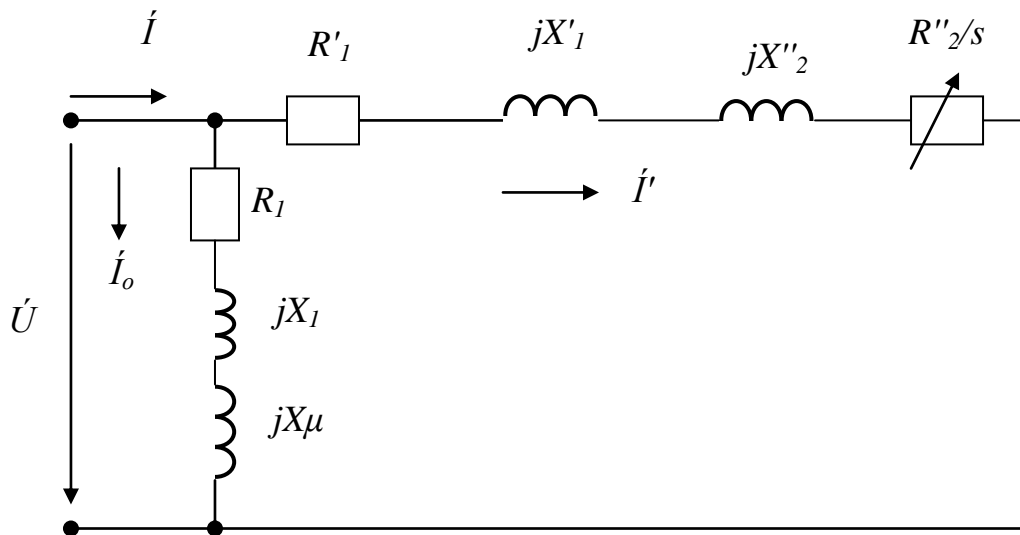


Рис. 5.2 Схема замещения одной фазы асинхронного электродвигателя.

$$\dot{i} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2, \quad (5.85)$$

где  $\dot{i}_1$  – комплекс действующего значения силы пускового электрического тока прямой симметричной составляющей,  $A$ ;

$\dot{i}_2$  – комплекс действующего значения силы пускового электрического тока обратной симметричной составляющей,  $A$ .

В свою очередь симметрические составляющие тока  $\dot{i}_1$  и  $\dot{i}_2$  определяем следующим образом:

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}_1}, \quad (5.86)$$

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_2}, \quad (5.87)$$

где  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  – комплексы действующих значений напряжений симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей,  $B$ ;

$\dot{Z}_1$  и  $\dot{Z}_2$  – комплексы полных сопротивлений цепи токам прямой и обратной симметричных составляющих, Ом.

Запишем выражение для определения симметричных составляющих напряжений прямой и обратной последовательностей:

В свою очередь комплекс эквивалентного полного сопротивления цепи фазы электродвигателя определяется по формуле:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C), \quad (5.88)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C), \quad (5.89)$$

где  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – комплексы действующих значений фазных напряжений несимметричного источника, В.

Комплексы полных сопротивлений токам прямой и обратной последовательностей в соответствии со схемой замещения запишем следующим образом:

$$Z_1 = Z_2 = \frac{Z_0 \cdot Z'}{Z_0 + Z'} \quad (5.90)$$

$$Z_0 = R_1 + jX_1 + \frac{R_m \cdot jX_m}{R_m + jX_m} \quad (5.91)$$

$$Z' = \frac{R_1' + R_2''}{S + j(X_1' + X_2'')} \quad (5.92)$$

Как видно из (5.85 - 5.93), действующее значение силы пускового электрического тока является функцией скольжения асинхронного электродвигателя и параметров схемы замещения.

Подставим (5.83) в (5.80) и получим:

$$T_n = \frac{C}{3\alpha r_0 I_n^2}. \quad (5.93)$$

Найдем максимальное превышение температуры обмотки в конце любого из трех участков разгона электродвигателя:

$$\tau_m = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{нач} \right) e^{\frac{3\alpha r_0 I_n^2 t_n}{C}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (5.94)$$

где  $\tau_m$  – максимальное превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, °C;

$t_n$  – время разгона электродвигателя на участке, с.

В соответствии с [1] обозначим величину  $I_n^2 t_n$  буквой  $\Pi$  и назовем импульсом квадрата действующего значения пускового тока, то есть:

$$\Pi = I_n^2 t_n. \quad (5.95)$$

С учетом того, что действующее значение силы пускового тока асинхронного электродвигателя есть функция времени, то более точно импульс квадрата пускового тока запишем следующим образом:

$$\Pi = \int_0^{t_n} I_n^2 dt. \quad (5.96)$$

Тогда уравнение (5.94) запишется следующим образом:

$$\tau_m = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{нач} \right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi}{C}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (5.97)$$

### 5.3.2 Тепловой переходный процесс при пуске системы «электродвигатель – рабочая машина» с независимой от скорости механической характеристикой

Перепишем выражение текущей угловой скорости электродвигателя на первом участке разгона (5.11) через скольжение электродвигателя:

$$s = 1 - \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo})} \frac{\omega_M}{\omega_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right), \quad (5.98)$$

где  $\omega_0$  – синхронная угловая скорость электродвигателя, *рад/с*.

Максимальное превышение температуры обмотки статора в конце первого участка разгона электродвигателя:

$$\tau_{m_1} = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{нач}\right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_1}{C}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (5.99)$$

Импульс квадрата действующего значения пускового электрического тока на первом участке:

$$\Pi_1 = \int_0^{t_1} I_{n_1}^2 dt. \quad (5.100)$$

где  $I_{n_1}$  – действующее значение пускового электрического тока на первом участке, *А*.

Действующее значение пускового электрического тока на первом участке во времени определяем по (5.85 – 5.98).

Скорость нарастания температуры обмотки статора на первом участке разгона электродвигателя:

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \frac{1}{T_H} \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{нач} \right) e^{\frac{1}{T_H}}. \quad (5.101)$$

Перепишем выражение текущей угловой скорости электродвигателя на втором участке разгона (5.18) через скольжение электродвигателя:

$$s = 1 - \frac{\omega_M}{\omega_0} + \frac{\kappa_3 - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{mo}}{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - \mu_{mo})} \cdot \frac{\omega_k - \omega_M}{\omega_0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (5.102)$$

Максимальное превышение температуры обмотки статора в конце второго участка разгона электродвигателя:

$$\tau_{m_2} = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{m_1} \right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_2}{C}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (5.103)$$

Импульс квадрата действующего значения пускового электрического тока на втором участке:

$$\Pi_2 = \int_0^{t_2} I_{n_2}^2 dt, \quad (5.104)$$

где  $I_{n_2}$  – действующее значение пускового электрического тока на втором участке, А.

Действующее значение пускового электрического тока на втором участке во времени определяем по (5.85 - 5.102).

Скорость нарастания температуры обмотки статора на втором участке разгона электродвигателя:

$$\frac{d\tau_2}{dt} = \frac{1}{T_H} \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{m_1} \right) e^{\frac{1}{T_H}}. \quad (5.105)$$

Перепишем выражение текущей угловой скорости электродвигателя на третьем участке разгона (5.25) через скольжение электродвигателя:

$$s = 1 - \frac{\omega_k}{\omega_0} + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} + \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 - 1} \cdot \frac{\omega_n - \omega_k}{\omega_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}}\right). \quad (5.106)$$

Максимальное превышение температуры обмотки статора в конце третьего участка разгона электродвигателя:

$$\tau_{m_3} = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{m_2}\right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_3}{C}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (5.107)$$

Импульс квадрата действующего значения пускового электрического тока на третьем участке:

$$\Pi_3 = \int_0^{t_3} I_{n_3}^2 dt, \quad (5.108)$$

где  $I_{n_3}$  – действующее значение пускового электрического тока на третьем участке, А.

Действующее значение пускового электрического тока на третьем участке во времени определяем по (5.85 - 5.106).

Скорость нарастания температуры обмотки статора на третьем участке разгона электродвигателя:

$$\frac{d\tau_3}{dt} = \frac{1}{T_H} \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{m_2}\right) e^{\frac{1}{T_H}}. \quad (5.109)$$

#### 5.4 Анализ влияния параметров системы «электродвигатель - рабочая машина» с независимой от скорости механической характеристикой на электромеханические и тепловые переходные процессы при пуске двигателя

Исследуем зависимость электромеханической постоянной времени системы  $T$ , времени пуска электродвигателя  $t$ , скольжения электродвигателя  $s$ , действующего значения силы пускового электрического тока  $I_n$ , импульса квадрата действующего значения пускового электрического тока  $\Pi$ , максимального превышения температуры обмотки при пуске  $\tau_m$ , скорости нарастания температуры обмотки  $d\tau/dt$  в функции момента инерции системы  $I$ , технических данных электродвигателя:  $M_n, \omega_m, \omega_k, \omega_n, M_n, M_m, M_k$ ; технических данных рабочей машины:  $\omega_n, M_{сн}, M_0$ ; кратности симметричных составляющих приложенного к электродвигателю напряжения  $\kappa_{U1}$  и  $\kappa_{U2}$ , кратности загрузки рабочей машины  $\kappa_3$ .

Количественный анализ проведем на примере электродвигателя типоразмера 4A100S2Y3 со следующими каталожными данными:

$$\begin{aligned}
 P_{2n} &= 4 \text{ кВт}; & \eta_n &= 0,865; & \cos\varphi_n &= 0,89; & R'_1 &= 1,509 \text{ Ом}; \\
 x'_1 &= 1,537 \text{ Ом}; & R''_2 &= 1,006 \text{ Ом}; & x''_2 &= 2,767 \text{ Ом}; & R_1 &= 1,485 \text{ Ом}; \\
 x_1 &= 1,513 \text{ Ом}; & x_\mu &= 95 \text{ Ом}; & U_n &= 220 \text{ В}; & s_n &= 0,033; \\
 s_k &= 0,28; & s_m &= 0,8; & \mu_{mn} &= 2,0; & \mu_{mn} &= 1,6; & \mu_{kn} &= 2,5.
 \end{aligned}$$

Анализ выражения электромеханической постоянной времени  $T_1$  на первом участке разгона электродвигателя (5.12) показывает, что она определяется как параметрами двигателя:  $M_n, \omega_m, \mu_{mn}, \mu_{mn}$ , так и параметром системы «электродвигатель-рабочая машина»  $I$ , а так же кратностью симметричных составляющих приложенного к двигателю напряжения  $\kappa_{U1}$  и  $\kappa_{U2}$ .

Исследуем количественно зависимости электромеханической постоянной времени  $T_1$  и времени разгона электродвигателя на первом участке в функции параметра системы  $I/M_n$  и кратности симметричных составляющих приложенного напряжения  $\kappa_{U1}$  и  $\kappa_{U2}$  при заданном коэффициенте загрузки рабочей машины  $\kappa_3$ .

Определяем номинальный момент, развиваемый электродвигателем, а также минимальную угловую скорость:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n}; \quad (5.110)$$

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n); \quad (5.111)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}; \quad (5.112)$$

$$\omega_m = \omega_0(1 - s_m); \quad (5.113)$$

где  $n_0$  – синхронная скорость вращения вала электродвигателя, об/мин.

Подставив значения физических величин, находим:

$$\omega_0 = 314 \text{ рад/с}; \quad \omega_n = 304 \text{ рад/с}; \quad \omega_m = 62,8 \text{ рад/с}; \quad 13,17 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Принимаем значения параметра  $I/M_n$  в пределах от 0,005 до 0,03 с<sup>2</sup> значения коэффициента приложенного напряжения  $\kappa_{U1}$  в пределах от 1,15 до 0,8;  $\kappa_{U2} = 0$ , значение коэффициента загрузки рабочей машины  $\kappa_3$  принимаем равным единице. Рассчитываем значения электромеханической постоянной времени  $T_1$  по (5.12) и значения времени разгона электродвигателя на первом участке  $t_1$  по (5.13). Результаты расчетов заносим в таблицу 5.1 и представляем графически (рис. 5.3, рис. 5.4).

Таблица 5.1

$\frac{I}{M_H}, c^2$	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	$\kappa_{U1}$	$\kappa_3$
$T_1, c$	1,23	2,45	3,68	4,9	6,13	7,35	0,8	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	0,8	1
$t_1, c$	3	6	9	12	15	18	0,8	1
$T_1, c$	1,1	2,2	3,3	4,3	5,4	6,5	0,85	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0,85	1
$t_1, c$	1,2	2,3	3,5	4,5	5,8	6,8	0,85	1
$T_1, c$	0,97	1,97	2,91	3,88	4,85	5,82	0,9	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,9	1
$t_1, c$	0,72	1,44	2,15	2,87	3,59	4,3	0,9	1
$T_1, c$	0,87	1,74	2,61	3,48	4,35	5,22	0,95	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,95	1
$t_1, c$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,95	1
$T_1, c$	0,79	1,57	2,37	3,16	3,95	4,74	1	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	1	1
$t_1, c$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	1	1
$T_1, c$	0,71	1,42	2,13	2,84	3,55	4,26	1,05	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	1,05	1
$t_1, c$	0,33	,66	,99	1,32	1,65	1,98	1,05	1

Продолжение таблицы 5.1

$T_1, c$	0,65	1,3	1,95	2,6	3,25	3,9	1,1	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	1,1	1
$t_1, c$	0,27	0,54	0,81	1,08	1,35	1,62	1,1	1
$T_1, c$	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	1,15	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	1,15	1
$t_1, c$	0,23	0,46	0,69	,92	1,15	1,38	1,15	1

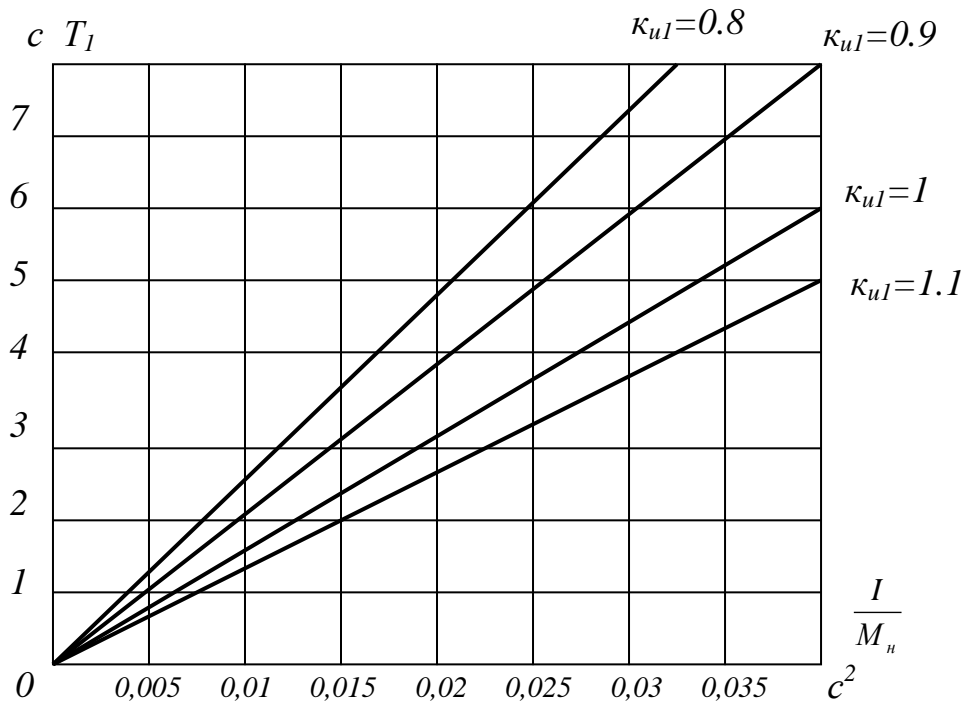


Рис. 5.3 Зависимость электромеханической постоянной времени  $T_1$  в функции  $I/M_n$  при  $\kappa_{U2} = 0, \kappa_3 = 1$ .

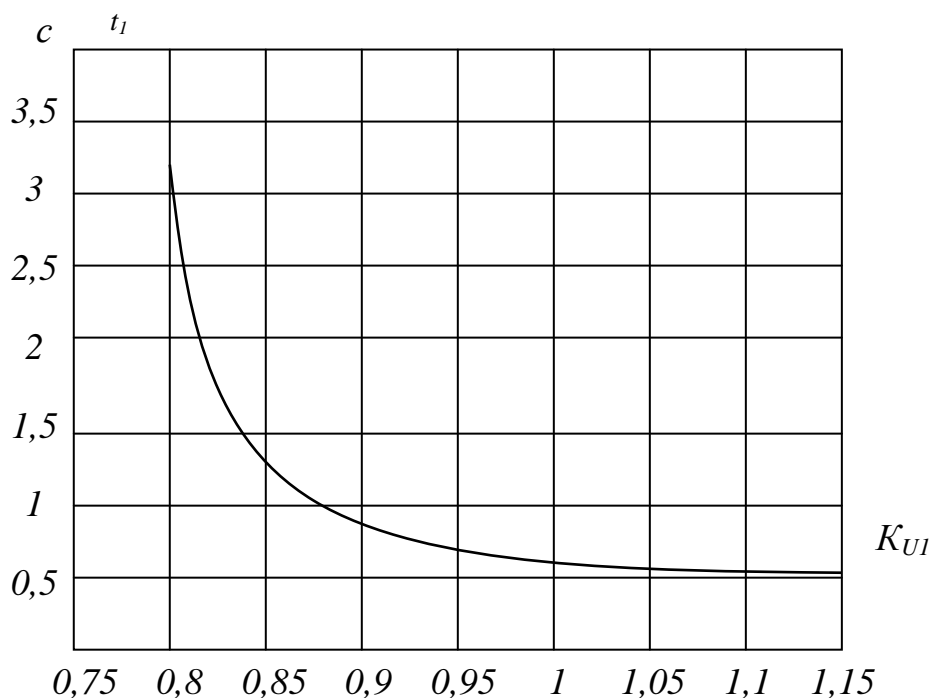


Рис. 5.4 Зависимость времени разбега электродвигателя на первом участке в функции  $\kappa_{U1}$  при  $I/M_n = 0,005$ ,  $\kappa_{U2} = 0$  и  $\kappa_3 = 1$ .

Рассчитываем значения электромеханической постоянной времени  $T_2$  по (5.19) и значения времени разгона электродвигателя на втором участке  $t_2$  по (5.20).

Принимаем значения параметра  $I/M_n$  в пределах от  $0,005$  до  $0,03 \text{ с}^2$ , значения коэффициентов симметричных составляющих приложенного напряжения  $\kappa_{U1}$  в пределах от  $1,15$  до  $0,8$ ;  $\kappa_{U2} = 0$ , значение коэффициента загрузки рабочей машины  $\kappa_3$  принимаем равным единице. Результаты расчетов заносим в таблицу 5.2 и представляем графически (рис. 5.5, рис. 5.6).

Таблица 5.2

$\frac{I}{M_H}, c^2$	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	$K_{U1}$	$\kappa_3$
$T_2, c$	1,42	2,84	4,26	5,68	7,1	8,52	0,8	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	0,8	1
$t_2, c$	4,6	9,2	13,8	18,4	23	27,6	0,8	1
$T_2, c$	1,25	2,5	3,75	5,0	6,25	7,5	0,85	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	0,85	1
$t_2, c$	2,05	4,1	6,15	8,2	10,25	12,3	0,85	1
$T_2, c$	1,12	2,24	3,36	4,48	5,6	6,72	0,9	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	0,9	1
$t_2, c$	1,39	2,78	4,17	6,95	9,73	12,51	0,9	1
$T_2, c$	1	2	3	4	5	6	0,95	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	0,95	1
$t_2, c$	1,04	2,08	3,12	4,16	5,2	6,24	0,95	1
$T_2, c$	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	1	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	1	1
$t_2, c$	0,83	1,66	2,49	3,32	4,15	4,98	1	1
$T_2, c$	0,83	1,65	2,48	3,31	4,14	4,97	1,05	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	1,05	1
$t_2, c$	0,69	1,37	2,06	2,75	3,44	4,13	1,05	1

Продолжение таблицы 5.2

$T_2, c$	0,75	1,5	2,25	3	3,75	4,5	1,1	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	1,1	1
$t_2, c$	0,58	1,16	1,74	2,32	2,9	3,48	1,1	1
$T_2, c$	0,69	1,38	2,06	2,75	3,44	4,13	1,15	1
$\ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_3}$	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	1,15	1
$t_2, c$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,15	1

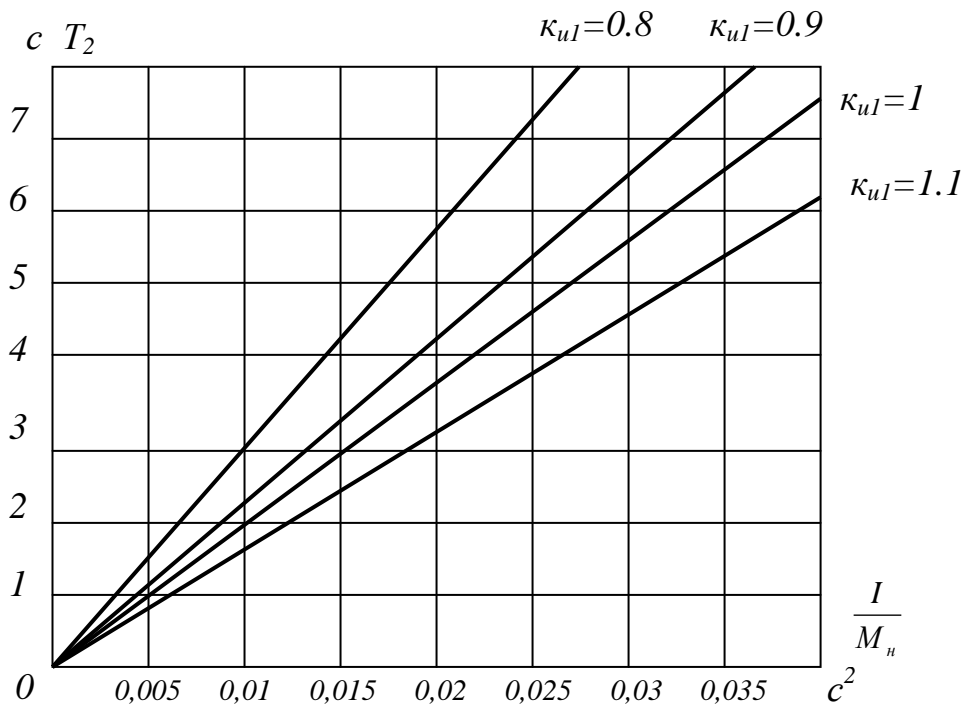


Рис. 5.5 Зависимость электромеханической постоянной времени  $T_2$  в функции  $I/M_n$  при  $\kappa_{U2} = 0, \kappa_3 = 1$ .

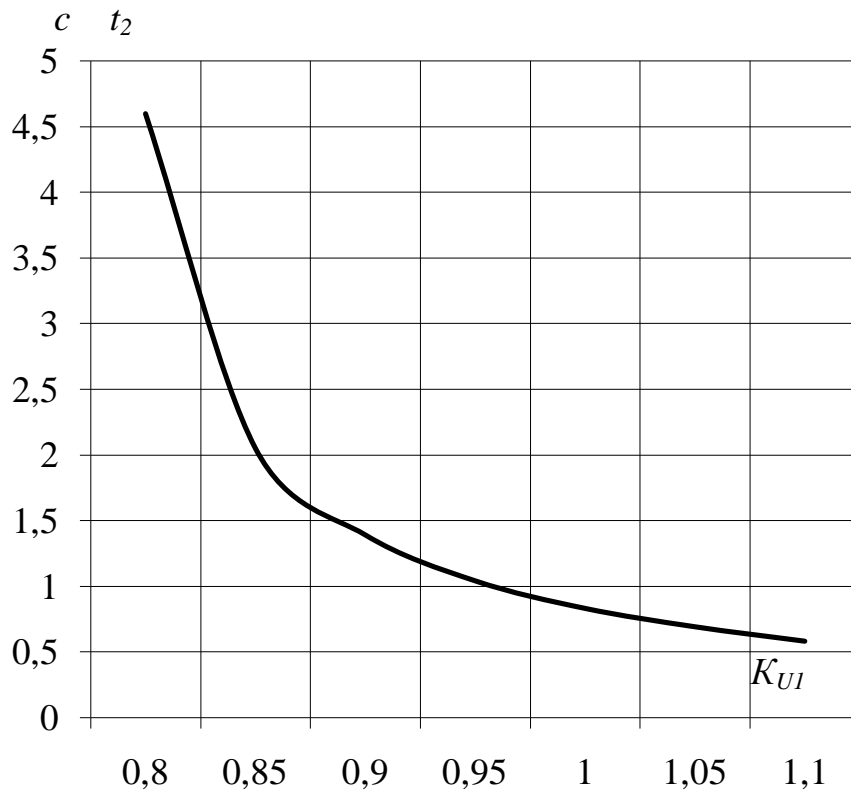


Рис. 5.6 Зависимость времени разбега электродвигателя на втором участке в функции  $\kappa_{U1}$  при  $I/M_n = 0,005$ ,  $\kappa_{U2} = 0$  и  $\kappa_3 = 1$ .

Рассчитываем значения электромеханической постоянной времени  $T_3$  по (5.26) и значения времени разгона электродвигателя на втором участке  $t_3$  по (5.27).

Принимаем значения параметра  $I/M_n$  в пределах от  $0,005$  до  $0,03 \text{ с}^2$ , значения коэффициентов симметричных составляющих приложенного напряжения  $\kappa_{U1}$  в пределах от  $1,15$  до  $0,8$ ;  $\kappa_{U2} = 0$ , значение коэффициента загрузки рабочей машины  $\kappa_3$  принимаем равным единице, а  $\kappa = 0,9$ . Результаты расчетов заносим в таблицу 5.3 и представляем графически (рис. 5.7, рис. 5.8).

Таблица 5.3

$\frac{I}{M_H}, c^2$	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	$\kappa_{U1}$	$\kappa_3$
$T_3, c$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	0,8	1
$\ln \frac{(\kappa\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - 1)}{(\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - \kappa_3)}$	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	0,8	1
$t_3, c$	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	0,8	1
$T_3, c$	0,36	0,72	1,08	1,44	1,8	2,16	0,85	1
$\ln \frac{(\kappa\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - 1)}{(\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - \kappa_3)}$	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	0,85	1
$t_3, c$	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	0,85	1
$T_3, c$	0,32	0,64	0,96	1,28	1,6	1,92	0,9	1
$\ln \frac{(\kappa\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - 1)}{(\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - \kappa_3)}$	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	0,9	1
$t_3, c$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	0,9	1
$T_3, c$	0,29	0,58	0,87	1,16	1,45	1,74	0,95	1
$\ln \frac{(\kappa\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - 1)}{(\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - \kappa_3)}$	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	0,95	1
$t_3, c$	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	0,95	1
$T_3, c$	0,26	0,52	0,78	1,04	1,3	1,56	1	1
$\ln \frac{(\kappa\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - 1)}{(\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - \kappa_3)}$	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	1	1
$t_3, c$	0,24	0,48	0,72	0,96	1,2	1,44	1	1
$T_3, c$	0,24	0,48	0,71	0,94	1,2	1,41	1,05	1
$\ln \frac{(\kappa\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - 1)}{(\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - \kappa_3)}$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,05	1
$t_3, c$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,05	1

Продолжение таблицы 5.3

$T_3, c$	0,22	0,43	0,65	0,86	1,08	1,29	1,1	1
$\ln \frac{(\kappa\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - 1)}{(\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - \kappa_3)}$	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	1,1	1
$t_3, c$	0,17	0,34	0,51	0,68	0,85	1,02	1,1	1
$T_3, c$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,15	1
$\ln \frac{(\kappa\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - 1)}{(\omega_H - \omega_K)(\kappa_{U1}^2\mu_{Kn} - \kappa_3)}$	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	1,15	1
$t_3, c$	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	1,15	1

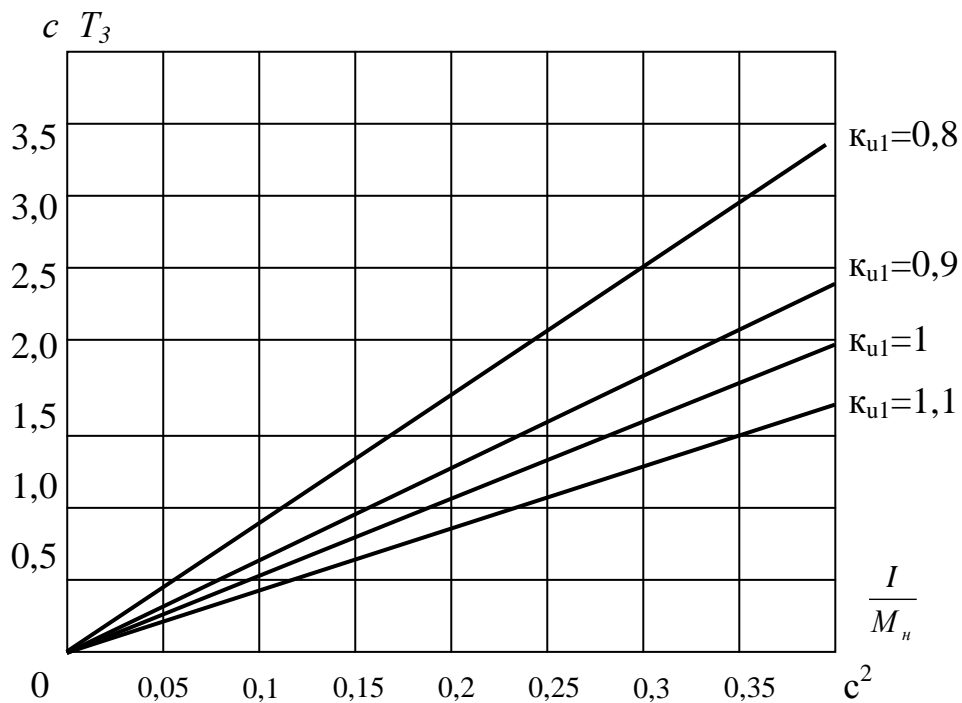


Рис. 5.7 – зависимость электромеханической постоянной времени  $T_3$  в функции  $I/M_H$  при  $\kappa_{U2} = 0$ ,  $\kappa = 0,9$ ,  $\kappa_3 = 1$ .

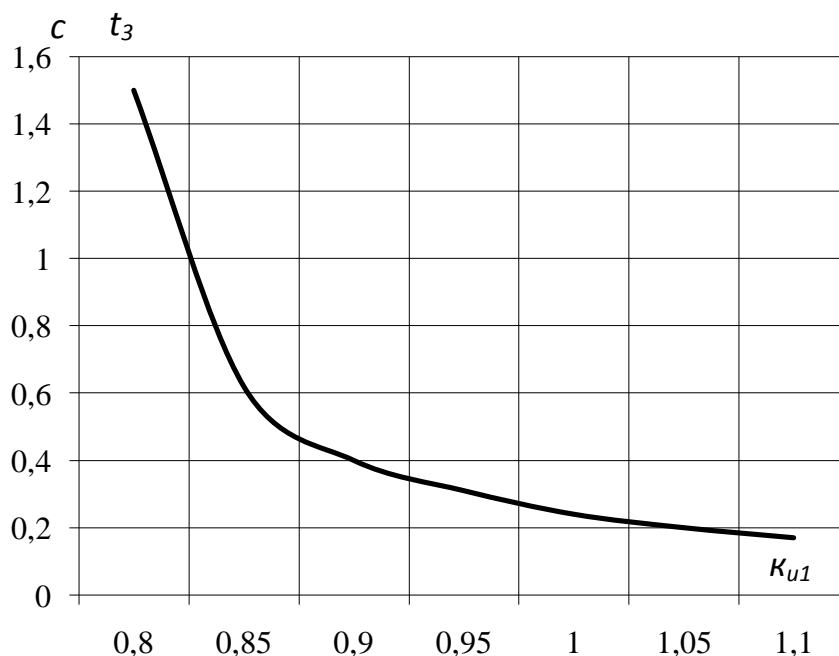


Рис. 5.8 Зависимость времени разбега электродвигателя на третьем участке в функции  $\kappa_{U1}$  при  $I/M_n = 0,005$ ,  $\kappa_{U2} = 0$ ,  $\kappa = 0,9$  и  $\kappa_3 = 1$ .

### 5.5 Тепловой износ изоляции в послепусковой период

Учитывая сравнительную скоротечность процесса нагрева обмотки при пуске, можно принять, что обмотка достигает максимального превышения температуры в момент времени  $t = 0$ . В послепусковой период охлаждения обмотки до номинального значения скорость изменения температуры будет небольшой в соответствии с кривой охлаждения:

$$\tau = \tau_n \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \tau_m e^{-\frac{t}{T}}, \quad (5.114)$$

где  $\tau$  – текущее превышение температуры обмотки, °C;

$t$  – текущее время, с;

$\tau_n$  – номинальное превышение температуры обмотки, °C;

$T$  – постоянная времени нагрева электродвигателя, с;

$\tau_m$  – максимальное превышение температуры обмотки в конце пуска, °C.

Скорость теплового износа изоляции в послепусковой период описывается выражением:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B \left( \frac{1}{\Theta_n} \frac{1}{\tau_n \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_m e^{-\frac{t}{T}} + \vartheta_{cp} + 273} \right)}, \quad (5.115)$$

где  $\varepsilon$  – текущая скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

$\varepsilon_n$  – номинальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

$B$  – параметр, характеризующий класс изоляции, K;

$T$  – постоянная времени нагрева электродвигателя, с;

$\Theta_n$  – абсолютная номинальная температура изоляции, K;

$\vartheta_{cp}$  – температура окружающей среды, °C.

Представим графики остывания обмотки электродвигателя (рис.5.9) и скорости теплового износа изоляции в послепусковой период (рис.5.10 )

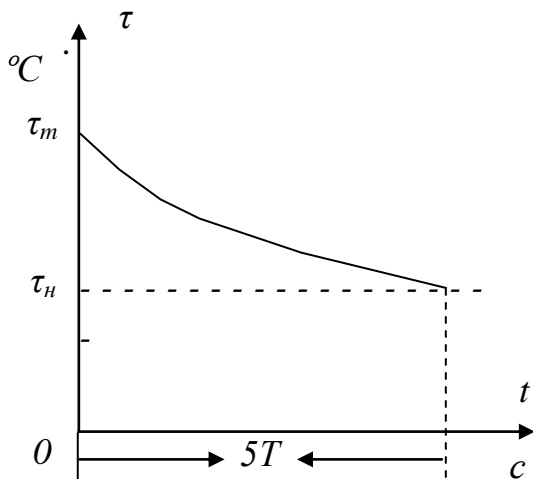


Рис. 5.9

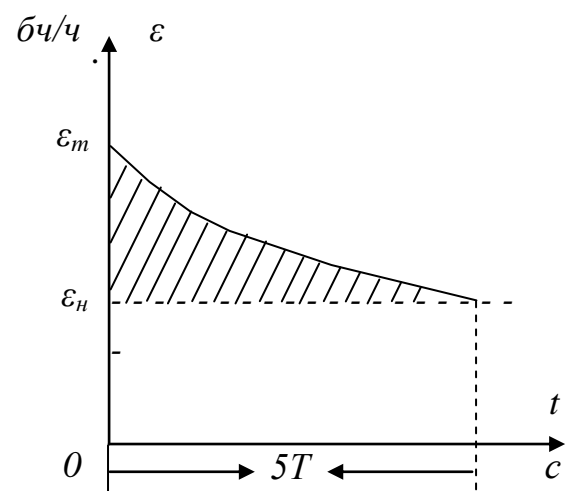


Рис. 5.10

Дополнительный тепловой износ изоляции в послепусковой период происходит на интервале времени от нуля до  $5T$  и может быть найден по выражению:

$$E_{\text{дон}} = \int_0^{5T} \varepsilon dt - 5T\varepsilon_{\mu}, \quad (5.116)$$

где  $\varepsilon$  – описывается (5.115).

Как видно из (5.115) и (5.116), дополнительный тепловой износ изоляции обмотки  $E_{\text{дон}}$  зависит от значений постоянной времени нагрева электродвигателя  $T$ , максимального превышения температуры обмотки  $\tau_m$  и температуры окружающей среды, то есть:

$$E_{\text{дон}} = f(T, \tau_m, \vartheta_{\text{ср}}). \quad (5.117)$$

Исследуем зависимость дополнительного теплового износа изоляции обмотки в функции максимального превышения температуры обмотки при заданном значении постоянной времени нагрева электродвигателя типоразмера 4A100S2Y3, для которого  $T = 1840$  с. Принимаем  $\vartheta_{\text{ср}} = 40^\circ\text{C}$ . Изоляция класса  $B$  указанного электродвигателя характеризуется следующими параметрами:  $B = 10200$  К,  $Q_n = 403$  К,  $\tau_n = 90$  °С,  $\varepsilon_n = 1$  бч/ч. Разбиваем зависимость  $\varepsilon = f(t)$  на 50 участков. Принимаем длительность каждого участка  $t_i = 184$  с. Тогда  $\frac{t_i}{T} = 0,1$ . Введём обозначение:  $e^{-\frac{t}{T}} = \nu$ . Находим значение  $\nu = 0,9$ . Тогда превышение температуры обмотки на  $i$ -ом участке равно:

$$t_i = t_n(1 - \nu) + t_{i-1}\nu. \quad (5.118)$$

Для первого участка:

$$t_1 = t_n(1 - \epsilon) + t_m\epsilon. \quad (5.119)$$

Для второго участка:

$$t_2 = t_n(1 - \epsilon) + t_1\epsilon. \quad (5.120)$$

И так далее.

Приняв с определёнными допущениями на каждом участке  $t_i = const$ , можем рассчитать скорость теплового износа изоляции на каждом из участков  $\epsilon_i$  по выражению:

$$\epsilon_i = \epsilon_n e^{B\left(\frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{t_i + \vartheta_{cp} + 273}\right)}, \quad (5.121)$$

Для указанного электродвигателя:

$$t_i = 9 + 0,9t_{i-1}. \quad (5.122)$$

Количественный анализ проведем на примере электродвигателя типоразмера 4A100S2Y3 со следующими каталожными данными:

$$\begin{array}{llll} P_{2n} = 4 \text{ кВт}; & \eta_n = 0,865; & \cos\varphi_n = 0,89; & R'_1 = 1,509 \text{ Ом}; \\ x'_1 = 1,537 \text{ Ом}; & R''_2 = 1,006 \text{ Ом}; & x''_2 = 2,767 \text{ Ом}; & R_1 = 1,485 \text{ Ом}; \\ x_1 = 1,513 \text{ Ом}; & x_\mu = 95 \text{ Ом}; & U_n = 220 \text{ В}; & s_n = 0,033; \\ s_k = 0,28; & s_m = 0,8; & \mu_{mn} = 2,0; & \mu_{mn} = 1,6; \\ \mu_{kn} = 2,5; & r_{1(20)} = 1,19 \text{ Ом}; & G_m = 3,78 \text{ кг}; & \frac{I}{M_n} = 0,015. \end{array}$$

По всей видимости, дополнительный тепловой износ изоляции зависит от эквивалентной постоянной времени нагрева электродвигателя, максимального превышения температуры в конце запуска, температуры окружающей среды.

Зависимости дополнительного теплового износа изоляции исследовано для электродвигателя типоразмера 4A100S2Y3 в функции отношения момента инерции системы «электродвигатель – рабочая машина» к номинальному моменту электродвигателя и кратности приложенного напряжения (рисунок 5.11).

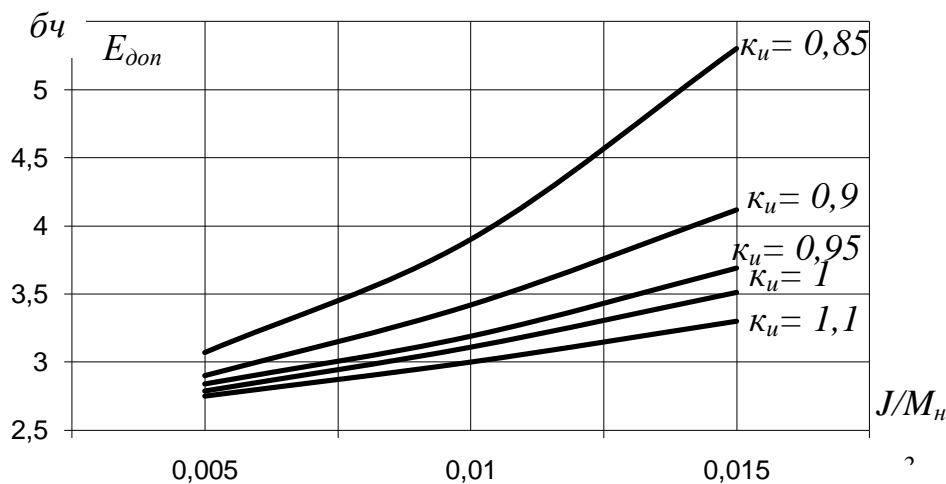


Рис. 5.11 Зависимость дополнительного теплового износа изоляции в функции отношения момента инерции системы «электродвигатель – рабочая машина» к номинальному моменту электродвигателя и кратности приложенного напряжения

Исследована также зависимость дополнительного теплового износа изоляции в функции импульса квадрата пускового тока (рисунок 5.12).

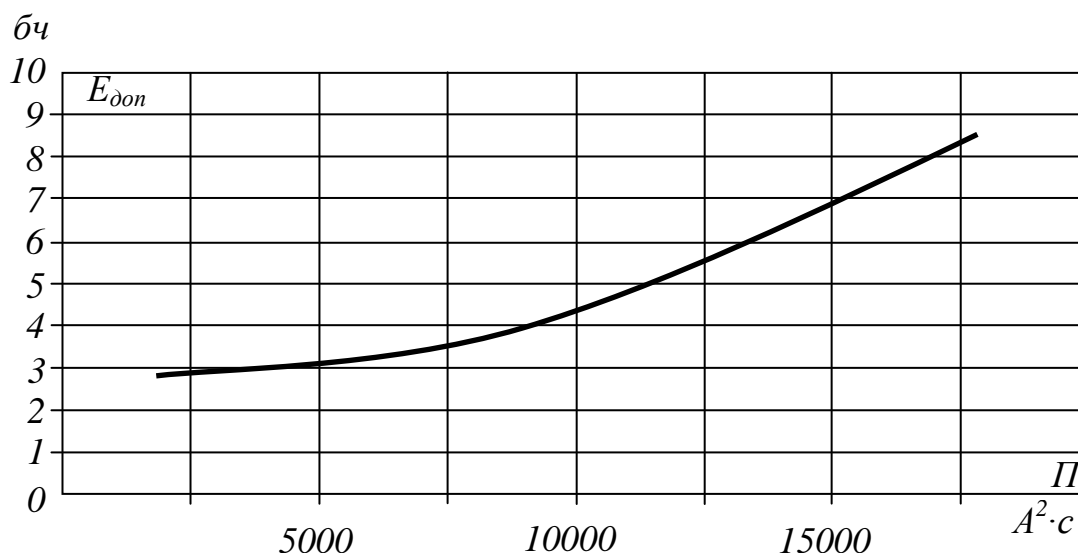


Рис. 5.12 Зависимость дополнительного теплового износа изоляции в функции импульса квадрата пускового тока

Анализ полученных результатов показывает, что:

1. В качестве критерия оценки затрат ресурса изоляции электродвигателя в послепусковой период можно принять дополнительный тепловой износ изоляции;
2. Дополнительный тепловой износ изоляции в послепусковой период является функцией отношения момента инерции системы «электродвигатель – рабочая машина» к номинальному моменту и кратности приложенного напряжения;
3. В качестве диагностического параметра режима работы электродвигателя в послепусковой период является импульс квадрата пускового тока.

## **РАЗДЕЛ 6. РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВОДА ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ РАБОЧИХ МАШИН**

### **6.1 Общие вопросы<sup>1</sup>**

В агропромышленном комплексе примером параллельно работающих рабочих машин являются насосные агрегаты водоподачи в населенных пунктах, насосные агрегаты в системах отопления, насосные агрегаты в канализационных системах, насосные агрегаты в оросительных системах и другие.

При работе насосных агрегатов на общую сеть загрузка их с течением времени непрерывно изменяется и поэтому электродвигатели привода этих насосных агрегатов всегда загружены не на номинальную мощность, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

Поэтому определение оптимального количества одновременно работающих насосных агрегатов с позиции потерь активной мощности в электродвигателях является актуальной научной задачей.

### **6.2 Потери активной мощности в асинхронных электродвигателях привода параллельно работающих насосных агрегатов**

Исследуем потери активной мощности в асинхронных электродвигателях привода рабочих машин при параллельной их работе и разной температуре окружающей среды ( $\vartheta_{cp} = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 50^{\circ}\text{C}$ ).

Для этого рассчитаем зависимости коэффициента потерь активной

---

<sup>1</sup> - работа выполнена совместно с Островским А.В.

мощности  $\kappa_n$  в функции активной мощности на валу  $P_2$  при работе одного агрегата, двух и трех на общую нагрузку. Например, при параллельной работе на общую сеть трех насосных агрегатов с электродвигателями типоразмера 4A100S2Y3 и температурой окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$ . Результаты расчета сводим в таблицы 6.1, 6.2, 6.3.

В таблице 6.1 приведены расчеты зависимости коэффициента потерь  $\kappa_n$  в функции суммарной активной мощности на валу  $P_2$  при работе одного агрегата и температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$ .

Таблица 6.1 - Результаты расчетов  $\kappa_n = f(P_2)$  при  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$  и одном работающем насосном агрегате

$P_2,$ $Вт$	596	1268	1919	2535	3124	3683	4218	4713	5599
$\kappa_n$	0,473	0,242	0,182	0,161	0,158	0,163	0,178	0,198	0,272

В таблице 6.2 приведены расчеты зависимости коэффициента потерь  $\kappa_n$  в двух параллельно работающих электродвигателях в функции суммарной активной мощности на валу  $P_2$  этих электродвигателей привода насосных агрегатов при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$ .

Таблица 6.2 - Результаты расчетов  $\kappa_n = f(P_2)$  при  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$  и двух параллельно работающих насосных агрегатах

$P_2,$ $Вт$	1250	1350	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
$\kappa_n$	0,47	0,44	0,32	0,258	0,212	0,189	0,177	0,168	0,162
$P_2,$ $Вт$	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	-	-
$\kappa_n$	0,158	0,16	0,172	0,189	0,218	0,26	0,332	-	-

В таблице 6.3 приведены расчеты зависимости коэффициента потерь  $\kappa_n$  в трех параллельно работающих электродвигателях в функции суммарной активной мощности на валу  $P_2$  этих электродвигателей привода насосных агрегатов при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$ .

Таблица 6.3 - Результаты расчетов  $\kappa_n = f(P_2)$  при  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$  и трех параллельно работающих насосных агрегатах

$P_2,$ $\text{Вт}$	2000	2500	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
$\kappa_n$	0,47	0,39	0,32	0,238	0,195	0,177	0,167	0,16	0,159
$P_2,$ $\text{Вт}$	10000	11000	12000	15000	-	-	-	-	-
$\kappa_n$	0,16	0,163	0,172	0,219	-	-	-	-	-

На основе таблиц 6.1, 6.2 и 6.3 строим зависимости коэффициента потерь  $\kappa_n$  в функции суммарной активной мощности  $P_2$  на валу параллельно работающих электродвигателей при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$ .

Эти зависимости представлены кривыми 1, 2, 3, которые соответствуют одному, двум и трем параллельно работающим насосным агрегатам (рисунок 6.1).

Так же рассчитаем зависимости коэффициента потерь активной мощности  $\kappa_n$  в функции активной мощности на валу  $P_2$  при параллельной работе на общую сеть одного, двух, трех насосных агрегатов с электродвигателями типоразмера 4A100S2Y3 и температурой окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 30^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 40^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 50^\circ\text{C}$ . Результаты расчета сводим в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 - Результаты расчетов  $\kappa_n = f(P_2)$  и  $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 30^\circ\text{C}$ ,  
 $\vartheta_{cp} = 40^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 50^\circ\text{C}$  при параллельной работе одного,  
двух и трех насосных агрегатов

1 двигатель		2 двигателя		3 двигателя	
$\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$					
$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$	$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$	$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$
1	2	3	4	5	6
596	0,474	1250	0,47	2000	0,47
1268	0,243	1400	0,43	3000	0,323
1919	0,183	2000	0,324	4000	0,24
2535	0,163	3000	0,22	5000	0,2
3124	0,161	4000	0,18	6000	0,179
3683	0,167	4350	0,172	7000	0,17
4218	0,182	5000	0,165	7500	0,166
4713	0,203	6000	0,162	8000	0,163
5599	0,278	7000	0,166	9000	0,161
6009	0,341	8000	0,178	10000	0,162
$\vartheta_{cp} = 30^\circ\text{C}$					
$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$	$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$	$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$
1	2	3	4	5	6
596	0,474	1250	0,47	2000	0,47
1268	0,244	2000	0,328	3000	0,327
1919	0,185	3000	0,217	4000	0,24
2535	0,166	4000	0,18	4500	0,216
3124	0,164	5000	0,167	5000	0,199
3683	0,170	6000	0,162	6000	0,179
4218	0,186	7000	0,168	7000	0,168
4713	0,208	8000	0,18	8000	0,165
5599	0,284	9000	0,202	9000	0,165

6009	0,347	10000	0,23	10000	0,168
$\vartheta_{cp} = 40^{\circ}\text{C}$					
$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$	$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$	$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$
1	2	3	4	5	6
596	0,475	1250	0,47	2000	0,47
1268	0,246	1500	0,43	3000	0,329
1919	0,187	2000	0,325	4000	0,251
2535	0,168	3000	0,22	5000	0,2
3124	0,167	4000	0,181	6000	0,178
3683	0,174	5000	0,169	6500	0,172
4218	0,191	6000	0,166	7000	0,168
4713	0,213	7000	0,169	8000	0,167
5599	0,290	8000	0,182	9000	0,168
6009	0,353	9000	0,202	10000	0,17
$\vartheta_{cp} = 50^{\circ}\text{C}$					
$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$	$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$	$P_2, \text{Bm}$	$\kappa_n$
1	2	3	4	5	6
596	0,476	1250	0,47	2000	0,47
1268	0,247	2000	0,33	3000	0,33
1919	0,189	2500	0,25	4000	0,248
2535	0,170	3000	0,21	5000	0,2
3124	0,170	4000	0,183	6000	0,179
3683	0,177	5000	0,172	6500	0,173
4218	0,195	6000	0,17	7000	0,17
4713	0,218	7000	0,173	8000	0,169
5599	0,296	8000	0,186	9000	0,17
6009	0,359	9000	0,206	10000	0,172

На основе таблицы 6.4 строим зависимости коэффициента потерь  $\kappa_n$  в функции суммарной активной мощности  $P_2$  на валу параллельно работаю-

щих электродвигателей при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_{cp} = 50^{\circ}\text{C}$  (рисунок 6.2, 6.3, 6.4, 6.5).

Зависимости показывают, при какой суммарной активной мощности на валах параллельно работающих насосных агрегатов необходимо менять число параллельно работающих насосных агрегатов с позиции обеспечения минимальных потерь активной мощности в работающих электродвигателях.

Например, если суммарная активная мощность растет, то есть растет расход подаваемой жидкости, то в точке А необходимо включать второй агрегат, а в точке В - третий. И наоборот, если расход жидкости падает, то в точке В необходимо отключить третий агрегат, а в точке А - второй.

При увеличении температуры окружающей среды  $\vartheta_{cp}$  точки включения и отключения двигателей сдвигаются влево, запуск и остановка происходит при меньшем значении суммарной активной мощности  $P_2$ .

Таким образом, получены закономерности, позволяющие обеспечить энергосберегающие режимы работы насосных агрегатов.

На основании проведенных исследований разработан способ управления оптимальным количеством параллельно работающих электродвигателей с позиции минимизации потерь активной мощности в электродвигателях привода параллельно работающих насосных агрегатов.

Алгоритм управления следующий:

1. Через заданные интервалы времени  $t_i$  измеряются скольжения работающих асинхронных электродвигателей  $s_1$  и  $s_2$ .
2. По полученным значениям скольжения определяются активные мощности на валах электродвигателей:

$$P_2^{(1)} = R_2 \frac{1 - s_1}{s_1} I_1'^2, \quad (6.1)$$

$$P_2^{(2)} = R_2'' \frac{1 - s_2}{s_2} I_2'^2, \quad (6.2)$$

где  $R_2''$  – параметр схемы замещения асинхронных электродвигателей, Ом;

$s_1$  и  $s_2$  – скольжение первого и второго электродвигателя;

$I_1'$  и  $I_2'$  – действующие значения сил электрических токов в ветвях схемы замещения электродвигателей, А;

$P_2^{(1)}$  и  $P_2^{(2)}$  – активная мощность на валах первого и второго электродвигателей, Вт.

Действующие значения сил электрических токов в ветвях схемы замещения электродвигателя:

$$I_1' = \frac{U}{\sqrt{(R_1' + R_2''/s_1)^2 + (x_1' + x_2'')^2}}, \quad (6.3)$$

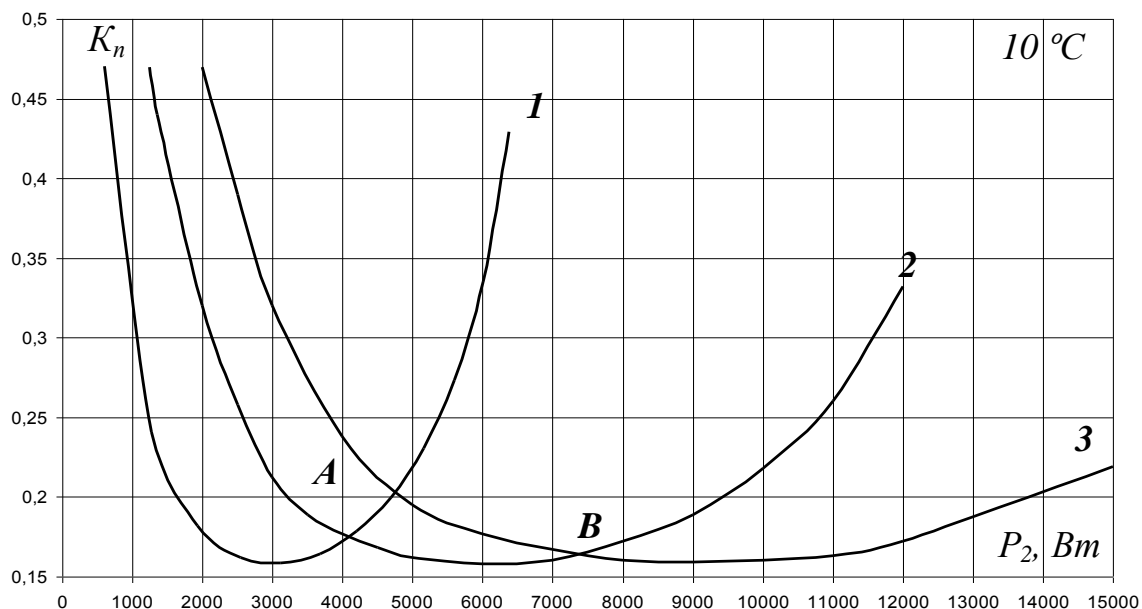
$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{(R_1' + R_2''/s_2)^2 + (x_1' + x_2'')^2}}, \quad (6.4)$$

где  $U$  – фазное напряжение на зажимах электродвигателя, В;

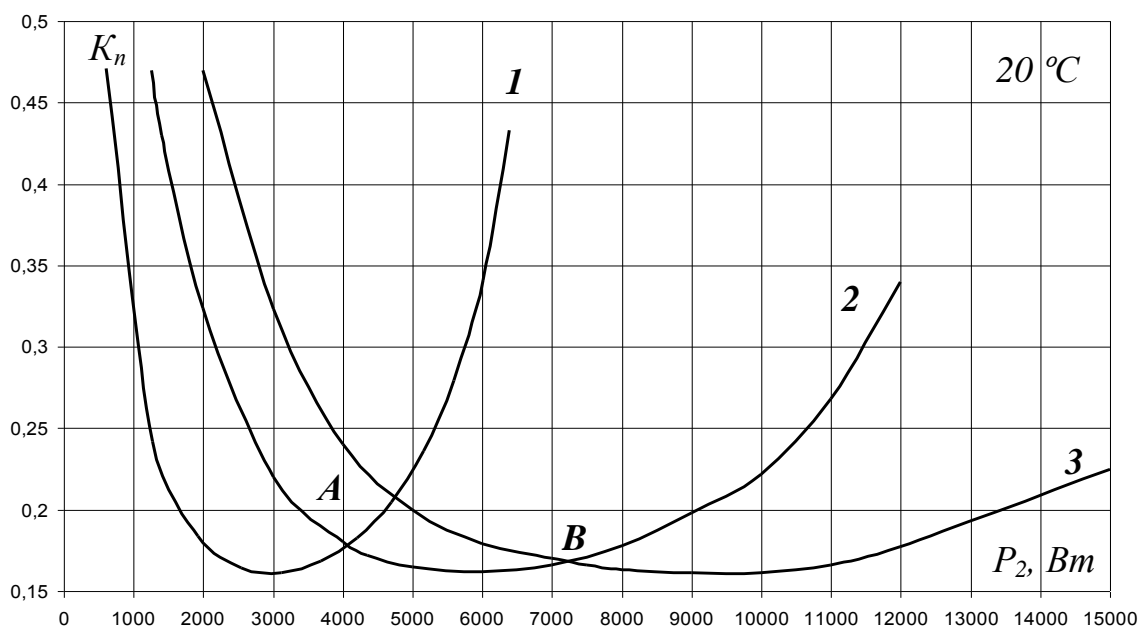
$R_1', R_2'', x_1', x_2''$  – параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя.

- Сравниваются значения мощностей  $P_2^{(1)}$ ,  $P_2^{(2)}$  со значениями мощностей  $P_A$  и  $P_B$ . Если  $P_2^{(1)} > P_A$ , то подается команда на включение второго насосного агрегата, если  $P_2^{(2)} > P_B$ , то подается команда на включение третьего насосного агрегата и наоборот.

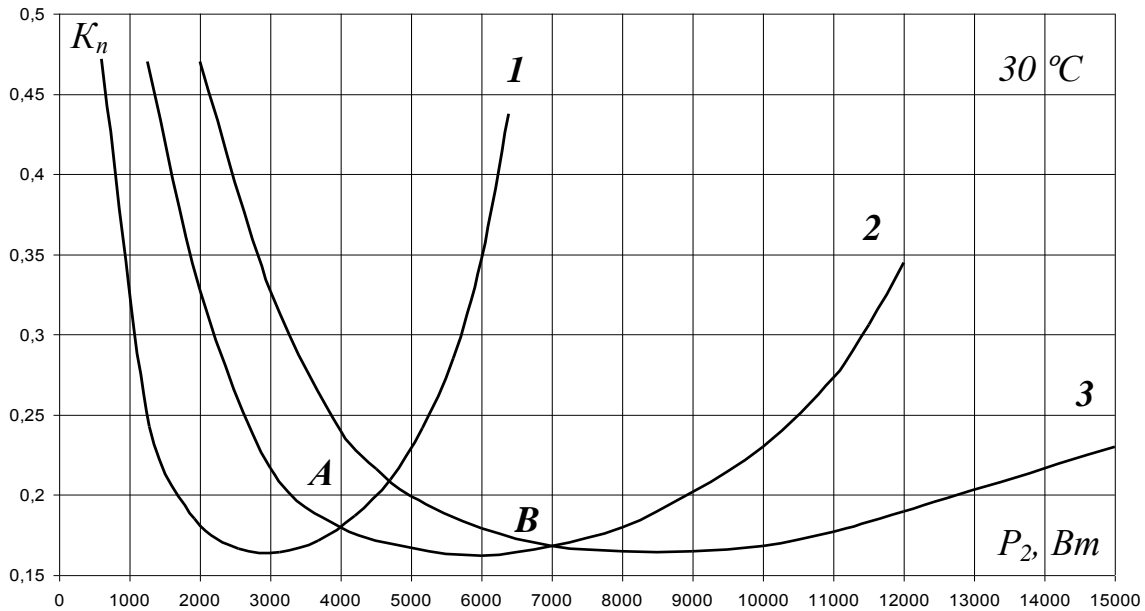
Структурная схема устройства оптимизации числа параллельно работающих насосных агрегатов приведена на рисунке 6.6.



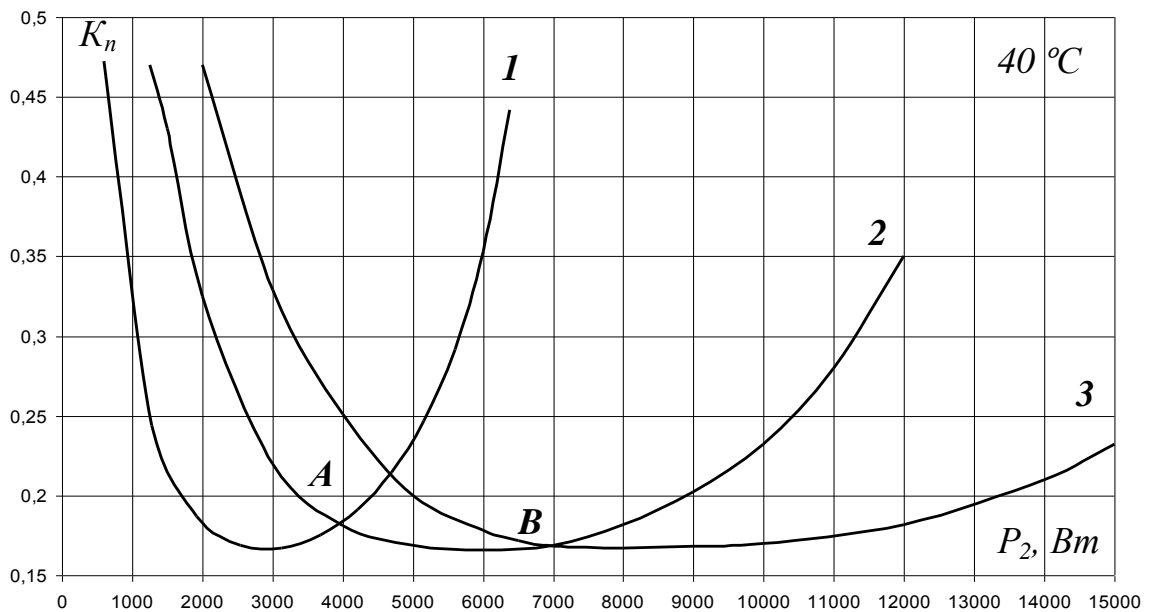
**Рис. 6.1** Зависимость коэффициента потерь активной мощности  $\kappa_n$  в функции суммарной активной мощности на валах параллельно работающих насосных агрегатов  $P_2$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 10^\circ\text{C}$ : 1 – работает один насосный агрегат; 2 – работают два насосных агрегата; 3 – работают три насосных агрегата; А – точка включения второго насосного агрегата на параллельную работу; В – точка включения третьего насосного агрегата на параллельную работу



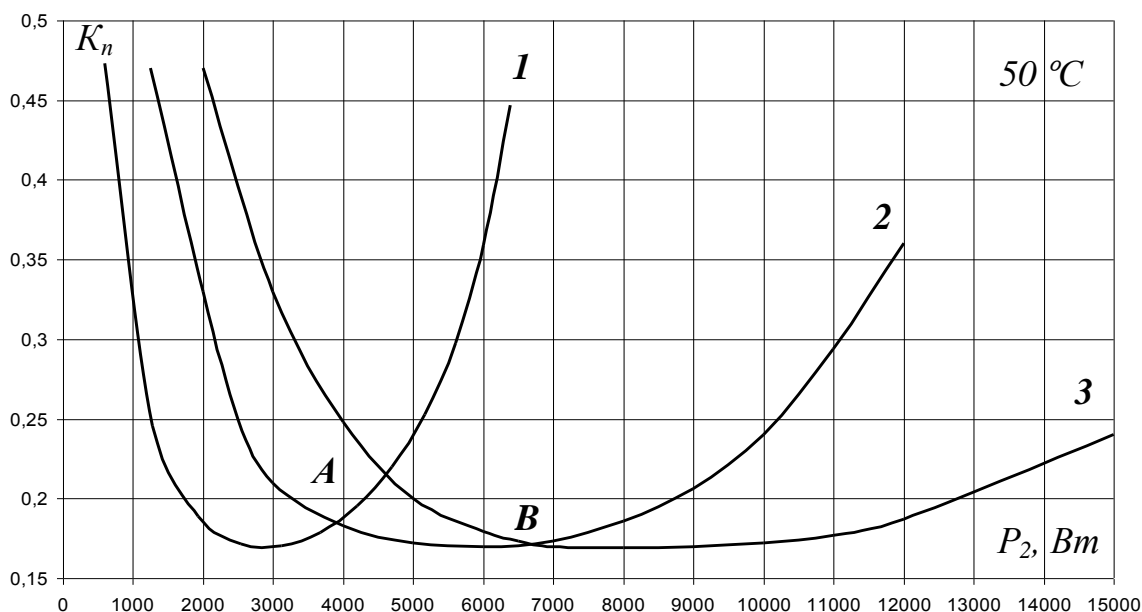
**Рис. 6.2** Зависимость коэффициента потерь активной мощности  $\kappa_n$  в функции суммарной активной мощности на валах параллельно работающих насосных агрегатов  $P_2$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$ : 1 – работает один насосный агрегат; 2 – работают два насосных агрегата; 3 – работают три насосных агрегата; А – точка включения второго насосного агрегата на параллельную работу; В – точка включения третьего насосного агрегата на параллельную работу



**Рис. 6.3** Зависимость коэффициента потерь активной мощности  $K_n$  в функции суммарной активной мощности на валах параллельно работающих насосных агрегатов  $P_2$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 30^\circ\text{C}$ : 1 – работает один насосный агрегат; 2 – работают два насосных агрегата; 3 – работают три насосных агрегата; А – точка включения второго насосного агрегата на параллельную работу; В – точка включения третьего насосного агрегата на параллельную работу



**Рис. 6.4** Зависимость коэффициента потерь активной мощности  $K_n$  в функции суммарной активной мощности на валах параллельно работающих насосных агрегатов  $P_2$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 40^\circ\text{C}$ : 1 – работает один насосный агрегат; 2 – работают два насосных агрегата; 3 – работают три насосных агрегата; А – точка включения второго насосного агрегата на параллельную работу; В – точка включения третьего насосного агрегата на параллельную работу



**Рис. 6.5** Зависимость коэффициента потерь активной мощности  $K_n$  в функции суммарной активной мощности на валах параллельно работающих насосных агрегатов  $P_2$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{cp} = 50^\circ\text{C}$ : 1 – работает один насосный агрегат; 2 – работают два насосных агрегата; 3 – работают три насосных агрегата; А – точка включения второго насосного агрегата на параллельную работу; В – точка включения третьего насосного агрегата на параллельную работу

### 6.3 Облегчение аварийных режимов работы электродвигателей привода насосных агрегатов

Всякое отключение электродвигателя техническими средствами защиты предупреждает выход его из строя. Но при этом производству наносится технологический ущерб, поэтому всякое отключение должно быть обоснованным. Одним из путей снижения технологического ущерба из-за отключения электродвигателей при возникновении аномальных режимов является облегчение этих режимов с одновременной подачей сигнала обслуживающему персоналу для принятия мер в технологическую паузу.

В соответствии с высказанной нами гипотезой объединение нулевых точек обмоток электродвигателя (без соединения их с нейтралью) облегчает режимы работы электродвигателей при определенных эксплуатационных

воздействиях.

Предварительный анализ показывает, что такими режимами могут быть неполнофазный режим и режим с повышенным активным сопротивлением в цепи одной из фаз (например, при увеличении переходного сопротивления контактов коммутирующих устройств).

Исследуем эти режимы. Составляем расчетную схему электрической цепи при объединении нулевых точек электродвигателей и обрыве в цепи фазы одного из электродвигателей (рис.6.7).

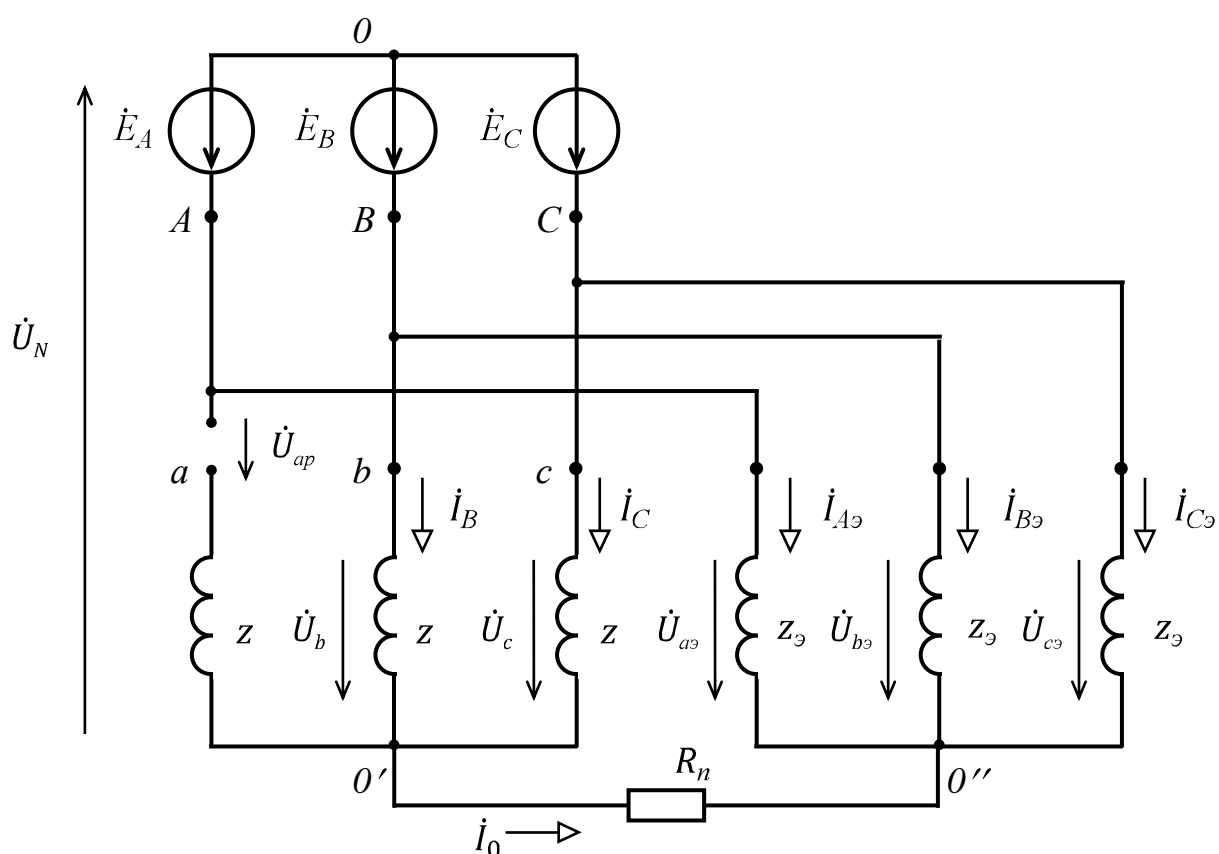


Рис.6.7 Расчетная схема цепи электродвигателей с объединенными нулевыми точками.

На расчетной схеме (рис.6.7) введены следующие обозначения:

$\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  – комплексы фазных э.д.с. источника, В;

$z$  – комплекс полного сопротивления фазы исследуемого электродвигателя, Ом;

$z_0$  – комплекс полного сопротивления фазы эквивалентного электро-

двигателя группы электродвигателей поточной технологической линии, Ом;

$R_n$  – активное сопротивление нулевого провода, Ом;

$\dot{U}_{ap}$  – комплекс действующего значения напряжения в разрыве цепи, В;

$\dot{U}_b, \dot{U}_c$  – комплексы действующих значений напряжений на оставшихся в работе фазах, В;

$\dot{U}_{aэ}, \dot{U}_{bэ}, \dot{U}_{cэ}$  – комплексы действующих значений напряжений на фазах эквивалентного электродвигателя, В;

$\dot{I}_B, \dot{I}_C$  – комплексы токов оставшихся в работе фаз, А;

$\dot{I}_{Aэ}, \dot{I}_{Bэ}, \dot{I}_{Cэ}$  – комплексы токов эквивалентного электродвигателя, А;

$\dot{I}_0$  – комплекс тока в нулевом проводе, А.

Источник напряжения принят идеальным и симметричным, поэтому можем записать:

$$\dot{E}_A = \dot{E}_n; \quad (6.5)$$

$$\dot{E}_B = \dot{E}_n e^{-j120^\circ}; \quad (6.6)$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_n e^{-j240^\circ}. \quad (6.7)$$

Напряжение на оставшихся в работе фазах найдем следующим образом:

$$\dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_N; \quad (6.8)$$

$$\dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_N. \quad (6.9)$$

где  $\dot{U}_N$  – напряжение смещения нейтрали, В.

Если принять с достаточной степенью точности  $R_n = 0$ , то напряжения смещения нейтрали запишется так:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A \frac{1}{z_9} + \dot{E}_B \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{z_9} \right) + \dot{E}_C \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{z_9} \right)}{\frac{2}{z} + \frac{3}{z_9}}. \quad (6.10)$$

После преобразования (6.10) получаем:

$$\dot{U}_N = \frac{-0,5\dot{E}_A}{1 + 1,5\gamma \cdot e^{j\psi}}; \quad (6.11)$$

$$\gamma = \frac{z}{z_9}; \quad (6.12)$$

$$\psi = \varphi - \varphi_9, \quad (6.13)$$

где  $\gamma$  – отношение модулей полных сопротивлений исследуемого и эквивалентного электродвигателей;

$\varphi$  – угол сдвига фаз исследуемого электродвигателя, *градус*;

$\varphi_9$  – угол сдвига фаз эквивалентного электродвигателя, *градус*.

Уравнение напряжения смещения нейтрали представляет собой уравнение круговой диаграммы (рис.6.8).

Найдем симметричные составляющие фазных напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} \left( (\dot{E}_B - \dot{U}_N)a + (\dot{E}_C - \dot{U}_N)a^2 \right); \quad (6.14)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \left( (\dot{E}_B - \dot{U}_N)a^2 + (\dot{E}_C - \dot{U}_N)a \right). \quad (6.15)$$

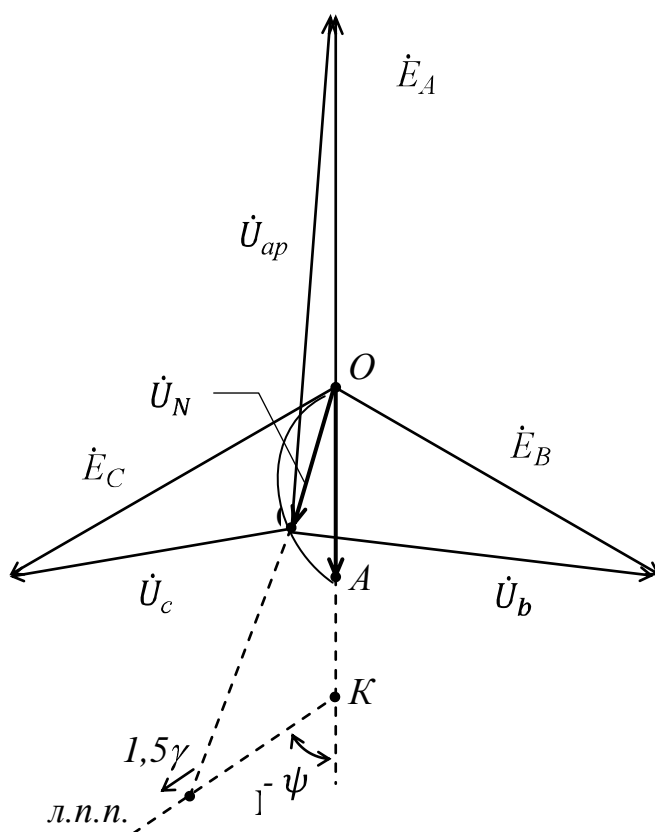


Рис. 6.8 Круговая диаграмма напряжения смещения нейтрали.

После преобразования получаем:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(2\dot{E}_A + \dot{U}_N); \quad (6.16)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(-\dot{E}_A + \dot{U}_N). \quad (6.17)$$

Исследуем напряжение между нулевыми точками электродвигателя с выпавшей фазой и эквивалентного электродвигателя (рис. 6.19).

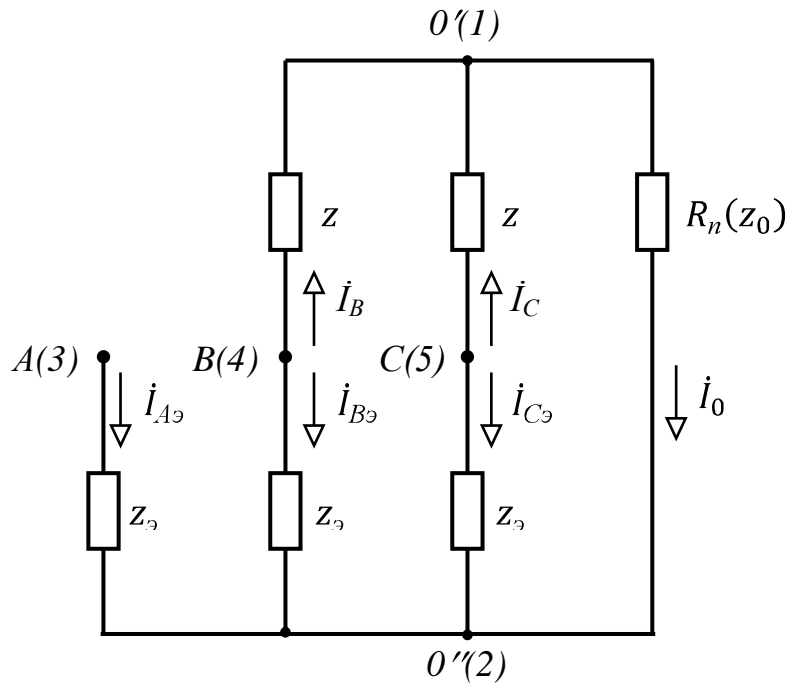


Рис.6.9 Расчетная схема цепи с выпавшей фазой.

Составим уравнение по методу узловых потенциалов для узлов 1 и 2:

$$\dot{\varphi}_1 Y_{11} - \dot{\varphi}_2 Y_{12} - \dot{\varphi}_3 Y_{13} - \dot{\varphi}_4 Y_{14} - \dot{\varphi}_5 Y_{15} = 0; \quad (6.18)$$

$$-\dot{\varphi}_1 Y_{21} - \dot{\varphi}_2 Y_{22} - \dot{\varphi}_3 Y_{23} - \dot{\varphi}_4 Y_{24} - \dot{\varphi}_5 Y_{25} = 0; \quad (6.19)$$

Перепишем уравнения, раскрыв проводимости и потенциалы точек 3, 4, 5:

$$\dot{\varphi}_1 (2Y + Y_0) - \dot{\varphi}_2 Y_0 - \dot{\varphi}_A \cdot 0 - \dot{\varphi}_B Y - \dot{\varphi}_C Y = 0; \quad (6.20)$$

$$-\dot{\varphi}_1 Y_0 + \dot{\varphi}_2 (3Y_0 + Y_0) - \dot{\varphi}_A Y_0 - \dot{\varphi}_B Y_0 - \dot{\varphi}_C Y_0 = 0, \quad (6.21)$$

преобразовав, получим:

$$\dot{\varphi}_1 (2Y + Y_0) - \dot{\varphi}_2 Y_0 - \dot{\varphi}_A Y = 0; \quad (6.22)$$

$$-\dot{\varphi}_1 Y_0 + \dot{\varphi}_2 (3Y_0 + Y_0) = 0. \quad (6.23)$$

Решив систему уравнений, находим:

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_{0'} = -\dot{E}_A \frac{Y(3Y_9 + Y_0)}{2Y(3Y_9 + Y_0) + 3Y_9Y_0}; \quad (6.24)$$

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_{0''} = -\dot{E}_A \frac{YY_0}{2Y(3Y_9 + Y_0) + 3Y_9Y_0}. \quad (6.25)$$

Находим напряжение между точками  $0'$  и  $0''$ :

$$\dot{U}_{0'0''} = -\dot{E}_A \frac{-Y(3Y_9 + Y_0) + YY_0}{2Y(3Y_9 + Y_0) + 3Y_9Y_0}. \quad (6.26)$$

Исследуем, как будет изменяться потенциалы точек  $0'$  и  $0''$  в функции  $Y_0$ .

Найдем выражение потенциалов для случая, когда  $Y_0 = 0$ :

$$\dot{\varphi}_{0'} = \frac{-\dot{E}_A}{2}; \quad (6.27)$$

$$\dot{\varphi}_{0''} = 0; \quad (6.28)$$

$$\dot{U}_{0'0''} = \frac{-\dot{E}_A}{2}. \quad (6.29)$$

Полученные выражения соответствуют известным теоретическим положениям, когда при выпадении фазы в линейных трехфазных цепях напряжение смещения нейтрали равно половине фазного напряжения источника.

Найдем теперь выражение потенциалов для случая, когда  $Y_0 = \infty$ :

$$\dot{\varphi}_{0'} = -\dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_9}; \quad (6.30)$$

$$\dot{\phi}_{0''} = -\dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_0}. \quad (6.31)$$

Естественно, что:

$$\dot{U}_{0'0''} = 0. \quad (6.32)$$

Таким образом, в этом случае объединенные нулевые точки обладают определенным потенциалом.

Разность потенциалов объединенных нулевых точек и нулевой точки источника даст напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_N = \dot{\phi}_{0'} - \dot{\phi}_0 = \frac{-0,5\dot{E}_A}{1 + 1,5\frac{Y_0}{Y}}, \quad (6.33)$$

где

$$\dot{\phi}_0 = 0. \quad (6.34)$$

Нетрудно видеть, что формулы (6.11) и (6.34) представляют собой одно и то же, что доказывает правильность проведенных аналитических исследований.

Найдем выражение уравнительного тока между точками 0' и 0'':

$$\dot{i}_0 = -\dot{E}_A \frac{-YY_0^2 + YY_0(3Y_0 + Y_0)}{2Y(3Y_0 + Y_0) + 3Y_0Y_0}, \quad (6.35)$$

или, преобразовав данное выражение, получим:

$$i_0 = -\dot{E}_A \frac{3Y Y_0}{2Y(3Y_0 + Y_0) + 3Y_0 Y_0}. \quad (6.36)$$

Исследуем, как будет изменяться ток в функции  $Y_0$ . Найдем выражение тока для случая, когда  $Y_0 = \infty$ :

$$i_0 = -\dot{E}_A \frac{3Y Y_0}{2Y + 3Y_0}. \quad (6.37)$$

Когда  $Y_0 = 0$ , то

$$i_0 = -0. \quad (6.38)$$

Таким образом, в уравнительном проводе всегда существует ток.

Найдем токи в фазах двигателей (эквивалентном и с выпавшей фазой) при  $Y_0 = \infty$ :

$$i_{A\vartheta} = (\dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_{0''}) Y_0 = Y_0 \left( \dot{E}_A + \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_0} \right); \quad (6.39)$$

$$i_{B\vartheta} = (\dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_{0''}) Y_0 = Y_0 \left( \dot{E}_B + \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_0} \right); \quad (6.40)$$

$$i_{C\vartheta} = (\dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_{0''}) Y_0 = Y_0 \left( \dot{E}_C + \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_0} \right); \quad (6.41)$$

$$i_B = (\dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_{0'}) Y = Y \left( \dot{E}_B + \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_0} \right); \quad (6.42)$$

$$i_C = (\dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_{0'}) Y = Y \left( \dot{E}_C + \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_0} \right); \quad (6.43)$$

Найдем симметричные составляющие этих токов:

а) для эквивалентного электродвигателя:

$$i_{0\vartheta} = \frac{1}{3}(i_{A\vartheta} + i_{B\vartheta} + i_{C\vartheta}) = \dot{E}_A \frac{Y Y_\vartheta}{2Y + 3Y_\vartheta}; \quad (6.44)$$

$$i_{1\vartheta} = \frac{1}{3}(i_A + a i_B + a^2 i_C) = \dot{E}_A Y_\vartheta; \quad (6.45)$$

$$i_{2\vartheta} = \frac{1}{3}(i_A + a^2 i_B + a i_C) = 0. \quad (6.46)$$

б) для электродвигателя с выпавшей фазой:

$$\begin{aligned} i_0 &= \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C) = \frac{1}{3}\left(Y\left(\dot{E}_B + \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta}\right) + \dot{E}_C + \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta}\right) = \\ &= -\dot{E}_A \frac{Y Y_\vartheta}{2Y + 3Y_\vartheta}; \end{aligned} \quad (6.47)$$

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{3}(i_A + a i_B + a^2 i_C) = \\ &= \frac{1}{3}\left(Y\left(a \dot{E}_B + a \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta}\right) + Y\left(a^2 \dot{E}_C + a^2 \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta}\right)\right) = \\ &= \dot{E}_A \frac{Y^2 + 2Y Y_\vartheta}{2Y + 3Y_\vartheta}; \end{aligned} \quad (6.48)$$

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{1}{3}(i_A + a^2 i_B + a i_C) = \\ &= \frac{1}{3}\left(Y\left(a^2 \dot{E}_B + a^2 \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta}\right) + Y\left(a \dot{E}_C + a \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta}\right)\right) = \\ &= \frac{Y}{3}\left(\dot{E}_C + \dot{E}_B \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta} + \dot{E}_B + \dot{E}_C \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta}\right) = \\ &= \frac{Y}{3}\left(-\dot{E}_A - \dot{E}_A \frac{Y}{2Y + 3Y_\vartheta}\right) = \frac{-\dot{E}_A}{3}\left(Y + \frac{Y^2}{2Y + 3Y_\vartheta}\right) = \\ &= \frac{-\dot{E}_A}{3} \frac{2Y^2 + 3Y Y_\vartheta + Y^2}{2Y + 3Y_\vartheta} = -\dot{E}_A \frac{Y^2 + Y Y_\vartheta}{2Y + 3Y_\vartheta}. \end{aligned} \quad (6.49)$$

Найдем отношение симметричных составляющих токов прямой и обратной последовательностей:

$$\frac{i_1}{i_2} = -\frac{2 + \frac{Y}{Y_9}}{1 + \frac{Y}{Y_9}} \quad (6.50)$$

Если  $Y \rightarrow 0$ , то отношение стремится к двойному значению.

Найдем соотношение между симметричными составляющими прямой и обратной последовательностей напряжений на фазах электродвигателя:

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = -\frac{2\dot{E}_A + \dot{U}_N}{-\dot{E}_A + \dot{U}_N} \quad (6.51)$$

Если принять  $\dot{U}_N = 0$ , то:

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = -2.$$

Если принять  $\dot{U}_N = -0,5\dot{E}_A$ , то:

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = -1.$$

Анализ круговой диаграммы и результатов исследования показывает: чем больше сопротивление исследуемого электродвигателя по сравнению с эквивалентным сопротивлением группы электродвигателей, тем меньше напряжение смещения нейтрали и тем больше угол сдвига фаз приближается к  $120^\circ$  между векторами  $\dot{U}_b$  и  $\dot{U}_c$ . С другой стороны, величины модулей фазных

напряжений также становятся не равными. Это приводит к тому, что симметричная составляющая напряжения фаз электродвигателя прямой последовательности будет больше по модулю симметричной составляющей обратной последовательности. А это улучшает режим работы электродвигателя.

Исследуем теперь режим работы электродвигателей при объединении их нулевых точек и возникновении переходного активного сопротивления в цепи одной из фаз одного из электродвигателей. Составляем расчетную схему этого случая (рис.6.10).

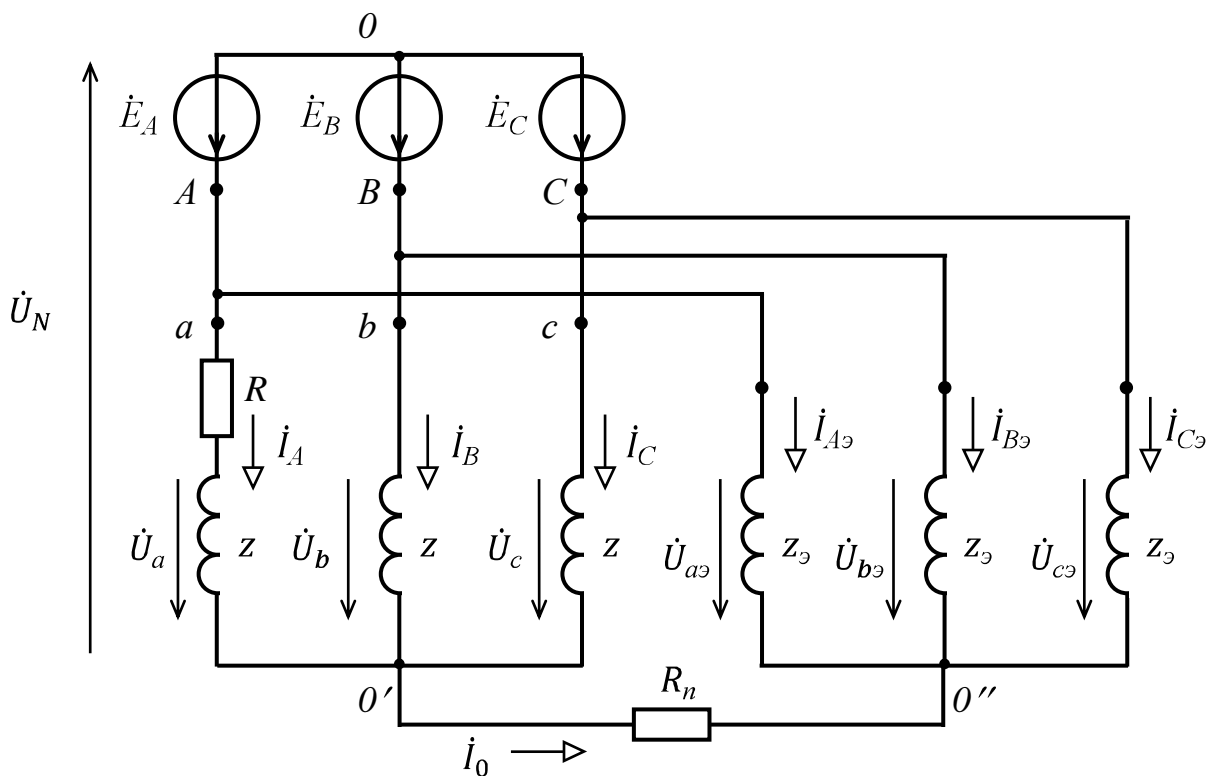


Рис.6.10 Расчетная схема цепи.

На расчетной схеме (рис.6.10)  $R$  – переходное активное сопротивление в цепи одной из фаз двигателя (например, в фазе А).

Принимаем  $R_n = 0$  и найдем напряжение смещения нейтрали в этом случае:

$$\dot{U}_N = - \frac{\dot{E}_A \left( \frac{1}{R+z} + \frac{1}{z_9} \right) + \dot{E}_B \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{z_9} \right) + \dot{E}_C \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{z_9} \right)}{\frac{1}{R+z} + \frac{2}{z} + \frac{3}{z_9}}. \quad (6.52)$$

После преобразования получим:

$$\dot{U}_N = - \frac{-0,5\dot{E}_A}{-0,5 + 1,5(1 + \gamma e^{j\psi}) \left( 1 + \frac{z}{R} \right)}, \quad (6.53)$$

где

$$\frac{z}{R} = \Delta e^{j\psi}; \quad (6.54)$$

$$\Delta = \frac{z}{R}. \quad (6.55)$$

Анализ (6.53) показывает, что если  $R = \infty$  (т.е. произошел обрыв в цепи одной из фаз, в данном случае в фазе А), то выражение (6.53) принимает вид (6.11), что подтверждает правильность проведенного анализа.

## **РАЗДЕЛ 7. РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРООТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

### **7.1 Общие положения**

Электрическая энергия является удобным и самым большим универсальным видом энергоносителя, который от традиционных энергоносителей отличается в лучшую сторону - экологичностью, технологичностью, способностью практически мгновенно передаваться на большие расстояния к конечному потребителю с большой плотностью и с малыми потерями и превращаться в другие виды энергии, удобством учета, контроля и управления, надежностью снабжения. Поэтому электроэнергия нашла широкое применение в многочисленных индустриальных и агропромышленных технологических процессах. Электрификация быта, в частности использования электрообогрева, благодаря его высоким потребительским характеристикам, комфортности и удобству, также является привлекательной.

Категория потребителей электроэнергии в жилищно-коммунальном хозяйстве всегда составляла заметную частицу энергобаланса страны. Распространение электротеплообеспечения в непромышленных сферах сдерживалось по причине кроме высоких его стоимостных показателей, еще и недостаточными генерирующими мощностями и устаревшими нормативными требованиями к энергоэффективности. Отношение к электрообогреву изменилось в 1991 году после начала перехода страны к рыночным отношениям. К тому времени в Украине было уже в основном завершено создание энергетического комплекса.

В годы независимости были достроены три энергоблока из общего количества 15 блоков и введен один энергоблок на теплоэлектростанции мощностью 250 МВт. Также проводились работы на гидроэлектростанциях Днепровского каскада и были введены к действию два энергоблока Ташлык-

ской гидроэлектроаккумулирующей электростанции. Поскольку в эти годы состоялось падение промышленного производства, то существенно упал коэффициент использования электрогенерирующих мощностей (до последнего времени в Украине он не превышает 40...50 %). Как следствие, высвободились ресурсы электроэнергобаланса, которые стали более доступны другим категориям потребителей. После 1991 года в процессе перехода страны к рыночной экономике электроэнергия начала приобретать черты полноценного товара (стоимость которого определяется соотношением спрос-предложение), что значительно расширило сферы внедрения электротеплообеспечения. Вопреки тому, что электроотопление в стране имеет почти 30-летнюю историю, его заметное распространение началось лишь именно после 1991 года.

## **7.2 Суточные режимы нагрузки объединенной энергетической системы Украины и особенности электропотребления**

Негативным свойством электроэнергии, как товарного продукта, остается невозможность производства электроэнергии "про запас", то есть "складирование" или аккумуляирование ее временных излишков. Причиной этого явления является одномоментность генерации и потребления электроэнергии. Суточная и сезонная неравномерности спроса на электроэнергию определяют зависимость ее производства от времени суток и поры года. На рис. 7.1 приведены типы суточных графиков нагрузки объединенной энергетической системы Украины 21.12.2005 года.

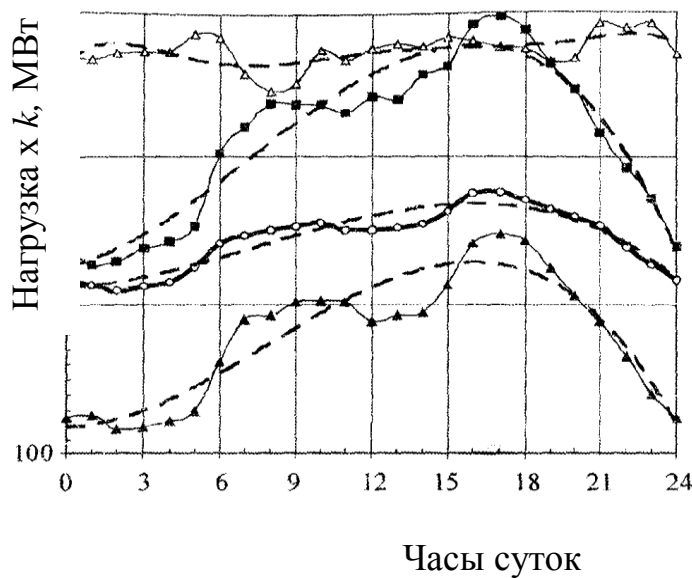


Рис. 7.1. Суточная нагрузка в зимний режимный день 2005 года (обозначенные знаком  $x$  множители  $k$  для определения числовых значений нагрузки по оси ординат)

Очевидно, что кроме временного и погодного факторов на характер графика нагрузок влияют много других факторов, в частности геополитические риски и вызовы, факторы разной (социально-экономической, технической, политической, экономически-географической) природы, механизмы взаимодействия которых довольно сложные, а результаты в виде значений и тенденций макроэкономических показателей и их комплексов иногда могут быть противоречивыми. До сих пор не предложено надежной модели современных и перспективных графиков нагрузки объединенной энергетической системы Украины в условиях так называемого свободного функционирования оптового рынка электроэнергии, которая бы более или менее учитывала социальные, политические или экономические конъюнктуры, которые существуют сейчас или ожидаются в будущем. Но в любом случае, первым и обязательным условием построения модели графика нагрузок объединенной энергетической системы Украины, как зеркала ее экономики, есть учет фактически потребляемой электроэнергии.

Анализ графиков нагрузки на рисунке 7.1 показывает, что существуют большие провалы нагрузки в ночные часы, что требует их заполнения с точки зрения экономии энергоресурсов. Одним из таких способов заполнения графика является применение электрической энергии для электроотопления, в том числе и путем аккумуляции тепловой энергии, полученной из электрической.

Одним из недостатков существующих технических средств преобразования электрической энергии в тепловую является их невысокий срок службы (особенно трубчатых электронагревателей). Поэтому задачей является разработка технических средств преобразования электрической энергии в тепловую, обладающих большой эксплуатационной надежностью и высоким коэффициентом полезного действия.

### **7.3 Техническое средство преобразования электрической энергии в тепловую на принципе «катушки в стали»**

#### **7.3.1 Теоретическое обоснование**

Нами высказана гипотеза о том, что преобразователь электрической энергии в тепловую на принципе «катушка в стали» будет иметь значительно больший срок службы, чем трубчатые электронагреватели, и высокий коэффициент полезного действия.

Рассмотрим потери активной мощности в катушке со сталью на гистерезис. При этом будем считать, что катушка является идеальной, то есть активное сопротивление обмотки катушки равно нулю.

Активная мощность, которую потребляет идеальная катушка, равна:

$$P_z = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt, \quad (7.1)$$

где  $T$  – период синусоидального тока,  $c$ ;

$u$  – мгновенное значение синусоидального напряжения,  $B$ ;

$i$  – мгновенное значение синусоидального тока,  $A$ ;

$t$  – текущее время,  $c$ .

Если считать, что активное сопротивление катушки равняется нулю, то приложенное напряжение уравнивается э.д.с. самоиндукции  $e$ , то есть:

$$u = -e = w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7.2)$$

где  $w$  – число витков катушки;

$\Phi$  – мгновенное значение магнитного потока,  $Bб$ .

В свою очередь:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (7.3)$$

где  $B$  – мгновенное значение магнитной индукции,  $Tл$ ;

$S$  – площадь сердечника катушки,  $m^2$ .

Тогда можем записать:

$$u = wS \frac{dB}{dt}. \quad (7.4)$$

Ток в катушке найдём из закона полного тока:

$$i = \frac{Hl}{w}, \quad (7.5)$$

где  $H$  – мгновенное значение напряженности магнитного поля,  $A/m$ ;

$l$  – длина средней линии магнитопровода катушки,  $m$ .

С учетом (7.5) перепишем (7.1):

$$P_z = \frac{1}{T} \int_0^T wS \frac{dB}{dt} \cdot \frac{Hl}{w} dt = \frac{Sl}{T} \oint HdB = fV \oint HdB, \quad (7.6)$$

где  $V$  – объём магнитопровода,  $m^3$ ;

$f$  – частота тока,  $Гц$ .

Если рассмотреть петлю гистерезиса, то её площадь –  $\oint HdB$ .

Значит, потери активной мощности на гистерезис прямо пропорциональны частоте тока, объёму сердечника и площади петли гистерезиса. В другом виде можно записать:

$$P_z = r_{\text{гз}} I_a^2, \quad (7.7)$$

где  $r_{\text{гз}}$  – эквивалентное активное сопротивление, с помощью которого считаются потери активной мощности на гистерезис,  $Ом$ ;

$P_z$  – потери активной мощности на гистерезис,  $Вт$ ;

$I_a$  – активная составляющая силы тока в идеальной катушке,  $A$ .

Рассмотрим потери активной мощности в катушке со сталью на вихревые токи.

Переменный ток, что проходит по катушке, создаёт в магнитопроводе переменный магнитный поток. Последний наводит в сердечнике э.д.с., под действием которых возникают вихревые токи, которые замыкаются по симметричным контурам. Эти вихревые токи нагревают стальной сердечник, то

есть теряется активная мощность.

В целом потери активной мощности на вихревые токи прямо пропорциональны квадрату частоты тока, толщине сердечника стали и магнитной индукции.

Можно записать:

$$P_{\sigma} = r_{\sigma} I_a^2, \quad (7.8)$$

где  $r_{\sigma}$  – эквивалентное сопротивление, с помощью которого учитываются потери активной мощности на вихревые токи, Ом;

$P_{\sigma}$  – потери активной мощности на вихревые токи, Вт.

В целом потери активной мощности в катушке со сталью равны:

$$P_c = P_z + P_{\sigma} = (r_{z\sigma} + r_{\sigma}) I_a^2 = r_{\sigma} I_a^2, \quad (7.9)$$

где  $r_{\sigma}$  – эквивалентное активное сопротивление, которое учитывает потери активной мощности в стали.

Составляем расчётную схему идеальной катушки в стали (рис. 7.2)

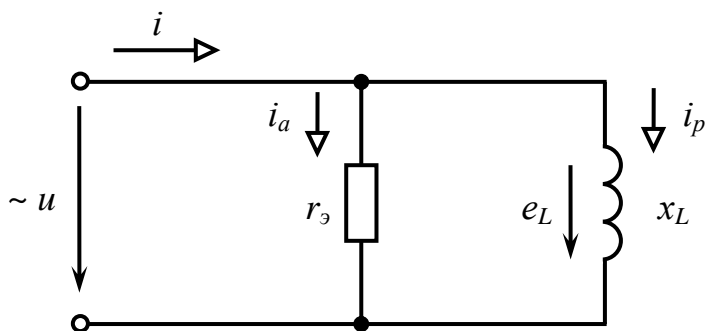


Рис. 7.2. Расчётная схема идеальной катушки в стали.

На расчётной схеме:

$x_L$  – индуктивное сопротивление идеальной катушки в стали, Ом.

В свою очередь:

$$x_L = \omega \cdot L \quad (7.10)$$

где  $\omega$  – круговая частота тока,  $rad/c$ ;

$L$  – индуктивность идеальной катушки в стали,  $Гн$ .

Составляем расчётную схему идеальной катушки со сталью в комплексной форме (рис. 7.3).

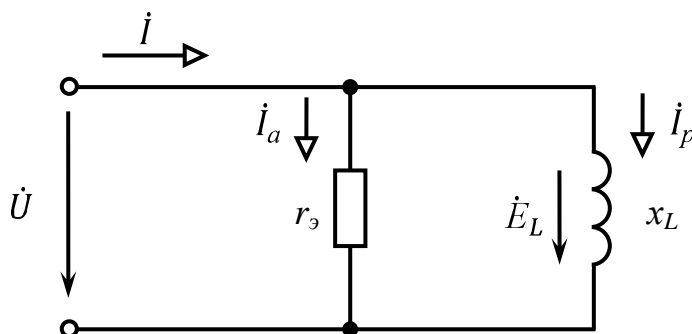


Рис. 7.3. Расчётная схема идеальной катушки в стали в комплексной форме.

На расчётной схеме:

$\dot{U}$  – комплекс действующего значения напряжения на зажимах идеальной катушки в стали,  $B$ ;

$\dot{I}$  – комплекс действующего значения силы электрического тока идеальной катушки в стали,  $A$ ;

$\dot{E}$  – комплекс действующего значения электродвижущей силы самоиндукции идеальной катушки в стали,  $B$ ;

$\dot{I}_a$  – комплекс действующего значения активной составляющей силы электрического тока идеальной катушки в стали,  $A$ ;

$\dot{I}_p$  – комплекс действующего значения реактивной составляющей силы электрического тока идеальной катушки в стали,  $A$ .

Строим векторную диаграмму идеальной катушки в стали (рис. 7.4)

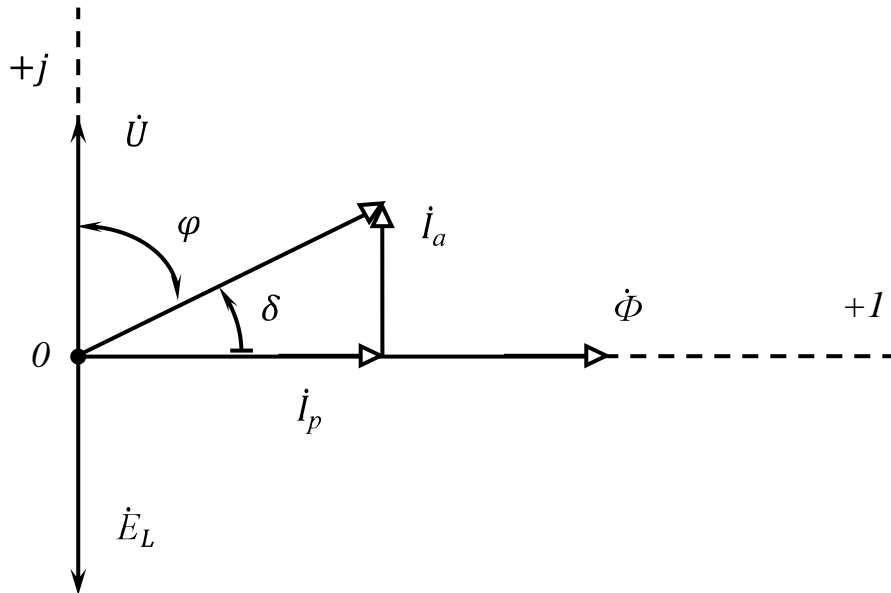


Рис. 7.4. Векторная диаграмма идеальной катушки в стали

На векторной диаграмме:

$\dot{\Phi}$  - комплекс действующего значения магнитного потока идеальной катушки в стали, Вб;

$\varphi$  – угол сдвига фаз идеальной катушки в стали, град.

Запишем уравнение электрического равновесия идеальной катушки в стали для оригиналов:

$$u = -e_L = w \frac{d\Phi}{dt} \quad (7.11)$$

Зададимся выражением мгновенного значения напряжения на зажимах идеальной катушки в стали:

$$u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (7.12)$$

Найдём выражение мгновенного магнитного потока из (7.11):

$$\Phi = \frac{1}{w} \int u dt = \frac{1}{w} \int U_m \sin(\omega t + 90^\circ) dt = \frac{U_m}{w \cdot \omega} \sin \omega t = \Phi_m \cdot \sin \omega t, \quad (7.13)$$

где

$$\Phi_m = \frac{U_m}{w \cdot \omega}. \quad (7.14)$$

Запишем уравнение электрического равновесия идеальной катушки в стали для комплексов:

$$\dot{U} = -\dot{E} = j\omega w \dot{\Phi}. \quad (7.15)$$

Составим расчётную схему реальной катушки в стали, для чего вынесем активное сопротивление обмотки катушки в стали  $r_k$  на зажимы расчётной схемы идеальной катушки в стали для оригиналов (рис. 7.5)

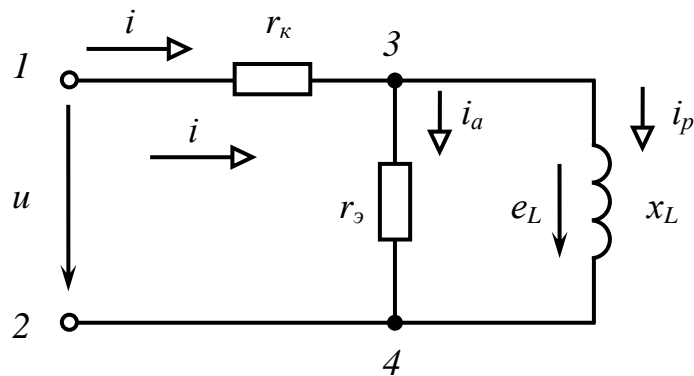


Рис. 7.5. Расчётная схема идеальной катушки в стали

Запишем уравнение электрического равновесия реальной катушки в стали для оригиналов:

$$u = r_k \cdot i - e_L. \quad (7.16)$$

Составим расчётную схему реальной катушки в стали в комплексной форме (рис. 7.6)

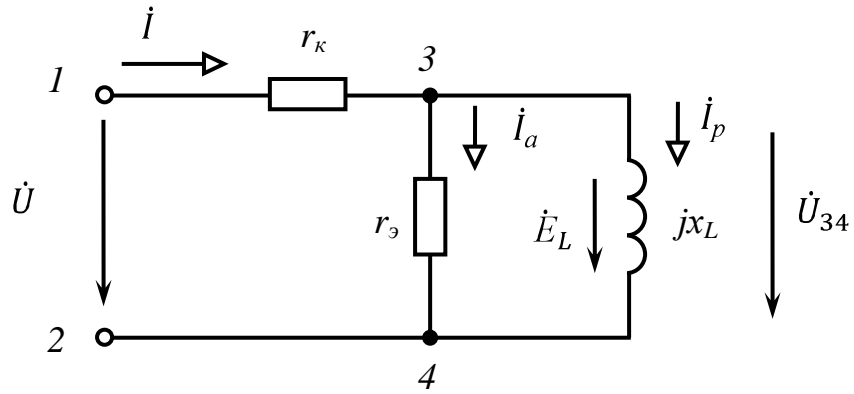


Рис. 7.6. Расчётная схема реальной катушки в стали в комплексной форме

Запишем уравнение электрического равновесия реальной катушки в стали для комплексов:

$$\dot{U} = r_k \cdot \dot{i} - \dot{E}_L \quad (7.17)$$

Построим векторную диаграмму реальной катушки в стали (рис. 7.7):

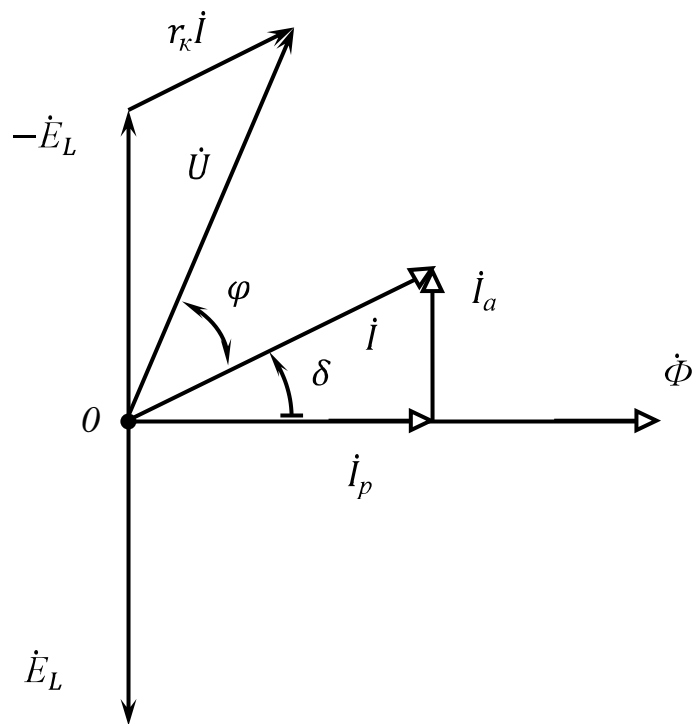


Рис. 7.7. Векторная диаграмма реальной катушки в стали в комплексной форме

На основании анализа проведенного теоретического обоснования можно сделать следующие выводы:

- 1) Потери активной мощности в катушки со сталью на гистерезис прямо пропорциональны частоте электрического тока, объёму сердечника и площади петли гистерезиса.
- 2) Потери активной мощности в катушке со сталью на вихревые токи прямо пропорциональны квадрату частоты тока, магнитной индукции и толщине сердечника.
- 3) В реальной катушке со сталью наблюдаются также потери активной мощности в обмотке катушки благодаря явлению тепловое действие электрического тока.
- 4) Катушку в стали возможно использовать как преобразователь электрической энергии в тепловую.

### 7.3.2 Экспериментальное исследование преобразователя «катушка в стали»

Для экспериментальной проверки преобразователя «катушка в стали» был создан опытно – конструкторский образец, чертёж которого приведен на рис. 7.8.

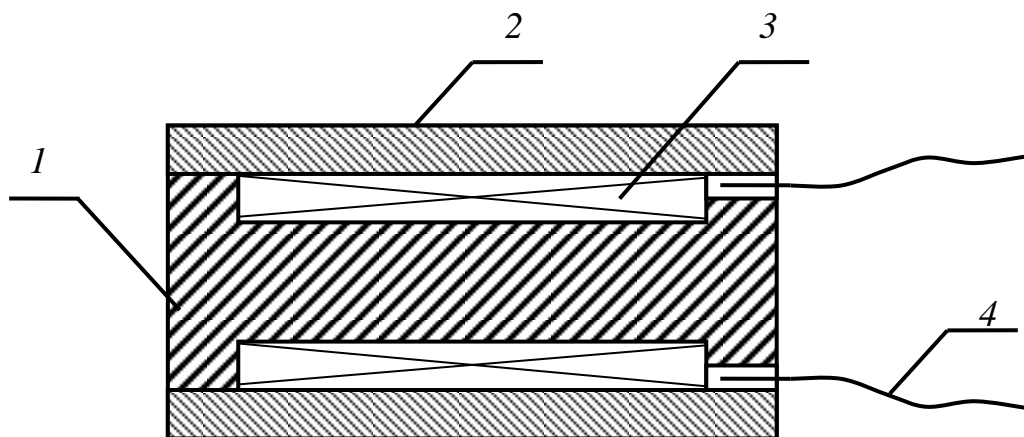


Рис. 7.8. Преобразователь электрической энергии в тепловую «катушка в стали»

На чертеже:

- 1 – стальной корпус,
- 2 – стальная труба,
- 3 – обмотка,
- 4 – выводы.

Обмотка выполнена медным эмалированным обмоточным проводом класса изоляции F.

Преобразователь рассчитан на работу при номинальном напряжении 220В переменного синусоидального электрического тока.

Учитывая то, что в течение суток температура окружающей среды изменяется, то возникает необходимость регулирования мощности нагревательного устройства.

Исследуем с этой точки зрения возможности преобразователя электрической энергии в тепловую «катушка в стали», для чего составляем следующую принципиальную электрическую схему экспериментальной установки, (рис 7.9).

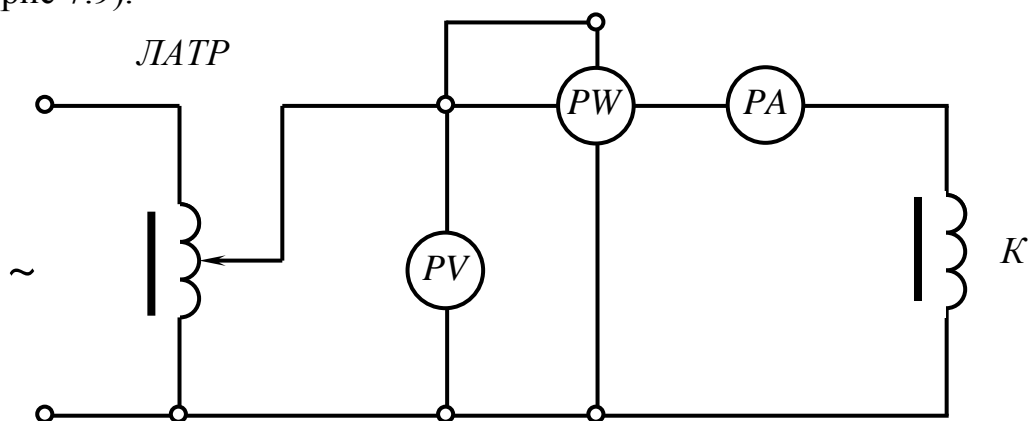


Рис. 7.9. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки

На электрической схеме:

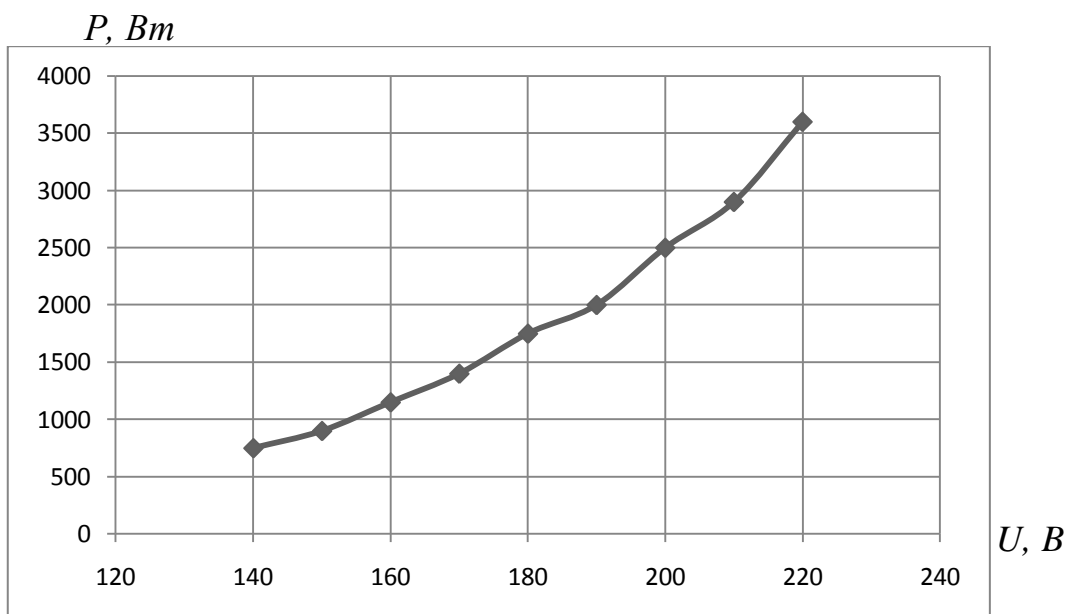
- ЛАТР – лабораторный автотрансформатор,
- pV, pW, pA – электроизмерительные приборы,
- K – катушка в стали.

В таблице 7.1 приведены результаты экспериментальных исследований.

Таблица 7.1 – Результаты экспериментального исследования преобразователя «катушка в стали»

№ п/п	$U, B$	$P, Bm$	$I, A$
1	220	3600	20,5
2	210	2900	17,5
3	200	2500	15,3
4	190	2000	13,3
5	180	1750	12,0
6	170	1400	10,8
7	160	1150	9,3
8	150	900	8,3
9	140	750	7,0

Строим графические зависимости  $P = f(U)$  и  $I = f'(U)$  (рис.7.10)



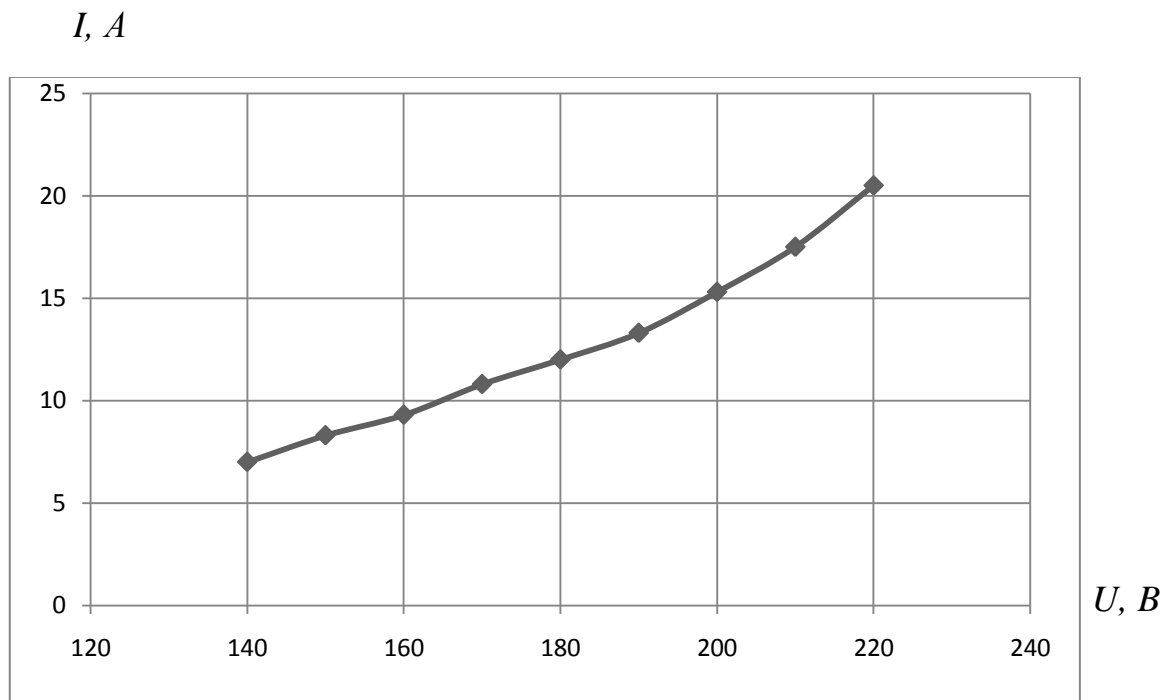


Рис. 7.10. Зависимости мощности и силы электрического тока катушки в стали в функции напряжения

### 7.3.3 Теплоотдача в окружающую среду от отапливаемых помещений в течение суток

Энергетический баланс отапливаемого помещения можем описать следующим дифференциальным уравнением:

$$Cd\tau + \lambda\tau dt = Pdt, \quad (7.18)$$

где  $C$  – теплоёмкость помещения,  $Дж/°C$ ;

$\tau$  – превышение температуры в помещении над температурой окружающей среды,  $°C$ ;

$\lambda$  – теплоотдача помещения в окружающую среду,  $Дж/с°C$ ;

$P$  – мощность теплоты, поступающей в помещение,  $Вт$ ;

$t$  – текущее время,  $с$ .

Разделим правую и левую часть на  $\lambda dt$ :

$$\frac{C d\tau}{\lambda dt} + \tau = \frac{P}{\lambda}. \quad (7.19)$$

Введём обозначение:

$$\frac{C}{\lambda} = T. \quad (7.20)$$

Определим единицу введенной величины  $T$ :

$$[T] = \frac{\text{Дж}/^\circ\text{C}}{\text{Дж}/\text{с} \cdot ^\circ\text{C}} = \text{с}.$$

Введенную величину назовём *постоянной времени нагрева* помещения.

Введём обозначение:

$$\frac{P}{\lambda} = \tau_y. \quad (7.21)$$

Определим единицу введенной величины  $\tau_y$ :

$$[\tau_y] = \frac{\text{Вт}}{\text{Дж}/\text{с} \cdot ^\circ\text{C}} = ^\circ\text{C}.$$

Введенную величину назовём *установившимся превышением температуры* помещения над температурой окружающей среды.

Перепишем уравнение:

$$T \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_y. \quad (7.22)$$

Решение уравнения даёт закон нагревания (охлаждения) отапливаемого помещения во времени:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (7.23)$$

где  $\tau_{нач}$  – начальное превышение температуры помещения над температурой окружающей среды, °С.

В установившемся режиме отопления мощность теплоносителя, которая вводится в помещение  $P$ , равна мощности теплоты  $\lambda\tau$ , отдаваемой в окружающую среду, то есть:

$$P = \lambda\tau. \quad (7.24)$$

В свою очередь превышение температуры помещения над температурой окружающей среды запишем следующим образом:

$$\tau = \vartheta - \vartheta_{ср}, \quad (7.25)$$

где  $\vartheta$  – заданная температура отапливаемого помещения, °С;

$\vartheta_{ср}$  – температура окружающей среды (наружного воздуха), °С.

Известно, что в течение суток температура наружного воздуха изменяется по синусоидальному закону:

$$\vartheta_{ср} = \vartheta_0 + \vartheta_m \sin(\omega t + \psi_\vartheta), \quad (7.26)$$

где  $\vartheta_0$  – среднесуточная температура наружного воздуха, °С;

$\vartheta_m$  – амплитуда колебания температуры наружного воздуха, °С;

$\omega$  – круговая частота колебательного процесса, *рад/ч*;

$t$  – текущее время, *ч*;

$\psi_\vartheta$  – начальная фаза колебания температуры наружного воздуха,  
*рад*.

Запишем выражение круговой частоты колебания температуры наружного воздуха:

$$\omega = 2\pi f, \quad (7.27)$$

$$f = \frac{1}{T}, \quad (7.28)$$

где  $f$  – частота колебания температуры наружного воздуха, *1/ч*;

$T$  – период колебания температуры наружного воздуха, *ч*.

Принимаем период колебаний температуры наружного воздуха равным 24 часам. Тогда частота колебания температуры наружного воздуха равна 1/24 колебаний за час.

Определяем значение круговой частоты колебания температуры наружного воздуха:

$$\omega = \frac{2\pi}{24} = \frac{\pi}{12} \text{рад/ч}. \quad (7.29)$$

Принимаем температуру помещения равной 18 °С.

Тогда превышение температуры помещения над температурой окружающей среды запишем следующим образом:

$$\tau = 18 - \vartheta_0 + \vartheta_m \sin\left(\frac{\pi}{12}t + \psi_\vartheta\right). \quad (7.30)$$

В результате получаем выражение мощности теплоносителя, поступающей в помещение, во времени:

$$P = \lambda \left( 18 - \vartheta_0 + \vartheta_m \sin \left( \frac{\pi}{12} t + \psi_\vartheta \right) \right). \quad (7.31)$$

Полученное выражение позволяет регулировать во времени суток мощность теплоносителя, обеспечивающую постоянную температуру в отапливаемом помещении.

### 7.3.4 Регулирование мощности теплоносителя с преобразователем «катушка в стали»

Как было показано ранее, необходимая мощность теплоносителя для отопления помещения должна быть прямо пропорциональной температуре окружающей среды, то есть:

$$P = \lambda \cdot \tau, \quad (7.32)$$

$$\tau = \vartheta - \vartheta_{cp}, \quad (7.33)$$

$$P = \lambda(\vartheta - \vartheta_{cp}). \quad (7.34)$$

где  $\lambda$  – теплоотдача отапливаемого помещения в окружающую среду, Дж/с · °С;

$\vartheta$  – требуемая температура внутри отапливаемого помещения, °С;

$\vartheta_{cp}$  – температура окружающей среды, °С.

Представим зависимость  $P = f(\vartheta_{cp})$  графически (рис. 7.11), например, при  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ .

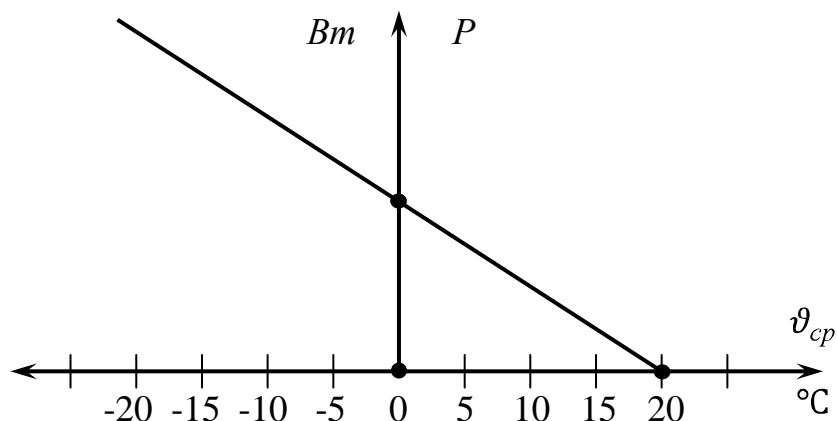


Рис. 7.11. Зависимость мощности преобразователя «катушка в стали» в функции температуры окружающей среды

Как видно из рисунка 7.10, мощность преобразователя «катушка в стали» нелинейно зависит от величины приложенного напряжения и может регулироваться путём изменения его величины. Однако регуляторы напряжения представляют собой сравнительно дорогостоящие устройства и поэтому с экономической точки зрения нерационально использовать такой метод регулирования мощности преобразователя «катушка в стали».

Предлагается для регулирования мощности теплоносителя использовать повторно – кратковременный режим работы преобразователя «катушка в стали», графически представленный на рисунке 7.12.

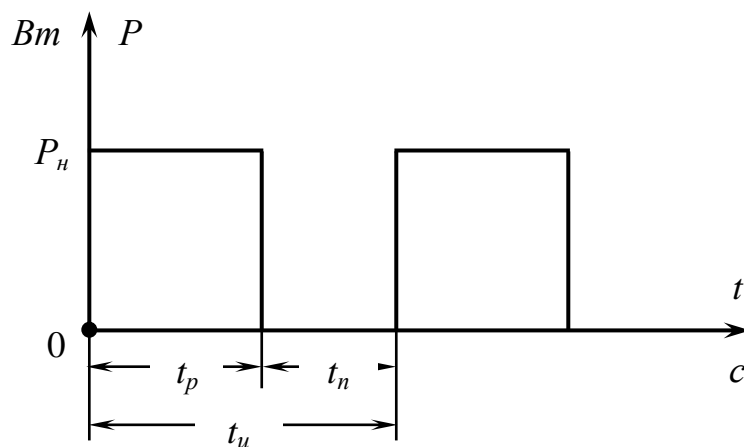


Рис. 7.12. Повторно – кратковременный режим работы преобразователя «катушка в стали»

На этом графике:

$t_u$  – длительность цикла, с;

$t_p$  – длительность работы, с;

$t_n$  – длительность паузы, с.

Запишем выражение мощности теплоносителя в повторно - кратковременном режиме работы преобразователя «катушка в стали»:

$$P = P_n \frac{t_p}{t_u}, \quad (7.35)$$

откуда:

$$t_p = t_u \frac{P}{P_n} = t_u \frac{\lambda(\vartheta - \vartheta_{cp})}{P_n}, \quad (7.36)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность преобразователя «катушка в стали», Вт.

Составляем структурную схему устройства регулирования мощности теплоносителя с преобразователем «катушка в стали» (рис.7.13)

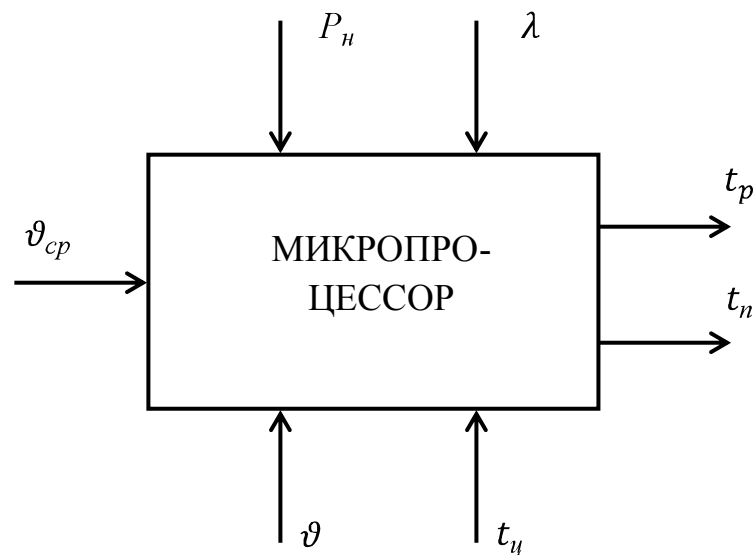


Рис. 7.13. Структурная схема регулирования мощности теплоносителя с преобразователем «катушка в стали»

### 7.3.5 Переходный процесс при включении преобразователя «катушка в стали» в сеть

Так как преобразователь «катушка в стали» работает с частыми включениями, то необходимо исследовать переходный процесс в цепи преобразователя при его включении в сеть.

Для этого запишем комплекс полного сопротивления цепи (рис.7.6) между точками 3 и 4:

$$Z_{34} = \frac{r_3 \cdot jx_L}{r_3 + jx_L} = r_{34} + jx_{34}. \quad (7.37)$$

Общее активное сопротивление цепи:

$$r = r_k + r_{34}. \quad (7.38)$$

Индуктивность цепи:

$$L = \frac{X_{34}}{\omega}. \quad (7.39)$$

Составляем расчётную схему цепи в момент коммутации (рис. 7.14)

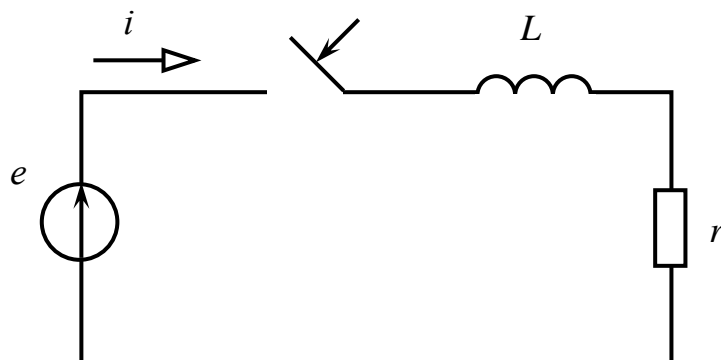


Рис. 7.14. Расчётная схема цепи в момент коммутации

Пусть катушка подключается к источнику гармонической э.д.с.:

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi). \quad (7.40)$$

Для этой цепи в послекоммутационный период справедливо уравнение:

$$L \frac{di}{dt} + ri = e \quad (7.41)$$

или

$$\tau \frac{di}{dt} + ri = \frac{E_m}{r} \sin(\omega t + \psi), \quad (7.42)$$

где

$$\tau = \frac{L}{r}. \quad (7.43)$$

Решение уравнения можно записать в виде суммы свободной и принуждённой составляющих:

$$i = i_{np} + i_{св}. \quad (7.44)$$

Принуждённый (установившийся) ток в цепи:

$$i_{np} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (7.45)$$

где

$$I_m = \frac{E_m}{z}; \quad z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}; \quad \varphi = \left| \arctg \frac{\omega L}{r} \right|. \quad (7.46)$$

Свободный ток:

$$i_{св} = Ae^{-\frac{t}{T}}. \quad (7.47)$$

Для переходного тока справедливо выражение:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-\frac{t}{T}}. \quad (7.48)$$

Найдём постоянную интегрирования из начальных условий:

при  $t=0$   $i(0)=0$ , поэтому:

$$A = -I_m \sin(\psi - \varphi). \quad (7.49)$$

Окончательно получим:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{T}}. \quad (7.50)$$

Анализ полученного выражения переходного тока показывает, что при определённых значениях  $\psi$  и  $\varphi$  мгновенное значение переходного тока  $i$  может превышать амплитудное значение установившегося тока. Однако, так как постоянная времени этой цепи имеет небольшое значение, то такое превышение тока над амплитудным значением будет незначительным.

Поэтому можно сделать вывод о том, что переходный процесс при включении преобразователя «катушка в стали» в сеть не имеет негативных последствий.

### 7.3.6 Переходный процесс при выключении преобразователя «катушка в стали»

Куда более опасным является переходный процесс при отключении преобразователя «катушка в стали» от сети, так как в этом случае могут возникать значительные перенапряжения в обмотке катушки в стали, что может привести к пробоем витковой изоляции обмотки.

Для ликвидации возможного повышения напряжения в обмотке катушки в стали при её отключении от сети предусмотрим параллельное включение катушке конденсатора. Ёмкость конденсатора рассчитаем таким образом, чтобы наблюдалось полная компенсация реактивной мощности индуктивности катушки в стали.

Рассмотрим переходный процесс при отключении преобразователя «катушка в стали» от сети, параллельно которому включен конденсатор. Составим расчетную схему переходного процесса (рис. 7.15):

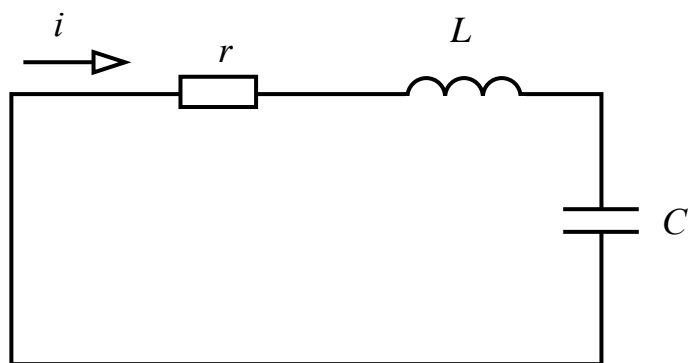


Рис. 7.15. Расчётная схема переходного процесса при отключении преобразователя «катушка в стали» от сети.

На расчетной схеме:

$C$  – емкость конденсатора,  $\Phi$ .

Представим расчетную схему переходного процесса в операторной форме (рис. 7.16):

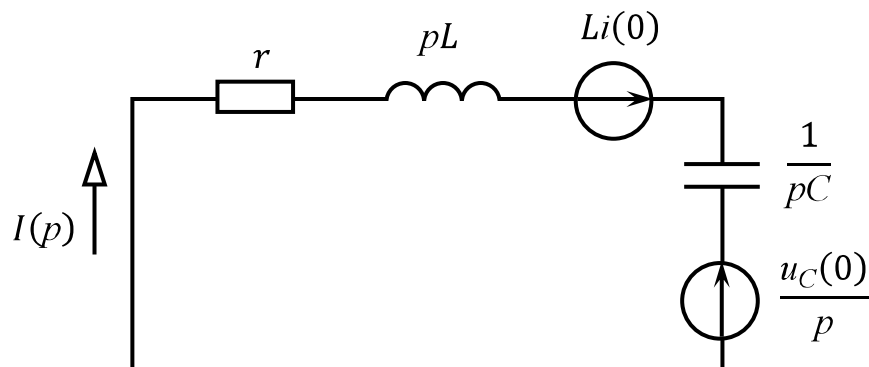


Рис. 7.16. Расчётная схема переходного процесса в операторной форме.

Запишем выражение переходного тока в операторной форме:

$$I(p) = \frac{Li(0) - \frac{u_C(0)}{p}}{r + pL + \frac{1}{pC}}. \quad (7.51)$$

В другом виде выражение переходного тока запишем следующим образом:

$$I(p) = \frac{\varphi(p)}{F(p)}, \quad (7.52)$$

где

$$\varphi(p) = Li(0) - \frac{u_C(0)}{p}, \quad (7.53)$$

$$F(p) = r + pL + \frac{1}{pC}. \quad (7.54)$$

Находим выражение переходного тока по теореме разложения:

$$i = \sum_1^n \frac{\varphi(p_k)}{F'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (7.55)$$

где  $p_k$  – корни уравнения  $F(p) = 0$ ,

$$F'(p_k) = L - \frac{1}{p_k^2 C}$$

Находим выражения корней из уравнения:

$$r + pL + \frac{1}{pC} = 0 \quad (7.56)$$

или

$$p^2 LC + prC + 1 = 0. \quad (7.57)$$

$$p_{1,2} = \frac{-rC \pm \sqrt{(rC)^2 - 4LC}}{2LC}. \quad (7.58)$$

Тогда выражение переходного тока будет иметь следующий вид:

$$i = \frac{Li(0) - \frac{u_C(0)}{p_1}}{L - \frac{1}{p_1^2 C}} e^{p_1 t} + \frac{Li(0) - \frac{u_C(0)}{p_2}}{L - \frac{1}{p_2^2 C}} e^{p_2 t}, \quad (7.59)$$

Анализ полученного выражения переходного тока показывает, что послекоммутационный период ток изменяется во времени с того значения, которое он имеет в момент коммутации, до нуля по экспоненциальному закону. Таким образом, перенапряжение в цепи обмотки катушки исключается.

### 7.3.7 Обоснование параметров преобразователя «катушка в стали»

Составляем методику исследования параметров преобразователя «катушка в стали» на основании экспериментальных данных (таблица , рис. ).

1. Определяем полную мощность, потребляемую преобразователем:

$$S = U \cdot I, \quad (7.60)$$

где  $U$  – действующее значение напряжения на зажимах преобразователя,  $B$ ;

$I$  – действующее значение силы электрического тока, потребляемого преобразователем,  $A$ .

2. Определяем коэффициент мощности преобразователя:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}, \quad (7.61)$$

где  $P$  – активная мощность, потребляемая преобразователем,  $Wm$ ;

3. Определяем угол сдвига фаз преобразователя:

$$\varphi = \arccos \frac{P}{S}. \quad (7.62)$$

4. Записываем комплекс действующего значения силы электрического тока преобразователя, приняв  $\psi_u = 0$ :

$$\dot{i} = I e^{j\varphi}. \quad (7.63)$$

5. Определяем комплекс полного сопротивления преобразователя:

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{i}}. \quad (7.64)$$

6. Определяем комплекс полного сопротивления на участке 3 – 4 расчетной схемы (рис. ):

$$Z_{34} = Z - r_k = r_{34} + jx_{34}. \quad (7.65)$$

7. Преобразуем последовательное соединение сопротивления на участке 3 – 4 расчетной схемы в эквивалентное параллельное:

$$g_{34} = \frac{r_{34}}{Z_{34}^2}, \quad (7.66)$$

$$b_{34} = \frac{x_{34}}{Z_{34}^2}, \quad (7.67)$$

где  $g_{34}$  – активная проводимость участка 3 – 4, См;

$b_{34}$  – реактивная проводимость участка 3 – 4, См.

8. Определяем сопротивление параллельных ветвей участка 3 – 4:

$$r_{\parallel} = \frac{1}{g_{34}}, \quad (7.68)$$

$$x_L = \frac{1}{b_{34}}. \quad (7.69)$$

9. Определяем комплекс действующего значения напряжения на участке 3 – 4:

$$\dot{U}_{34} = Z_{34} \dot{I}. \quad (7.70)$$

10. Определяем комплекс действующего значения активной составляющей электрического тока на участке 3 – 4:

$$i_a = \frac{\dot{U}_{34}}{r_\vartheta} \quad (7.71)$$

11. Определяем комплекс действующего значения реактивной составляющей электрического тока на участке 3 – 4:

$$i_p = \frac{\dot{U}_{34}}{x_L} \quad (7.72)$$

12. Определяем сопротивление обмотки преобразователя:

$$r_k = \rho \frac{l}{s} \quad (7.73)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода обмотки преобразователя,  $Ом \cdot мм^2/м$ ;

$l$  – длина провода обмотки преобразователя,  $м$ ;

$s$  – площадь поперечного сечения провода обмотки преобразователя,  $мм^2$ .

В свою очередь длина провода обмотки:

$$l = \sum_{i=1}^n \pi d_i w_i \quad (7.74)$$

где  $d_i$  – диаметр витка провода обмотки  $i$ -го слоя,  $м$ ;

$w_i$  – число витков провода обмотки  $i$ -го слоя.

13. Определяем число витков провода обмотки:

$$w = \sum_{i=1}^n w_i \quad (7.75)$$

14. Определяем потери активной мощности в проводе обмотки преобразователя:

$$P_{\kappa} = r_{\kappa} I^2. \quad (7.76)$$

15. Определяем потери активной мощности в стали преобразователя на вихревые токи и перемагничивание:

$$P_{\sigma} = r_{\sigma} I_a^2. \quad (7.77)$$

16. Принимаем действующее значение э.д.с. самоиндукции равным действующему значению напряжения на участке 3 – 4, то есть:

$$E_L = \dot{U}_{34}. \quad (7.78)$$

17. Записываем выражение действующего значения э.д.с. самоиндукции:

$$E_L = 4,44 f w \Phi_m, \quad (7.79)$$

где  $f$  – частота электрического тока, Гц;

$\Phi_m$  – амплитудное значение магнитного потока, создаваемого электрическим током катушки.

18. Находим выражение для определения амплитуды магнитного потока, создаваемого электрическим током катушки:

$$\Phi_m = \frac{E_L}{4,44 f w}. \quad (7.80)$$

19. Определяем индуктивность катушки в стали преобразователя:

$$L = \frac{x_L}{\omega}, \quad (7.81)$$

где

$$\omega = 2\pi f. \quad (7.82)$$

Рассчитаем значения физических величин:  $S$ ,  $\cos\varphi$ ,  $\varphi$ ,  $\dot{I}$ ,  $Z$ ,  $Z_{34}$ ,  $g_{34}$ ,  $v_{34}$ ,  $r_{\sigma}$ ,  $x_L$ ,  $\dot{U}_{34}$ ,  $\dot{I}_a$ ,  $\dot{I}_p$ ,  $r_k$ ,  $P_{\sigma}$ ,  $E_L$ ,  $\Phi_m$ ,  $L$ , используя данные эксперимента (таблица 7.1). Результаты расчетов заносим в таблицу 7.2. Строим зависимость  $P = f(\Phi_m)$  (рис. 7.17).

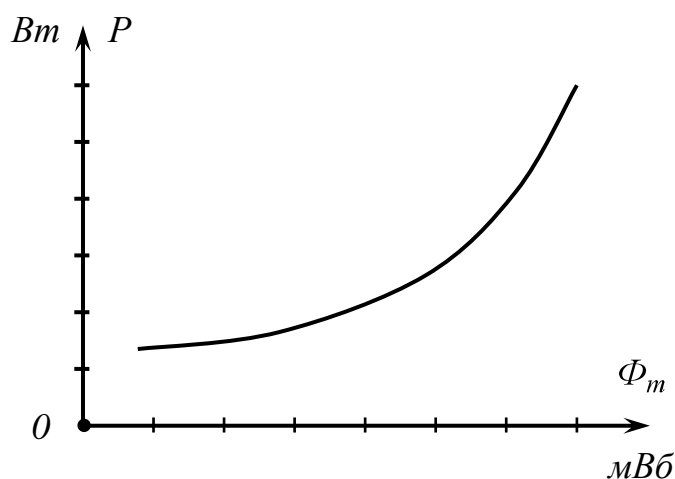


Рис. 7.17 Зависимость  $P = f(\Phi_m)$  преобразователя «катушка в стали»

Составляем эквивалентную конструктивную схему магнитопровода преобразователя «катушка в стали» (рис. 7.18):

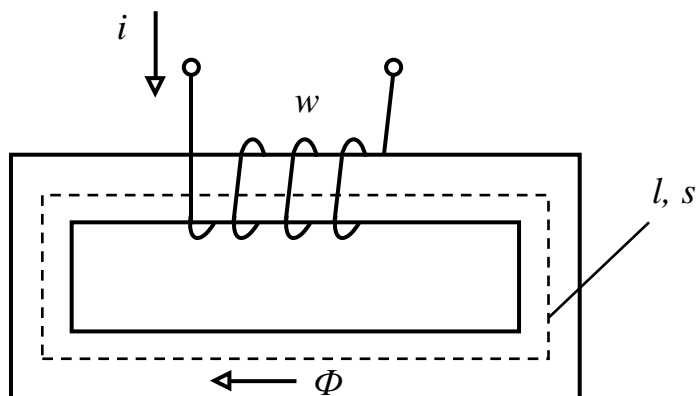


Рис. 7.18 Конструктивная схема магнитопровода преобразователя «катушка в стали»

На схеме:

$w$  – число витков обмотки;

$l$  – длина средней магнитной силовой линии,  $m$ ;

$s$  – эквивалентное сечение магнитопровода,  $m^2$ .

Запишем уравнение для магнитной цепи преобразователя по закону полного тока, приняв магнитное поле в магнитопроводе однородным:

$$wi = Hl, \quad (7.83)$$

где  $i$  – мгновенный переходный синусоидальный ток,  $A$ ;

$H$  – напряженность магнитного поля,  $A/m$ .

Выразим напряженность магнитного поля через магнитную индукцию:

$$H = \frac{B}{\mu_c}, \quad (7.84)$$

где  $B$  – магнитная индукция магнитного поля,  $Tл$ ;

$\mu_c$  – магнитная проницаемость материала магнитопровода,  $Гн/м$ .

Подставим (7.84) в (7.83) и получим:

$$wi = \frac{B}{\mu_c} l. \quad (7.85)$$

Выразим магнитную индукцию через магнитный поток:

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (7.86)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток,  $Вб$ .

Подставим (7.86) в (7.85) и получим:

$$wi = \Phi \frac{l}{\mu_c S} \quad (7.87)$$

Обозначим:

$$\frac{l}{\mu_c S} = R_M \quad (7.88)$$

и назовем  $R_M$  магнитным сопротивлением.

Найдем единицу магнитного сопротивления:

$$[R_M] = \frac{M}{\Gamma_H / M \cdot M^2} = \frac{1}{\Gamma_H} = \frac{1}{\text{Ом} \cdot c}$$

Перепишем уравнение (7.87):

$$wi = \Phi R_M \quad (7.89)$$

Найдем из (7.89) магнитный поток:

$$\Phi = \frac{wi}{R_M} \quad (7.90)$$

или

$$\Phi = \frac{w\mu_c S}{l} i \quad (7.91)$$

Перепишем (7.91) для амплитудных значений:

$$\Phi_M = \frac{w\mu_c S}{l} I_M \quad (7.92)$$

Анализ уравнения (7.92) и рис. 7.17 показывают, что активная мощность, развиваемая преобразователем «катушка в стали», прямопропорциональна

- числу витков обмотки,
  - абсолютной магнитной проницаемости материала магнитопровода,
  - площади поперечного сечения магнитопровода,
  - амплитудному значению силы электрического тока в обмотке
- и обратнопропорциональна длине средней магнитной силовой линии.

В свою очередь амплитудное значение силы электрического тока в обмотке описывается следующим выражением:

$$I_M = \frac{U_M}{Z}, \quad (7.93)$$

где  $Z$  – полное сопротивление преобразователя «катушка в стали», Ом.

В свою очередь комплекс полного сопротивления преобразователя:

$$Z = r_k + \frac{r_g \cdot jx_L}{r_g + jx_L}. \quad (7.94)$$

$$r_k = \rho \frac{l_n}{S_n}. \quad (7.95)$$

Таким образом, активная мощность, развиваемая преобразователем «катушка в стали» есть функция:

$$= f(w, \mu_c, S, l, U_M, \rho, l_n, S_n). \quad (7.96)$$

Таблица 7.2 – Результаты расчетов параметров преобразователя «катушка в стали»

№ п/п	$U, В$	$P, Вт$	$I, А$	$S, ВА$	$\cos \varphi$	$\varphi$	$\dot{i}, А$	$Z, Ом$	$Z_{34}, Ом$	$q_{34}, См$
1	220	3600	20,5	4510	0,8	37°	$20,5 \cdot e^{-j37^\circ}$	$10,7 \cdot e^{j37^\circ} = 8,56 + j6,42$	$8,36 + j6,42 = 10,54 \cdot e^{j37^\circ}$	0,075
2	210	2900	17,5	3675	0,8	37°	$17,5 \cdot e^{-j37^\circ}$	$12,0 \cdot e^{j37^\circ} = 9,6 + j7,2$	$9,4 + j7,2 = 12,0 \cdot e^{j37^\circ}$	0,065
3	200	2500	15,3	3060	0,8	37°	$15,3 \cdot e^{-j37^\circ}$	$13,07 \cdot e^{j37^\circ} = 10,46 + j7,8$	$10,26 + j7,8 = 13,07 \cdot e^{j37^\circ}$	0,06
4	190	2000	12,0	2280	0,87	30°	$12,0 \cdot e^{-j30^\circ}$	$14,3 \cdot e^{j30^\circ} = 12,44 + j7,15$	$12,24 + j7,15 = 14,2 \cdot e^{j30^\circ}$	0,06
5	180	1750	10,8	1944	0,9	26°	$10,8 \cdot e^{-j26^\circ}$	$15,0 \cdot e^{j26^\circ} = 13,5 + j6,6$	$13,3 + j6,6 = 15,0 \cdot e^{j26^\circ}$	0,059
6	170	1400	9,3	1581	0,88	28°	$9,3 \cdot e^{-j28^\circ}$	$15,7 \cdot e^{j28^\circ} = 13,8 + j7,38$	$13,6 + j7,38 = 15,7 \cdot e^{j28^\circ}$	0,055
7	160	1150	8,3	1328	0,87	30°	$8,3 \cdot e^{-j30^\circ}$	$17,2 \cdot e^{j30^\circ} = 14,96 + j8,6$	$14,76 + j8,6 = 17,2 \cdot e^{j30^\circ}$	0,050
8	150	900	7,3	1245	0,72	44°	$7,3 \cdot e^{-j44^\circ}$	$18,0 \cdot e^{j44^\circ} = 12,96 + j12,4$	$12,76 + j12,4 = 18,0 \cdot e^{j44^\circ}$	0,039
9	140	750	7,0	1042	0,72	44°	$7,0 \cdot e^{-j44^\circ}$	$20,0 \cdot e^{j44^\circ} = 14,4 + j13,8$	$14,2 + j13,8 = 20,0 \cdot e^{j44^\circ}$	0,036

$b_{34}, C_M$	$r_9, OM$	$x_L, OM$	$\dot{U}_{34}, B$	$\dot{I}_a, A$	$\dot{I}_p, A$	$r_k, OM$	$P_k, Bm$	$P_9, Bm$	$E_L, B$	$\Phi_M, B\delta$	$L, MГH$
0,058	13,3	18,5	216	16,2	$11,6 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	84,05	3490	220	0,0024	58,9
0,05	15,4	20,0	210	13,0	$10,5 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	61,25	2602	210	0,0023	63,7
0,037	16,6	27,0	200	12,0	$7,4 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	46,80	2390	200	0,0022	68,0
0,035	16,7	28,5	190	11,3	$6,6 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	28,80	2132	190	0,0021	90,7
0,029	16,9	34,5	180	10,65	$5,2 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	23,32	1916	180	0,0020	109,8
0,03	18,2	33,3	170	9,34	$5,1 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	17,30	1587	170	0,0019	106,0
0,03	20,0	34,5	160	8,0	$4,63 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	13,77	1280	160	0,0018	109,8
0,038	25,6	26,3	150	5,86	$5,7 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	10,65	879	150	0,0016	83,7
0,034	27,8	30,3	140	5,04	$4,62 \cdot e^{j90^\circ}$	0,2	9,80	706	140	0,0015	96,5

## **7.4 Разработка проточного водонагревателя трансформаторного типа**

Одной из наиболее важных и сложных проблем в развитии экономики является проблема энергосбережения, повышения эффективности производства тепловой энергии. В настоящее время горячее водоснабжение и обогрев жилых и промышленных помещений в крупных городах и промышленных центрах осуществляется с помощью таких источников тепловой энергии, как ТЭЦ, в небольших городах и поселках - с помощью котельных и печного отопления. Особенно остро стоит проблема получения тепла в небольших населенных пунктах и фермерских хозяйствах, удаленных от тепломагистрали жилых зданиях. Традиционные источники тепловой энергии обладают рядом существенных недостатков: низкий КПД, определенные сложности в доставке тепла потребителю и т.д. Необходимость строительства ТЭЦ и котельных в непосредственной близости от потребителя ухудшает экологическую обстановку в жилых микрорайонах. Поэтому представляет значительный интерес получение горячей воды и непосредственный обогрев таких объектов с помощью электронагрева, реализация которого не требует значительных капиталовложений, строительных работ и постоянного обслуживающего персонала.

Наиболее распространенными типами электронагревательных устройств являются установки, выполненные на основе трубчатых нагревательных элементов (ТЭН), электродные электроводонагреватели, электронагреватели с открытыми тепловыделяющими элементами и установки индукционного нагрева. Основными недостатками этих видов электроприборов являются их низкая надежность и недостаточный уровень безопасности в эксплуатации. Устранение указанных недостатков может быть достигнуто путем использования электронагревательных устройств трансформаторного типа. Они представляют собой понижающий трансформатор, первичная обмотка кото-

рого подключена к сети, а вторичная обмотка замкнута накоротко и является тепловыделяющим элементом.

Практическая ценность работы заключается в решении крупной научно-технической задачи по созданию нового энергетического оборудования для систем горячего водоснабжения и отопления, отвечающего современным требованиям и соответствующего уровню лучших мировых образцов, разработке и исследовании новых конструкций нагревательных элементов на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, создании методик и алгоритмов электромагнитных и тепловых расчётов предложенных устройств и реализации их в виде пакетов прикладных программ, ориентированных на использование современных ЭВМ, разработке рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок и размерных соотношений для проектирования однофазных и трёхфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой различной мощности, создании макетных образцов и освоении серийного производства электронагревательных устройств на основе нагревательных элементов трансформаторного типа.

При всём многообразии конструкций следует выделить основные группы НЭ (резистивные, электродные, индукционные и трансформаторного типа), которые нашли наиболее широкое применение в промышленном производстве и в быту. Установлено, что элементы первой и второй групп обладают рядом существенных недостатков, ограничивающих область применения таких устройств. Этими недостатками являются низкий класс электробезопасности, невысокая надёжность и долговечность, а нагревательные элементы индукционного типа имеют низкий коэффициент мощности. В результате анализа производства и применения установок электронагрева в стране и за рубежом, прогнозов развития теплоэнергетики и тенденций развития технического уровня электронагревателей отмечено развитие разработок широкого спектра электронагревательных приборов. Такие приборы должны обеспечивать высокую степень защиты от поражения электрическим током,

иметь простую и технологичную конструкцию, большой срок службы, невысокую стоимость, хорошие эксплуатационные и массогабаритные показатели, высокий КПД и коэффициент мощности.

Показано, что одним из наиболее эффективных путей повышения надёжности и безопасности систем децентрализованного горячего водоснабжения и отопления небольших промышленных и сельскохозяйственных предприятий и бытового сектора является применение в качестве нагревательных элементов однофазных и трёхфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой (КЗО), являющейся тепловыделяющим элементом.

Вариант такого водонагревателя приведен на рисунке 7.17.

Проточный водонагреватель содержит основной магнитопровод 1, с первичной обмоткой 2, в середине магнитопровода 1 введен передвижной магнитный шунт 3 и короткозамкнутая труба 4.

Водонагреватель работает следующим образом. К первичной обмотке 2 подводится переменное синусоидальное напряжение, под действием которого в обмотке создаётся переменный синусоидальный ток. Этот ток создаёт переменное магнитное поле, которое замыкается по основному магнитопроводу 1 и магнитному шунту. Вследствие этого в короткозамкнутой трубе 4 создаётся электродвижущая сила, под действием которой в трубе возникает переменный синусоидальный ток и вследствие теплового действия электрического тока короткозамкнутая труба 4 нагревается и отдаёт теплоту воде, которая проходит через неё.

Часть магнитного потока замыкается через магнитный шунт 3 и частично через основной магнитопровод 1, а магнитный поток, который пронизывает короткозамкнутую трубу 4, регулируется движением магнитного шунта. Так происходит регулирование мощности в короткозамкнутой трубе 4.

На проточный водонагреватель трансформаторного типа получен патент на полезную модель №38435 от 12.01.2009 года.

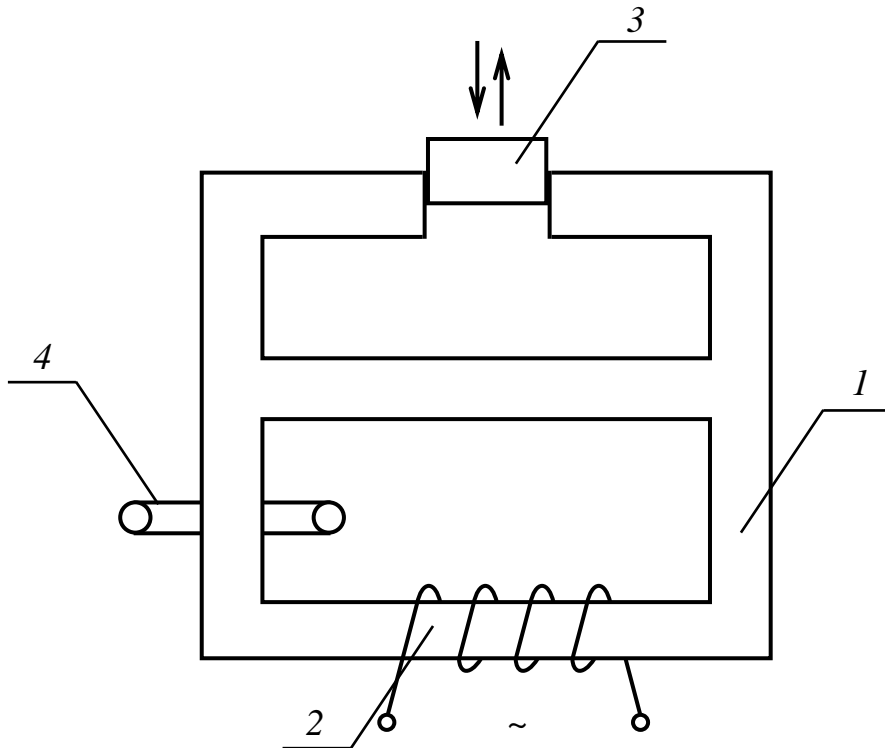


Рис. 7.17 Проточный водонагреватель трансформаторного типа

На рисунке:

- 1 – основной магнитопровод;
- 2 – обмотка;
- 3 – шунт;
- 4 – короткозамкнутая труба.

## 7.5 Использование ветровой энергии для электроотопления

### 7.5.1 Физические основы использования ветровой энергии

Ветер – один из возобновляемых источников энергии.

Ветер представляет собой механическое движение воздушных масс.

Запишем выражение кинетической энергии ветра:

$$W_в = \frac{m\vartheta_в^2}{2}, \quad (7.97)$$

где  $m$  – масса воздуха, кг;

$\vartheta_в$  – скорость ветра, м/с.

Массу воздуха, который проходит за одну секунду через определенную площадь пространства, запишем следующим образом:

$$m = \rho S \vartheta_в, \quad (7.98)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь пространства, м<sup>2</sup>.

Подставим (7.98) в (7.97) и получим выражение мощности воздушно-го потока:

$$P = \frac{1}{2} \rho S \vartheta_в^3. \quad (7.99)$$

$$[P] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{с}^3} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Принимаем для определенных условий:

$$\rho = 1,32 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Тогда выражение (7.3) запишется следующим образом:

$$P = \frac{S \vartheta_в^3}{1500}, \quad (7.100)$$

где  $P$  – мощность ветрового потока, кВт.

## 7.5.2 Обоснование конструктивных и энергетических параметров ветроэнергетической установки с вращающимся парусом

Рассмотрим конструкцию ветроэнергетической установки с вращающимся парусом с вертикальной или горизонтальной осью (рис. 7.18).

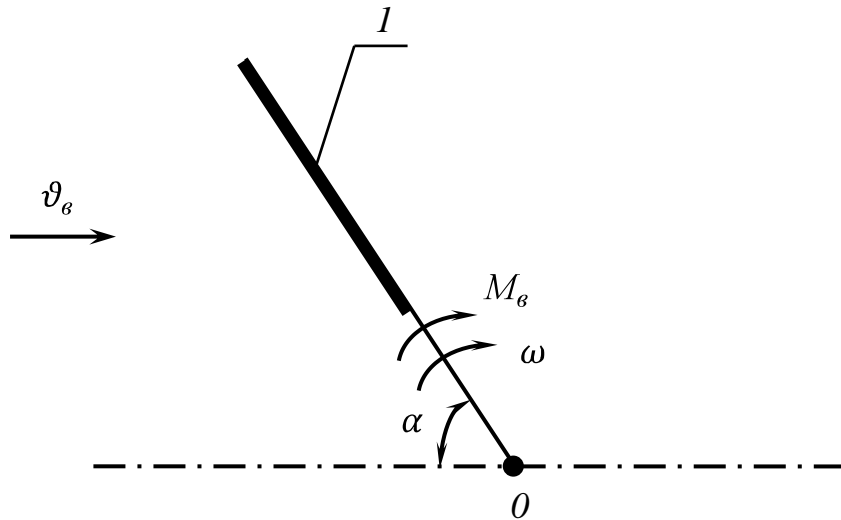


Рис. 7.18 Кинематическая схема ветроэнергетической установки с вращающимся парусом.

На схеме:

1 – парус площадью  $S$ ;

$M_g$  – вращающий момент, создаваемый ветром,  $H$ ;

$\omega$  – угловая скорость вращения паруса,  $rad/c$ ;

$\alpha$  – угол отклонения паруса от горизонтальной оси,  $rad$ ;

$v_g$  – скорость ветра,  $m/c$ .

Запишем выражение механической силы, создаваемой ветром при  $\alpha = 90^\circ$ :

$$F_g = \frac{1}{2} \rho S v^2, \quad (7.101)$$

где  $v$  – скорость ветра относительно паруса,  $m/c$ .

$$[F_6] = \frac{\kappa \mathcal{L}}{M^3} \cdot M^2 \cdot \frac{M^2}{c^2} = \frac{\kappa \mathcal{L} \cdot M^2}{c^3} = \frac{\kappa \mathcal{L} \cdot M}{c^2} = H.$$

Запишем выражение вращающего момента, создаваемого ветром при  $\alpha = 90^\circ$ :

$$M_6 = \frac{1}{2} \rho S \vartheta^2 R, \quad (7.102)$$

где  $R$  – радиус центра паруса,  $m$ .

При движении паруса скорость ветра относительно паруса меньше скорости ветра на величину линейной скорости центра паруса, то есть:

$$\vartheta = \vartheta_6 - \vartheta_n, \quad (7.103)$$

где  $\vartheta_6$  – скорость ветра,  $m/c$ ;

$\vartheta_n$  – линейная скорость центра паруса,  $m/c$ .

В свою очередь линейная скорость центра паруса:

$$\vartheta_n = \omega R. \quad (7.104)$$

Тогда при угле отклонения паруса от горизонтальной оси  $\alpha = 90^\circ$  можем записать:

$$F_6 = \frac{1}{2} \rho S (\vartheta_6 - \omega R)^2, \quad (7.105)$$

$$M_6 = \frac{1}{2} \rho S (\vartheta_6 - \omega R)^2 \cdot R. \quad (7.106)$$

При угле отклонения паруса от горизонтальной оси меньше или больше  $90^\circ$  выражения (7.105) и (7.106) переписутся следующим образом:

$$F_{\vartheta} = \frac{1}{2} \rho S (\vartheta_{\vartheta} - \omega R)^2 \cdot \sin \alpha, \quad (7.107)$$

$$M_{\vartheta} = \frac{1}{2} \rho S (\vartheta_{\vartheta} - \omega R)^2 \cdot \sin \alpha \cdot R. \quad (7.108)$$

Перепишем выражения (7.107) и (7.108):

$$F_{\vartheta} = F_{\vartheta, M} \sin \alpha, \quad (7.109)$$

$$M_{\vartheta} = M_{\vartheta, M} \sin \alpha, \quad (7.110)$$

где

$$F_{\vartheta, M} = \frac{1}{2} \rho S (\vartheta_{\vartheta} - \omega R)^2, \quad (7.111)$$

$$M_{\vartheta, M} = \frac{1}{2} \rho S (\vartheta_{\vartheta} - \omega R)^2 \cdot R. \quad (7.112)$$

Представим графическую зависимость  $M_{\vartheta} = f(\alpha)$  на рис. 7.19.

Рассмотрим работу энергетической установки, у которой на оси расположены 6 парусов через каждые  $60^\circ$  поворота и рассчитаем суммарный вращающий момент в функции угла поворота, создаваемый тремя одновременно наводящимися над горизонтальной осью парусами.

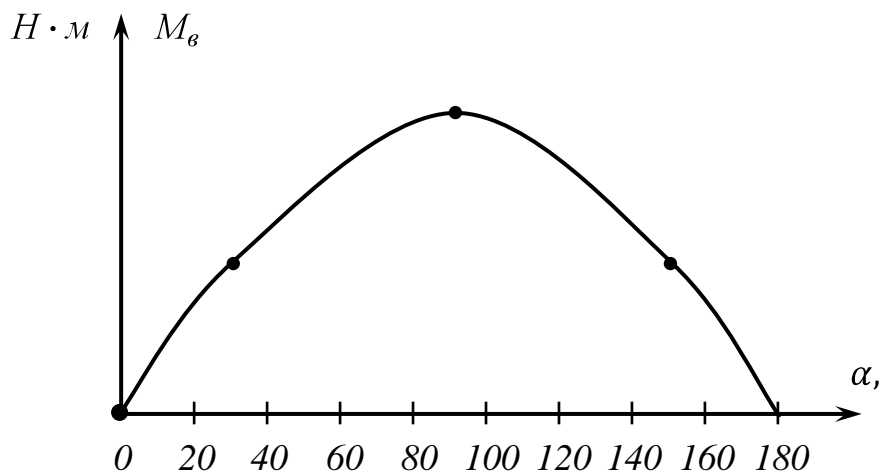


Рис. 7.19 Зависимость  $M_{\vartheta} = f(\alpha)$

Запишем его выражение:

$$M_{\text{вс}} = M_{\text{в1}} + M_{\text{в2}} + M_{\text{в3}} + M_{\text{в4}} + M_{\text{в5}} + M_{\text{в6}}, \quad (7.113)$$

где

$$M_{\text{в1}} = M_{\text{вм}} \sin \alpha, \quad (7.114)$$

$$M_{\text{в2}} = M_{\text{вм}} \sin(\alpha + 60^\circ), \quad (7.115)$$

$$M_{\text{в3}} = M_{\text{вм}} \sin(\alpha + 120^\circ), \quad (7.116)$$

$$M_{\text{в4}} = M_{\text{вм}} \sin(\alpha - 60^\circ), \quad (7.117)$$

$$M_{\text{в5}} = M_{\text{вм}} \sin(\alpha - 120^\circ), \quad (7.118)$$

$$M_{\text{в6}} = M_{\text{вм}} \sin(\alpha - 180^\circ), \quad (7.119)$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Результаты расчетов суммарного вращающего момента в функции угла поворота, создаваемого тремя одновременно наводящимися над горизонтальной осью парусами

$\alpha$ , град первого паруса	0	30	60	90	120	150	180
$\frac{M_{\text{в1}}}{M_{\text{вм}}}$	0,0	0,5	0,865	1	0,865	0,5	0,0
$\frac{M_{\text{в2}}}{M_{\text{вм}}}$	0,865	1	0,865	0,5	0	-	-
$\frac{M_{\text{в3}}}{M_{\text{вм}}}$	0,865	0,5	-	-	-	-	-

$\frac{M_{64}}{M_{6M}}$	-	-	0	0,5	0,865	1	0,865
$\frac{M_{65}}{M_{6M}}$	-	-	-	-	0	0,5	0,865
$\frac{M_{66}}{M_{6M}}$	-	-	-	-	-	-	0
$\frac{M_{6c}}{M_{6M}}$	1,73	2	1,73	2	1,73	2	1,73

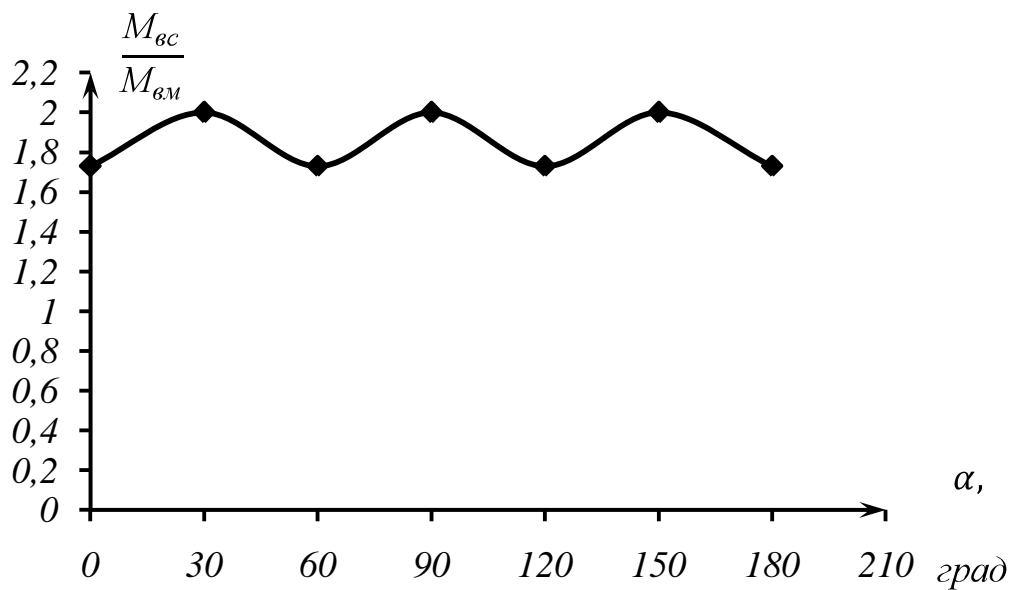


Рис. 7.20 Зависимость  $\frac{M_{6c}}{M_{6M}} = f(\alpha)$ .

Как видно из графика, среднее значение  $\frac{M_{6c}}{M_{6M}} = 1,86$ .

Таким образом, применение ветроэнергетической установки с шестью парусами при одновременной работе только трех, находящихся над горизонтальной осью, позволяет получить равномерную устойчивую работу ветроустановки.

## РАЗДЕЛ 8. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

### 8.1 Электротехническая система обеспечения энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя

В соответствии со структурной схемой системы обеспечения энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя (рис. 2.46) предлагается устройство, обеспечивающее энергосберегающий эксплуатационный режим работы асинхронного электродвигателя (рис. 8.1).

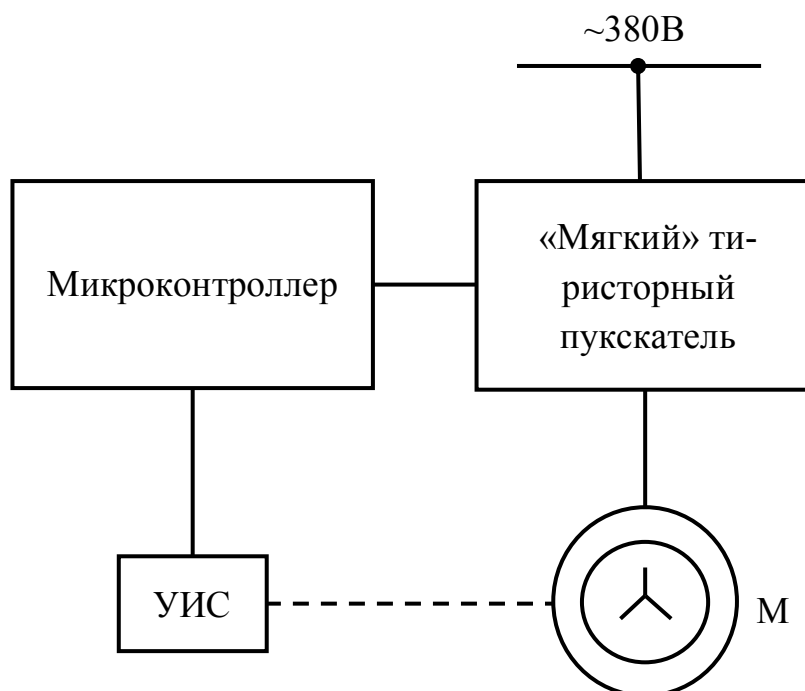


Рис. 8.1 Структурная схема устройства, обеспечивающего энергосберегающий режим работы асинхронного электродвигателя

Приводной электродвигатель М получает питание с помощью «мягкого» тиристорного пускателя. Устройство измерения скольжения (УИС) пода-

ет его значение микроконтроллеру, который по программе, изложенной в пункте 2.10, проводит анализ режима работы асинхронного электродвигателя и определяет значение оптимального коэффициента кратности приложенного напряжения и передает его «мягкому» тиристорному пускателю в виде угла отпираания синусоиды. «Мягкий» тиристорный пускатель обеспечивает необходимый уровень питающего напряжения и тем самым энергосберегающий режим работы асинхронного электродвигателя.

Применение описанного устройства экономически оправдано только для электродвигателей определенной мощности, коэффициентов загрузки приводной рабочей машины, им соответствующим оптимальным кратностям приложенного напряжения и длительности работы рабочей машины с неполной загрузкой.

Составляем алгоритм расчета допустимых капитальных вложений в устройство с позиции допустимых сроков их окупаемости.

Допустимые капитальные вложения в устройство, обеспечивающее энергосберегающий эксплуатационный режим работы асинхронного электродвигателя привода рабочей машины запишем следующим образом:

$$K_g = N \cdot \mathcal{E}_{год}, \quad (8.1)$$

где  $N$  – нормативный срок окупаемости устройства, лет;

$\mathcal{E}_{год}$  – годовой экономический эффект, грн/год.

$$\mathcal{E}_{год} = \Delta W_{год} \cdot \mathcal{U}_э, \quad (8.2)$$

где  $\Delta W_{год}$  – количество сэкономленной активной энергии за год, кВт · ч;

$\mathcal{U}_э$  – цена электрической энергии, грн/кВт · ч.

Количество сэкономленной активной энергии за год:

$$\Delta W_{\text{зод}} = (\Delta P_{\text{сн}} + \Delta P_{\text{мн}}) \sum_{i=1}^n T_i - \Delta P_{\text{сн}} \sum_{i=1}^n T_i \kappa_{U_{\text{ionm}}}^2 - \sum_{i=1}^n T_i \Delta P_{\text{ми}}, \quad (8.3)$$

где  $\Delta P_{\text{сн}}$  – номинальные постоянные потери, Вт;

$\Delta P_{\text{мн}}$  – номинальные переменные потери, Вт;

$T_i$  – длительность  $i$ -того времени работы рабочей машины с недогрузкой, ч;

$n$  – число периодов работы машины с недогрузкой;

$\kappa_{U_{\text{ionm}}}^{\prime}$  – оптимальная кратность величины подведенного напряжения на  $i$ -том интервале времени;

$\Delta P_{\text{ми}}^{\prime}$  – потери активной мощности на  $i$ -том интервале времени, Вт.

Последние находятся следующим образом:

$$\Delta P_{\text{ми}}^{\prime} = 3(R_1' + R_2'') I_i'^2, \quad (8.4)$$

$$\Delta P_{\text{ми}}^{\prime} = 3(R_1' + R_2'') I_i'^2 = \frac{\kappa_{U_{\text{ionm}}}^{\prime 2} U_n^2}{(R_1' + R_2''/s_i')^2 + (X_1' + X_2'')^2}, \quad (8.5)$$

где  $R_1', R_2'', X_1', X_2''$  – параметры схемы замещения, Ом;

$U_n$  – номинальное фазное напряжение, В;

$s_i'$  – скольжение электродвигателя на  $i$ -том интервале времени при оптимальной кратности приложенного напряжения.

Последнее находится следующим образом:

для электродвигателя привода рабочей машины с независимой от скорости механической характеристикой:

$$s_i' = \frac{\kappa_{zi}}{\kappa_{Uionm}} s_H, \quad (8.6)$$

где  $\kappa_{zi}$  – коэффициент загрузки рабочей машины на  $i$ -том интервале времени;

$s_H$  – номинальное скольжение электродвигателя;

для электродвигателя привода рабочей машины с линейно-возрастающей механической характеристикой:

$$s_i' = \frac{\kappa_{zi} - m_0 s_H}{(1 - s_H) \frac{\kappa_{Uionm}}{s_H} + \kappa_{zi} - m_0}, \quad (8.7)$$

где  $m_0$  – относительный момент трогания рабочей машины.

Таким образом, годовой экономический эффект от реализации энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя привода рабочей машины является сложной функцией коэффициента загрузки рабочей машины, цены на электроэнергию, параметров схемы замещения одной фазы асинхронного электродвигателя, номинального скольжения электродвигателя, номинального фазного напряжения, номинальных постоянных потерь, номинальных переменных потерь, то есть:

$$\mathcal{E}_{год} = f(\kappa_z, u_\varphi, R_1', R_2'', X_1', X_2'', s_H, m_0, U_H, \Delta P_{сн}, \Delta P_{мн}). \quad (8.8)$$

Приведем пример расчета годового экономического эффекта от реализации энергосберегающего эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя типоразмера 4A100S2У3, приняв следующие исходные данные:

$$u_{\vartheta} = 1 \frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}; \quad \Delta P_{\text{сн}} = 0,274 \text{ Вт}; \quad \Delta P_{\text{мн}} = 0,350 \text{ Вт};$$

$$\sum_{i=1}^n T_i = 3700 \text{ часов}; \quad \sum_{i=1}^n T_i \kappa_{\text{Uionm}}^2 = 1868 \text{ часов}; \quad \sum_{i=1}^n T_i \Delta P_{\text{ми}} = 814 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

Количество сэкономленной активной энергии за год:

$$\Delta W_{\text{год}} = (0,274 + 0,350)3700 - 0,274 \cdot 1868 - 814 = 983 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 983 \cdot 1 = 983 \text{ грн}.$$

Принимаем срок окупаемости равным, например, 1,5.

Тогда допустимые капитальные вложения для создания устройства обеспечения энергосберегающего режима работы электродвигателя типоразмера 4A100S2Y3 равны:

$$K_{\text{с}} = 1,5 \cdot 983 = 1474,6 \text{ грн}.$$

## **8.2 Электротехническая система обеспечения дистанционного диагностирования ресурсосберегающих эксплуатационных режимов работы силового трансформатора и асинхронного электродвигателя**

Силовые трансформаторы потребительских трансформаторных подстанций, как правило, постоянно не обслуживаются. Поэтому могут подвергаться неконтролируемым эксплуатационным воздействиям (перегрузкам, воздействиям пусковых токов электродвигателей в условиях соизмеримой мощности, воздействиям токов короткого замыкания на отходящих линиях

электропередачи, температуры окружающей среды, солнечной радиации, утере трансформаторного масла). Указанные эксплуатационные воздействия приводят к повышенному расходу ресурса изоляции обмоток силовых трансформаторов, что является причиной отказов силовых трансформаторов в работе.

Поэтому одним из путей повышения эксплуатационной надежности силовых трансформаторов потребительских трансформаторных подстанций является дистанционное диагностирование эксплуатационных режимов их работы.

В соответствии со структурной схемой дистанционного функционального диагностирования силового трансформатора (рис. 4.10) предлагается устройство дистанционного диагностирования и обеспечения ресурсосберегающих эксплуатационных режимов работы силового трансформатора (рис.8.2).

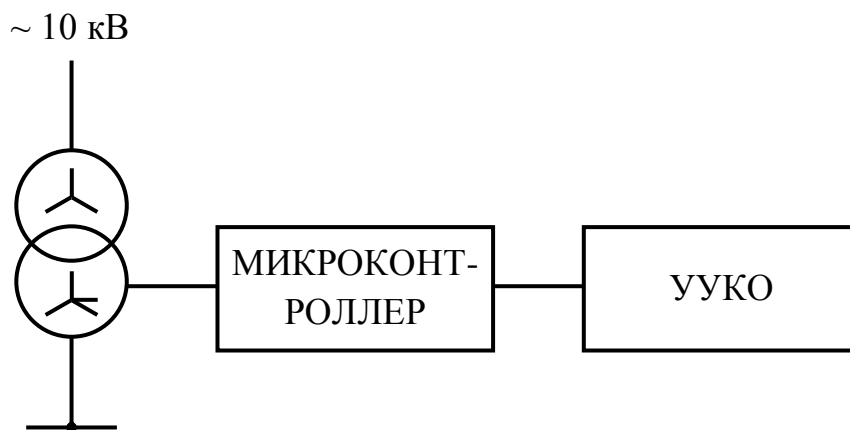


Рис. 8.2 Структурная схема устройства дистанционного функционального диагностирования силового трансформатора

Микроконтроллер получает от силового трансформатора действующие значения фазных сил токов вторичной обмотки силового трансформатора, находит среднеквадратичное их значение и по программе, изложенной в

пункте 4.4 проводит анализ эксплуатационного режима работы силового трансформатора с нахождением в конечном итоге текущего значения скорости теплового износа изоляции. В случае, если скорость теплового износа изоляции превышает нормативное значение, микроконтроллер передает сигнал устройству удаленного контроля объектов (УУКО) ОКО-У.

Устройство предназначено для удалённого контроля, управления и оповещения о состоянии стационарного объекта с помощью мобильного телефона или компьютера, используя сеть сотовой связи.

Устройство представляет собой микрокомпьютер со встроенным GSM-модулем, к которому подсоединяются датчики, микрофон, сирена и другие внешние устройства.

Устройство может работать с 8-мью зонами и гибкими настройками, а также в режиме "Невидимый" (энергопотребление в 4 раза меньше от номинального).

Устройство может работать по SMS-протоколу.

Устройство может работать для многопользовательского управления выходом с помощью звонков без соединения.

Устройство имеет:

- 4 входа, 3 выхода;
- отдельный вход подсчета;
- постановка/снятие охраны: SMS-командой, звонком;
- оповещение: звонком, SMS на 8 номеров;
- SMS-отчет о состоянии датчиков;
- контроль счета и оповещение при понижении заданного значения баланса SIM-карты;
- оповещение при повышении/понижении заданной температуры внешних датчиков температуры DS1821 - 1 шт., DS1820 - до 5 шт.;
- управление радиорозетками;
- режим передачи шума с объекта.

#### Техническая характеристика устройства:

- напряжение питания: +7 В...+18 В
- ток потребления при номинальном напряжении питания 12 В:
  - в режиме ожидания: до 20 мА
  - в режиме соединения: до 200 мА
- количество входов: 4 шт.
- типы подключаемых датчиков: контактные, логические
- максимальное напряжение, подаваемое на входы контроля до 30 В
- количество выходов управления типа ОК (выдает минус): 3 шт.
- максимальное коммутируемое постоянное напряжение выхода ЗОВ
- максимальный ток нагрузки выхода: 0,5А
- рабочий температурный диапазон устройства: от -30°С до +80°С
- автоматическое выключение GSM-модуля ниже -40°С, выше +85°С
- рабочий частотный диапазон: 850/900/1800/1900 МГц
- габаритные размеры устройства (ДхШхВ): 68x50x20 мм

Электрическая схема подключения устройства приведена на рисунке 8.3.

В агропромышленном комплексе ряд электроприводов (погружных электронасосов, насосных агрегатов водоподдачи, насосных агрегатов оросительных систем), как правило, постоянно не обслуживаются. Поэтому могут подвергаться неконтролируемым эксплуатационным воздействиям (перегрузкам, неполнофазным питаниям, отклонениям напряжения, асимметрии напряжения, температуры окружающей среды). Указанные эксплуатационные воздействия приводят к повышенному расходу ресурса изоляции обмоток асинхронных электродвигателей, что является причиной отказов асинхронных электродвигателей в работе.

Поэтому одним из путей повышения эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей является дистанционное диагностирование

эксплуатационных режимов их работы.

В соответствии со структурной схемой дистанционного функционального диагностирования асинхронного электродвигателя (рис. 3.4) предлагается устройство дистанционного диагностирования и обеспечения ресурсосберегающих эксплуатационных режимов работы асинхронного электродвигателя (рис.8.4).

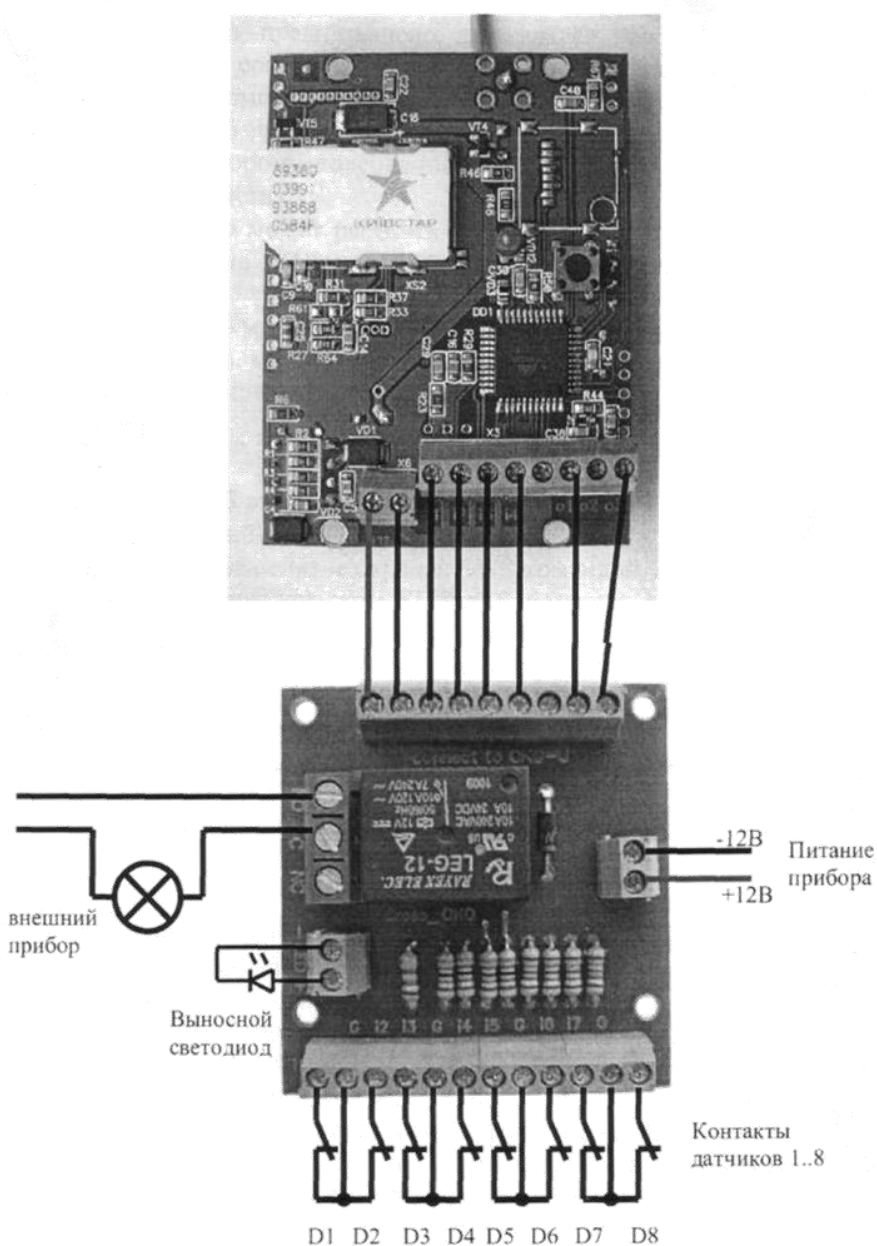


Рис. 8.3 Электрическая схема подключения устройства УУКО



Рис. 8.4 Структурная схема устройства дистанционного функционального диагностирования асинхронного электродвигателя

Микроконтроллер получает от асинхронного электродвигателя действующие значения фазных сил токов, находит среднеквадратичное их значение и по программе, изложенной в пункте 3.5 проводит анализ эксплуатационного режима работы асинхронного электродвигателя с нахождением в конечном итоге текущего значения скорости теплового износа изоляции. В случае, если скорость теплового износа изоляции превышает нормативное значение, микроконтроллер передает сигнал устройству удаленного контроля объектов ОКО-У, характеристика которого приведена ранее.

Определим допустимые капитальные вложения на создание и установку устройств электротехнических систем обеспечения ресурсосберегающих эксплуатационных режимов работы силовых трансформаторов и асинхронных электродвигателей.

Допустимые капитальные вложения зависят от требуемого срока окупаемости и годового экономического эффекта, то есть

$$K_{\theta} = N \cdot \mathcal{E}_{\text{год}}, \quad (8.9)$$

где  $N$  – нормативный срок окупаемости устройства, лет;

$\mathcal{E}_{\text{год}}$  – годовой экономический эффект, грн/год.

Годовой экономический эффект для силового трансформатора может быть найден следующим образом:

$$\mathcal{E}_{год,m} = \kappa_m C_m + Y_m, \quad (8.10)$$

где  $\kappa_m$  – коэффициент снижения расходов на ремонт трансформатора;

$C_m$  – стоимость ремонта трансформатора, грн;

$Y_m$  – убытки от недоотпуска электрической энергии, грн.

Годовой экономический эффект для асинхронного электродвигателя может быть найден следующим образом:

$$\mathcal{E}_{год,d} = \kappa_d C_d + Y_d, \quad (8.11)$$

где  $\kappa_d$  – коэффициент снижения расходов на ремонт асинхронного электродвигателя;

$C_d$  – стоимость ремонта асинхронного электродвигателя, грн;

$Y_d$  – убытки от технологического ущерба, грн.

### **8.3 Электротехническая система облегчения пусковых режимов асинхронного электродвигателя в условиях соизмеримой мощности**

Как было показано в пункте 5.5, импульс квадрата пускового тока может служить параметром диагностирования теплового режима электродвигателя в послепусковой период.

Для успешного запуска электродвигателя привода рабочей машины предусмотрим однофазный вольтдобавочный трансформатор, вторичная обмотка которого будет включаться в цепь одной фазы электродвигателя, если импульс квадрата кратности пускового тока превысит заданную уставку.

Рассмотрим пусковой режим асинхронного электродвигателя, облегченный с помощью вольтодобавочного трансформатора.

Рассмотрим такой случай: кратность приложенного симметричного напряжения по фазам равна 0,8; вольтодобавочный трансформатор в фазе  $a$  увеличивает напряжение до 330 В, то есть:

$$\dot{U}_a = 0,8 \cdot U_{ан} + U_\delta = 330 \text{ В}, \quad (8.12)$$

$$\dot{U}_b = 0,8 \cdot U_{bn} e^{-j120^\circ} = 176 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В}, \quad (8.13)$$

$$\dot{U}_c = 0,8 \cdot U_{cn} e^{+j120^\circ} = 176 \cdot e^{+j120^\circ} \text{ В}. \quad (8.14)$$

Найдем симметричные составляющие нулевой, прямой и обратной последовательностей описанного несимметричного напряжения:

$$U_{a0} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c), \quad (8.15)$$

$$U_{a1} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + a \cdot \dot{U}_b + a^2 \cdot \dot{U}_c), \quad (8.16)$$

$$U_{a2} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + a^2 \cdot \dot{U}_b + a \cdot \dot{U}_c), \quad (8.17)$$

Операторы поворота запишем в алгебраической форме:

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (8.18)$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (8.19)$$

Перепишем комплексы фазных напряжений в алгебраической форме:

$$\dot{U}_a = 330 \text{ В}, \quad (8.20)$$

$$\dot{U}_b = 176 \cdot \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \text{ В}, \quad (8.21)$$

$$\dot{U}_c = 176 \cdot \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \text{ В}. \quad (8.22)$$

Подставляем (8.18), (8.19), (8.20), (8.21), (8.22) в (8.15), (8.16), (8.17) и получаем:

$$U_{a0} = 51,3 \text{ В},$$

$$U_{a1} = 226,6 \text{ В},$$

$$U_{a2} = 52 \text{ В}.$$

Находим кратность напряжения симметричной составляющей прямой последовательности:

$$\kappa_{u1} = 226,6/220 = 1,03.$$

Находим кратность напряжения симметричной составляющей обратной последовательности:

$$\kappa_{u2} = 52/220 = 0,24.$$

Находим кратность пускового момента:

$$(\kappa_{u1}^2 - \kappa_{u2}^2) \cdot \kappa_n = (1,03^2 - 0,24^2) \cdot \kappa_n = 1 \cdot \kappa_n,$$

что больше  $\kappa_u^2 \cdot \kappa_n = 0,8^2 \cdot \kappa_n = 0,64 \cdot \kappa_n$ .

Составляем структурную схему устройства облегчения пускового режима асинхронного электродвигателя (рис. 8.5).

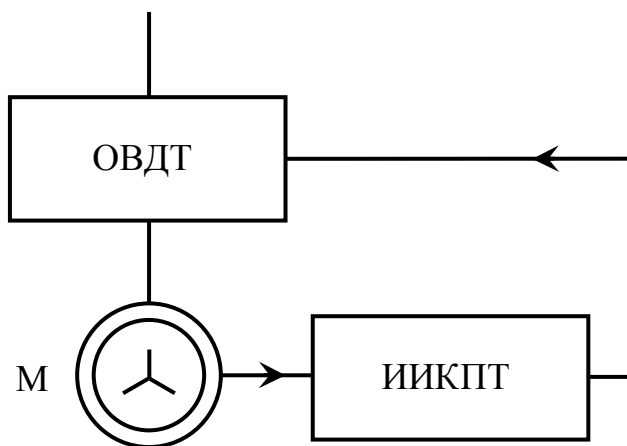


Рис. 8.5 Структурная схема устройства облегчения пускового режима асинхронного электродвигателя

В процессе запуска электродвигателя измеритель импульса квадрата пускового тока (ИИКПТ) измеряет указанный импульс и сравнивает его с допустимым. Если измеряемый импульс приобретает значение большее, чем допустимое, то подается сигнал и включается в одну из фаз электродвигателя вторичная обмотка однофазного вольтодобавочного трансформатора (ОВДТ). После успешного запуска вольтодобавочный трансформатор выводится из работы.

Экономическое обоснование допустимых капитальных вложений на устройство облегчения пусковых режимов асинхронного электродвигателя проводится аналогично пункту 8.2 (выражения 8.9 и 8.11).

#### **8.4 Электротехническая система ресурсоэнергосбережения асинхронных электродвигателей привода параллельно работающих насосных агрегатов**

На основании проведенных исследований в пункте 6.2 процессов преобразования электрической энергии в асинхронных электродвигателях привода параллельно работающих насосных агрегатов предложена система ре-

сурсоэнергосбережения.

На рисунке 8.6 представлена структурная схема устройства управления электродвигателями привода параллельно работающих насосных агрегатов, обеспечивающего их ресурсоэнергосберегающий режим.

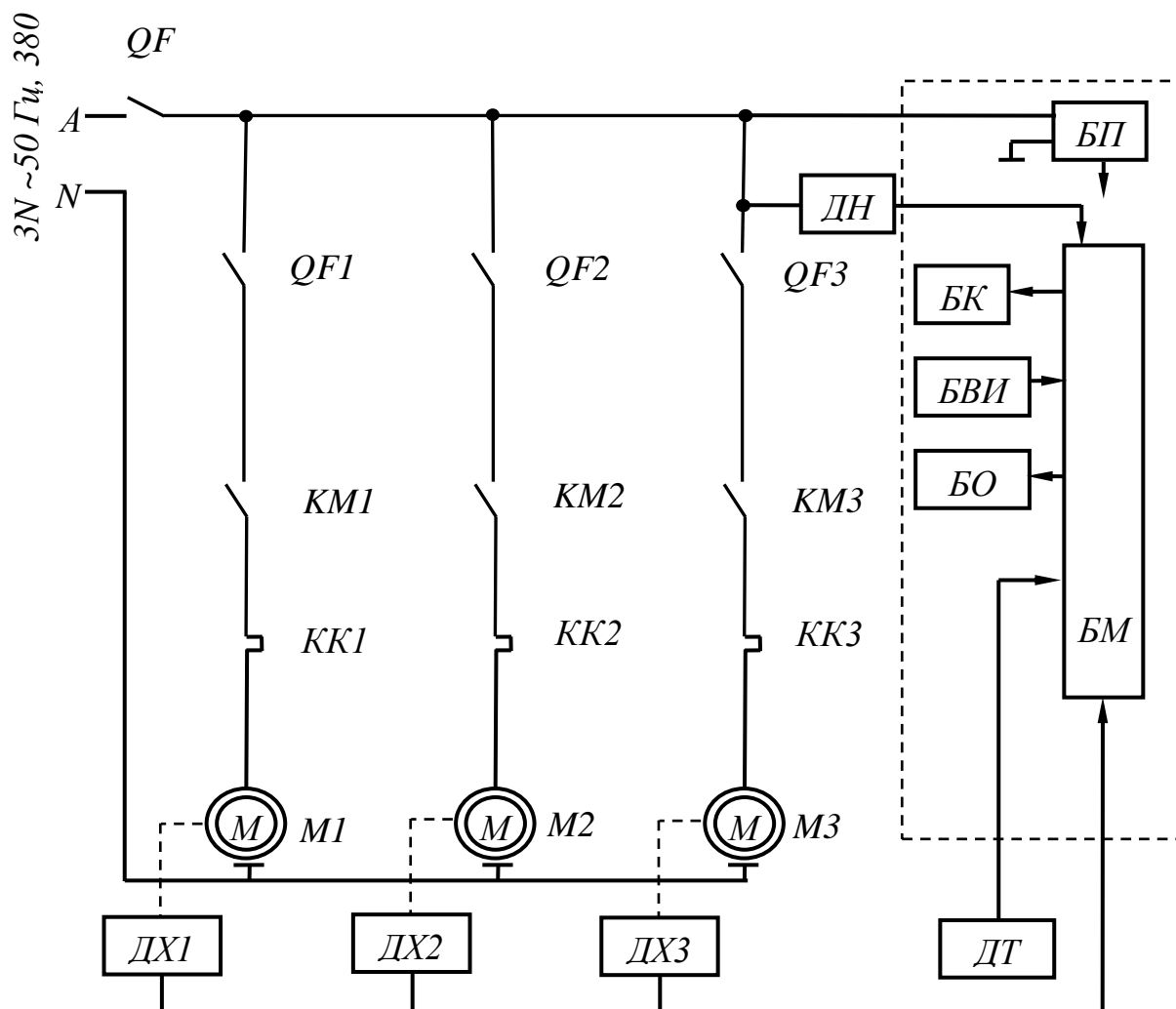


Рис. 8.6 Структурная схема устройства управления электродвигателями насосных агрегатов

На рисунке:

QF, QF1, QF2, QF3 – автоматические выключатели; KM1, KM2, KM3 – магнитные пускатели; KK1, KK2, KK3 – тепловые реле; M1, M2, M3 – асинхронные электродвигатели; БП – блок питания; БК – блок коммутации; БМ – блок микроконтроллера; БВИ – блок ввода информации; БОИ – блок отобра-

жения информации; ДТ – датчик температуры; ДН – датчик напряжения; ДХ1, ДХ2, ДХ3 – датчики Холла.

С датчиков Холла ДХ1, ДХ2, ДХ3 на однокристалльный микроконтроллер БМ, поступает импульсный цифровой сигнал, пропорциональный угловым скоростям вращения роторов электродвигателей. С датчиков температуры и напряжения снимаются температура окружающей среды и напряжение. Данные сигналы подаются на вход микроконтроллера БМ.

Микроконтроллер БМ выполняет расчет и сравнение текущих мощностей включения электродвигателей насосных агрегатов, формирует выходные сигналы, управляет подключенными к нему устройствами ввода-вывода.

Блок отображения информации (БОИ) отображает информацию о количестве работающих насосных агрегатов, а так же расчетные параметры математической модели.

С помощью блока БОИ и блока ввода информации БВИ, выполненного в виде клавиатуры, производится ввод параметров математической модели устройства управления электродвигателями насосных агрегатов.

Блок коммутации предназначен для управления насосными агрегатами включенными на параллельную работу, в случаи изменения параметров управления.

Питание устройства постоянным током осуществляется с помощью блока питания БП.

В целом устройство питается от сети трехфазного переменного тока 220/380 В с помощью автоматического выключателя QF.

В соответствии с исследованиями, проведенными в пункте 6.3, предложена электротехническая система, облегчающая аварийный режим работы любого асинхронного электродвигателя привода насосного агрегата. Структурная схема такого устройства представлена на рисунке 8.7.

При выпадении фазы или ухудшении контакта в цепи одного из электродвигателей объединение нулевых точек облегчает аварийный режим этого

электродвигателя. При этом между нулевыми точками и «землей» появляется напряжение смещения нейтрали, значение которого в виде сигнала передается обслуживающему персоналу с помощью исполнительного органа ИО.

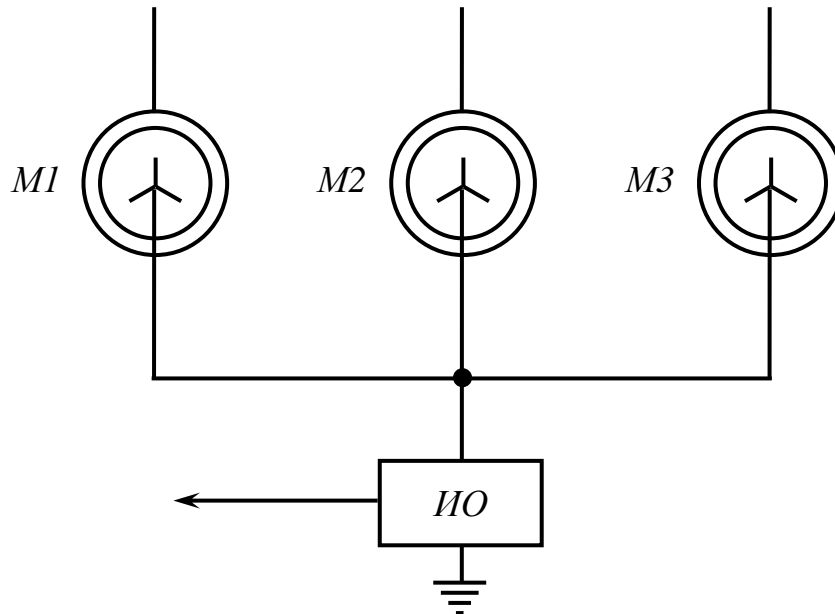


Рис. 8.7 Структурная схема устройства ресурсосбережения асинхронных электродвигателей привода насосных агрегатов

Годовой экономический эффект от внедрения электротехнической системы оптимального числа одновременно работающих асинхронных электродвигателей привода параллельно работающих насосных агрегатов может быть найден следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{год}}' = u_{\text{э}} \sum_{i=1}^n \Delta P_{\kappa-1} t_i - u_{\text{э}} \sum_{i=1}^n \Delta P_{\kappa} t_i, \quad (8.23)$$

где  $u_{\text{э}}$  – цена электрической энергии,  $\text{грн}/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ ;

$\Delta P_{\kappa-1}$  – потери активной мощности при работе  $\kappa - 1$  агрегатов,  $\text{кВт}$ ;

$t_i$  – время работы  $\kappa - 1$  агрегатов,  $\text{ч}$ ;

$\Delta P_{\kappa}$  – потери активной мощности при работе  $\kappa$  агрегатов,  $\text{кВт}$ .

В свою очередь потери активной мощности в электродвигателях при  $\kappa - 1$  работающих агрегатов равны:

$$\Delta P_{k-1} = \kappa_{n(k-1)} P_2, \quad (8.24)$$

где  $\kappa_{n(k-1)}$  – коэффициент потерь активной мощности при  $k - 1$  работающих асинхронных электродвигателях;

$P_2$  – сумарная мощность на валах работающих приводных асинхронных электродвигателей, *кВт*.

Потери активной мощности в электродвигателях при  $k$  работающих агрегатов равны:

$$\Delta P_k = \kappa_{n(k)} P_2, \quad (8.25)$$

где  $\kappa_{n(k)}$  – коэффициент потерь активной мощности  $k$  работающих асинхронных электродвигателях;

$P_2$  – сумарная мощность на валах работающих приводных асинхронных электродвигателей, *кВт*.

Одновременно с энергосбережением указанная система обеспечивает работу приводных электродвигателей без перегрузок, что создает ресурсосберегающий режим.

Годовой экономический эффект от ресурсосбережения может быть найден следующим образом:

$$\mathcal{E}_{год}'' = mC, \quad (8.26)$$

где  $m$  – коэффициент снижения расхода ресурса;

$C$  – стоимость ремонта одного электродвигателя, *грн*.

Допустимые капитальные вложения на создание и установку электро-технической системы оптимального числа одновременно работающих асинхронных электродвигателей при параллельной работе насосных агрегатов:

$$K_g = N(\mathcal{E}_{год}'' + \mathcal{E}_{год}'), \quad (8.27)$$

где  $N$  – рекомендуемый срок окупаемости, лет.

Годовой экономический эффект для асинхронного электродвигателя при внедрении системы облегчения аварийного режима может быть найден следующим образом:

$$\mathcal{E}_{год,д} = \kappa_d C_d + Y_d, \quad (8.28)$$

где  $\kappa_d$  – коэффициент снижения расходов на ремонт асинхронного электродвигателя;

$C_d$  – стоимость ремонта асинхронного электродвигателя, грн;

$Y_d$  – убытки от технологического ущерба, грн.

### 8.5 Преобразователи электрической энергии в тепловую

Одним из недостатков существующих технических средств преобразования электрической энергии в тепловую является их невысокий срок службы (особенно трубчатых электронагревателей). Поэтому задачей является разработка технических средств преобразования электрической энергии в тепловую, обладающих большой эксплуатационной надежностью и высоким коэффициентом полезного действия.

Для экспериментальной проверки преобразователя «катушка в стали» был создан опытно – конструкторский образец, чертёж которого приведен на рис. 8.8.

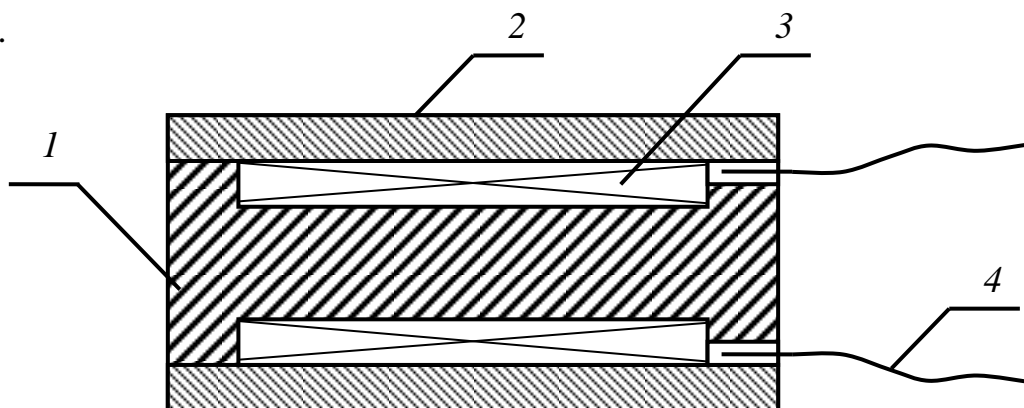


Рис. 8.8. Преобразователь электрической энергии в тепловую «катушка в стали»

На чертеже:

- 1 – стальной корпус,
- 2 – стальная труба,
- 3 – обмотка,
- 4 – выводы.

Преобразователь рассчитан на работу при номинальном напряжении 220В переменного синусоидального электрического тока.

Учитывая то, что в течение суток температура окружающей среды изменяется, то возникает необходимость регулирования мощности нагревательного устройства.

Одной из наиболее важных и сложных проблем в развитии экономики является проблема энергосбережения, повышения эффективности производства тепловой энергии. В настоящее время горячее водоснабжение и обогрев жилых и промышленных помещений в крупных городах и промышленных центрах осуществляется с помощью таких источников тепловой энергии, как ТЭЦ, в небольших городах и поселках - с помощью котельных и печного отопления. Особенно остро стоит проблема получения тепла в небольших населенных пунктах и фермерских хозяйствах, удаленных от тепломагистрали жилых зданиях. Традиционные источники тепловой энергии обладают рядом существенных недостатков: низкий КПД, определенные сложности в доставке тепла потребителю и т.д. Необходимость строительства ТЭЦ и котельных в непосредственной близости от потребителя ухудшает экологическую обстановку в жилых микрорайонах. Поэтому представляет значительный интерес получение горячей воды и непосредственный обогрев таких объектов с помощью электронагрева, реализация которого не требует значительных капиталовложений, строительных работ и постоянного обслуживающего персонала.

Наиболее распространенными типами электронагревательных устройств являются установки, выполненные на основе трубчатых нагреватель-

ных элементов (ТЭН), электродные электроводонагреватели, электронагреватели с открытыми тепловыделяющими элементами и установки индукционного нагрева. Основными недостатками этих видов электроприборов являются их низкая надежность и недостаточный уровень безопасности в эксплуатации. Устранение указанных недостатков может быть достигнуто путем использования электронагревательных устройств трансформаторного типа. Они представляют собой понижающий трансформатор, первичная обмотка которого подключена к сети, а вторичная обмотка замкнута накоротко и является тепловыделяющим элементом.

Практическая ценность работы заключается в решении крупной научно-технической задачи по созданию нового энергетического оборудования для систем горячего водоснабжения и отопления, отвечающего современным требованиям и соответствующего уровню лучших мировых образцов, разработке и исследовании новых конструкций нагревательных элементов на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, создании методик и алгоритмов электромагнитных и тепловых расчётов предложенных устройств и реализации их в виде пакетов прикладных программ, ориентированных на использование современных ЭВМ, разработке рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок и размерных соотношений для проектирования однофазных и трёхфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой различной мощности, создании макетных образцов и освоении серийного производства электронагревательных устройств на основе нагревательных элементов трансформаторного типа.

При всём многообразии конструкций следует выделить основные группы НЭ (резистивные, электродные, индукционные и трансформаторного типа), которые нашли наиболее широкое применение в промышленном производстве и в быту. Установлено, что элементы первой и второй групп обладают рядом существенных недостатков, ограничивающих область применения таких устройств. Этими недостатками являются низкий класс электро-

безопасности, невысокая надёжность и долговечность, а нагревательные элементы индукционного типа имеют низкий коэффициент мощности. В результате анализа производства и применения установок электронагрева в стране и за рубежом, прогнозов развития теплоэнергетики и тенденций развития технического уровня электронагревателей отмечено развитие разработок широкого спектра электронагревательных приборов. Такие приборы должны обеспечивать высокую степень защиты от поражения электрическим током, иметь простую и технологичную конструкцию, большой срок службы, невысокую стоимость, хорошие эксплуатационные и массогабаритные показатели, высокий КПД и коэффициент мощности.

Показано, что одним из наиболее эффективных путей повышения надёжности и безопасности систем децентрализованного горячего водоснабжения и отопления небольших промышленных и сельскохозяйственных предприятий и бытового сектора является применение в качестве нагревательных элементов однофазных и трёхфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой (КЗО), являющейся тепловыделяющим элементом.

Вариант такого водонагревателя приведен на рисунке 8.9.

Проточный водонагреватель содержит основной магнитопровод 1, с первичной обмоткой 2, в середине магнитопровода 1 введен передвижной магнитный шунт 3 и короткозамкнутая труба 4.

Водонагреватель работает следующим образом. К первичной обмотке 2 подводится переменное синусоидальное напряжение, под действием которого в обмотке создаётся переменный синусоидальный ток. Этот ток создаёт переменное магнитное поле, которое замыкается по основному магнитопроводу 1 и магнитному шунту. Вследствие этого в короткозамкнутой трубе 4 создаётся электродвижущая сила, под действием которой в трубе возникает переменный синусоидальный ток и вследствие теплового действия электрического тока короткозамкнутая труба 4 нагревается и отдаёт теплоту воде, которая проходит через неё.

Часть магнитного потока замыкается через магнитный шунт 3 и частично через основной магнитопровод 1, а магнитный поток, который пронизывает короткозамкнутую трубу 4, регулируется движением магнитного шунта. Так происходит регулирование мощности в короткозамкнутой трубе 4.

На проточный водонагреватель трансформаторного типа получен патент на полезную модель №38435 от 12.01.2009 года.

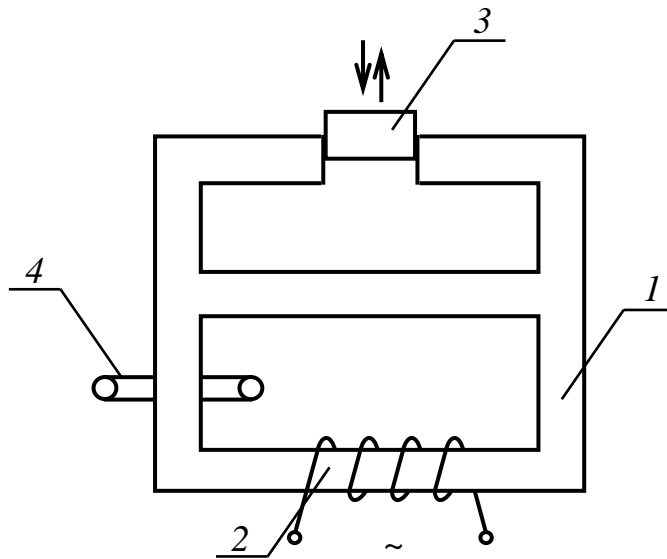


Рис. 8.9 Проточный водонагреватель трансформаторного типа

На рисунке:

- 1 – основной магнитопровод;
- 2 – обмотка;
- 3 – шунт;
- 4 – короткозамкнутая труба.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ермолаев С.А. Эксплуатация и ремонт электрооборудования и средств автоматизации в системе АПК / С.А. Ермолаев, В.А. Мунтян, В.Н. Кюрчев – К.: Альтур, 1997. – 414 с.
2. Алиханян К.А. Новые асинхронные двигатели в АПК// Механизация и электрификация сельского хозяйства/ К.А. Алиханян –1985.– №8 – С.53 – 56 с.
3. Листова П.Н. Применение электрической энергии в сельскохозяйственном производстве: Справочник / П.Н. Листова – М.: Колос, 1974. – 623 с.
4. Курбатова Г.С. Электродвигатели для сельского хозяйства. / Г.С. Курбатова – М.: Энергопромиздат, 1983. – 63 с.
5. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. / В.В. Овчаров – К.: УСХА, 1990. – 168 с.
6. Мишин И.С. Основные направления повышения надёжности электродвигателей в сельском хозяйстве / И.С. Мишин, А.А. Глебович – М.: ВСХИЗО. – 1977. – №135. – С.3 – 8.
7. Ермолин Н.П. надёжность электрических машин. / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.:Энергия, 1976. – 248 с.
8. Пospelов Г.Е. Надёжность электроустановок сельскохозяйственного назначения. / Г.Е. Пospelов, В.И. Русан – Минск:Уражай, 1982. – 166 с.
9. Ванеев Б.Н. надёжность асинхронных электродвигателей. / за ред. Б.Н. Ванеева. – К.: Техника , 1983. – 143 с.
10. Антонов М.В. Эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебное пособие. / М.В. Антонов, Н.А. Акимова, Котеленец Н.Ф. – М.: Высш.шк., 1989.- 192с.
11. Оськин С.В. Повышение надёжности электропривода сельскохозяйственных машин // Механизация и электрификация сельского хозяйства / С.В. Оськин. – 1996. – №3. – С.19.

12. Корчемный Н.А. К вопросу надёжности электродвигателей, работающих на сельскохозяйственных фермах // Механизация и электрификация сельского хозяйства. / Н.А. Корчемный, В.П. Машевский - К.: Урожай, 1976. – Вып.35. – С.71 – 75.
13. Корчемный Н.А. Повышение надёжности электрооборудования в сельском хозяйстве. / Н.А. Корчемный, В.П. Машевский - К.: Урожай, 1988. – 176с.
14. Корчемный М.О. Експлуатаційна надійність електродвигунів у сільськогосподарському виробництві // Механізація та електрифікація сільського господарства. / М.О. Корчемний, А.Ф. Філоненко, Юсупов Н.А.– К.: Урожай, 1991. – Вип.73 – С.78 – 80
15. *Rusny Jiri. Analyza elekhtrikeyho stroje tociveho z hlediska zivonosti* // *Electrotechnik.* – 1987. – 42, №10. – S. 300 – 303.
16. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456с.
17. Радин В.И. Электрические машины: Асинхронные машины: учебное пособие // Под ред. И.П. Копылова, В.И. Радина, Д.Э. Брускина, А.Е. Зороховича. – М.: Высш.шк., 1986. – 127с.
18. Иноземцев Г.Б. Виды повреждения и причины выхода из строя электродвигателя в сельскохозяйственном производстве // Сборник научн. тр. УСХА / Г.Б. Иноземцев, И. И. Ефименко, М.Е. Колекуст - К.: УСХА, 1972. – Вып.54. – С.42 – 45.
19. Миронов Ю.Р. Передвижная электродиагностическая установка // Техника в сельском хозяйстве / Ю.Р. Миронов. – 1986. – №10. – С.52.
20. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. / В.П. Таран. – К.: Техника, 1983. – 200с.
21. *Госагропром Система планово – предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий* / Госагропром СССР. – М.: Агропромиздат, 1987. – 191с.

22. Левченко В.М. Электродвигатели асинхронные импортные. Техническое обслуживание. / В.М Левченко, В.П. Таран, В.В. Чаплцкий – М.: ГОСНИТИ, 1983. – 28с.
23. Таран В.П. Электродвигатели сельскохозяйственного исполнения. Техническое обслуживание. – М.: ГОСНИТИ, 1984. – 20с.
24. Ghosh S.N. Maintenance of electrical machines // Electrical India. – 1986. – 26, №1. – P.11 – 12.
25. Куйбышев А.Б. Надёжность асинхронных электродвигателей общепромышленного применения / А.Б. Куйбышев. – М.: Изд – во стандартов, 1972. – 104с.
26. Гольдберг О.Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей. / О.Д. Гольдберг, И.М. Абдуллаев, А.Н. Абиев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160с.
27. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. / В.В. Овчаров. – К.: УСХА, 1990. – 168с.
28. Грундулис Л.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1982. – 64с.
29. Калитвянский В.И. Общие закономерности теплового старения полимерных диэлектриков / В.И. Калитвянский // Электричество. – 1955. - №3. – С.57 - 61.
30. Калитвянский В.И. Продолжительность службы новых видов изоляции электрических машин / В.И. Калитвянский, А.В. Ковальская // Электричество. – 1955. – №10. – С.40 – 44.
31. Тищенко Н.А. Проблема надёжности электродвигателей / Н.А. Тищенко // Электричество. – 1961. – №11. – С.7 – 13.
32. Гольдберг О.Д. О надёжности асинхронных двигателей // Вестник электропромышленности. / О.Д. Гольдберг, Т.Г. Сорокер, И.П. Чарахчян. – 1962. – №9. –С.62 – 67.

33. Козырев Н.А. Изоляция электрических машин и методы её испытания. / Н.А. Козырев.- М.;Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 264с.
34. Дискуссия о надёжности электрических машин // Вести электропромышленности. – 1963. – №2. – С.55 – 61.
35. Чарахчьян И.П. Влияние способа заливки и изоляции короткозамкнутой клетки от сердечника ротора на показатели асинхронных двигателей / И.П. Чарахчьян, А.П. Воскресенский // Электротехника. – 1964. - №1.– С38 – 41.
36. Половко А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко. – М.: Наука, 1964. – 446с.
37. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надёжности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524с.
38. Алексеевский В.В. Электрические машины мощностью до 100 кВт с открытыми пазами и магнитными клиньями / В.В. Алексеевский, Ю.С. Чатинян, Л.К. Галстян //Электротехника. – 1965. – №9. – С.10 – 13.
39. Белова Л.А. Вероятность аварийного пробоя изоляции обмоток статоров турбогенераторов в зависимости от длительности их работы / Л.А. Белова, Л.Г. Мамиконянц, В.Н. Тутубалин // Электротехника. – 1965. – №4. – С.42 – 47.
40. Леонович А.С. Определение количественных характеристик надёжности и закона распределения времени безотказной работы некоторых типов электрических машин. / А.С. Леонович // Электротехника. – 1965. – № 6. – С.9 – 14.
41. Альтман А.Б. Металлокерамические материалы для магнитных клиньев электрических машин. / А.Б. Альтман // Электротехника. – 1966. – №2. – С.8 – 11.
42. Муравлев О.П. Влияние обмоточноизолирующих работ на пробивное напряжение витковой и корпусной изоляции асинхронных электродвигателей / О.П. Муравлев, Ю.П. Похолков, Э.К. Стрельбицкий. // Электротехника. – 1966. – №1. – С.109. – 110.

43. Леонович А.С. О законе распределения времени безотказной работы электродвигателей / А.С. Леонович. // Электромеханика. – 1967. – №8. – С.858 – 863.
44. Гольдберг О.Д. Определение надёжности конструкции изоляции электрических машин при номинальных значениях эксплуатационных факторов / О.Д. Гольдберг. // Электротехника. – 1967. – №7. – С.28 – 30.
45. Гольдберг О.Д. Расчёт надёжности межвитковой изоляции электрических машин с насыпной обмоткой / О.Д. Гольдберг, П.М. Хазановский. // Электротехника. – 1967. – №1. – С.25 – 28.
46. Гольдберг О.Д. Метод ускоренной экспериментальной оценки надёжности конструкции изоляции электрических машин / О.Д. Гольдберг, П.М. Хазановский. // Электротехника. – 1967. – №10. – С.28 – 30.
47. Лодочников Э.А. Некоторые экспериментальные показатели надёжности микроэлектродвигателей постоянного тока // Электротехническая промышленность. – 1967. – №281. – С.3 – 5.
48. Рябинин И.А. Основы теории и расчёта надёжности судовых электроэнергетических установок. / И.А. Рябинин. – Л.: Судостроение, 1967. – 362с.
49. Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности. / Н.П. Ермолин. – М.: Высш.шк., 1967. – С.13 – 24.
50. Дегиль Г.С. Повышение мощности и надёжности турбогенераторов ТГВ 200. / Г.С. Дегиль. – Киев: Техника, 1968. – 84с.
51. Койков С.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков. / С.Н. Койков, А.Н. Цикин. – Л.: Энергия, 1968. – 186с.
52. Гольдберг О.Д. Качество и надёжность асинхронных двигателей. / О.Д. Гольдберг. – М.: Энергия, 1968. – 176с.
53. Быков В.М. Методы анализа надёжности электрических машин / Под ред. В.М. Быкова. – М.: Наука. 1968. – 118с.

54. Гольдберг О.Д. Влияние коммутационных перенапряжений на надёжность низковольтных асинхронных двигателей / О.Д. Гольдберг, И.М. Комлев, Н.И. Суворов. // Электротехника. – 1968. - №5. – С.14 – 18.
55. Семяшкин Ф.И. Надёжность высоковольтных асинхронных двигателей тепловых электростанций / Ф.И. Семяшкин. // Электротехника. – 1969. - №4. – С. 52 – 53.
56. Гольдберг О.Д. Статистическая оценка нового косвенного метода контроля неравномерности воздушного зазора асинхронных двигателей / О.Д. Гольдберг, Р.И. Талышинский, Р.А. Исаева. // Электротехника. – 1969. - №1. – С.22 – 26.
57. Исакович М.М. Устранение вибрации электрических машин / М.М. Исакович, Л.И. Клейман, Б.Х. Перчанок. – Л.: Энергия, 1969. – 216с.
58. Каганов Э.Г. Волновые перенапряжения в электрических машинах. / Э.Г. –М.: Энергия, 1970. – 208с.
59. Сотсков Б.С. Основы теории и расчёта надёжности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. / Б.С. Сотсков. – М.: Высш.шк., 1970. – 270с.
60. Брызгалов В.А. Исследование отказов асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 кВт / В.А. Брызгалов // Электротехническая промышленность. – 1970. - №2. – С.26 – 27.
61. Хрущев В.В. Надёжность и качество электрических машин малой мощности / Под ред. В.В. Хрущева. – М.: Наука, 1971. – 119с.
62. Чувиляева Э.М. Ускорение испытаний машин малой мощности на долговечность и надёжность / Э. М. Чувиляева, А.С. Иванов // Электротехническая промышленность. – 1971. - №6. – С.18 – 19.
63. Рыбаков В.С. Анализ причин отказов электрических машин малой мощности при испытаниях на долговечность и надёжность / В.С. Рыбаков, З.М. Чувиляева, Е.Д. Несговорова // Электротехническая промышленность. – 1971. – С.20 – 21.

64. Зиберов В.Н. Влияние магнитных клиньев и магнитной замазки на характеристики асинхронных двигателей мощностью выше 100 к Вт / В.Н. Зиберов, Г.Н. Булатов // Электротехническая промышленность. – 1971. – С.3 – 6.
65. Хорий Е.Я. Метод вибрационных воздействий при ускоренных испытаниях асинхронных двигателей на надежность / Е.Я Хорий, М.И. Гиль. // Электротехника. – 1971. - №8. – С.4 – 6.
66. Главный В.Д. Результаты ускоренных испытаний на надежность электродвигателей типов ВАЛ и КОМ // Надежность и контроль качества. / В.Д. Главный. – 1971. - № 10.– С.35 – 42.
67. Мариночкин В.П. Стандартизация ускоренных методов испытания электрических машин на надежность / В.П. Мариночкин, В.Т. Осипович, М.В. Резцова // Электротехника. – 1971. - №6. – С.61.
68. Богуславский И.З. Вопросы использования управляющих вычислительных машин для повышения надёжности работы генераторов в условиях эксплуатации // Высоковольтные турбо – и гидрогенераторы с непосредственным охлаждением. – М.: Наука, 1971. – С.208 – 215.
69. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общепромышленного применения / Л.М. Бернштейн. – М.: Энергия, 1971. – 367с.
70. Куйбышев А.В. Надёжность асинхронных электродвигателей общепромышленного применения / А.В. Куйбышев. – М.: Изд-во стандартов, 1972 – 104с.
71. Ковалев И. Ф. Расчёт надежности щеточного аппарата электрических машин / И.Ф.Ковалев, Ю.С. Крылов // Электротехническая промышленность. – 1972. - №2. – С.7 – 9.
72. Стамбулян Г.А. Повышение надежности обмоток при проектировании серий микроэлектродвигателей / Г.А. Стамбулян, С.В. Яковлева // Электротехника. – 1972. - №7 – С.38 -41.

73. Похолков Ю.П. Оценка надежности витковой изоляции всыпных обмоток по дефектности провода / Ю.П. Похолков, Э.К. Стрельбицкий // Электротехническая промышленность. – 1972. - №7. – С.19.
74. Белова Л.А. Сравнение повреждаемости корпусной изоляции турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением / Л.А. Белова, Л.Г. Мамиконянц, В.Н. Тутубалин // Электричество. – 1972. - №8. – С.36 – 39.
75. Дмитриевский В.С. Вывод уравнения надежности электрической изоляции / В.С. Дмитриевский // Электротехника. – 1973. - №1. – С.56 – 57.
76. Лысаковский Г.И. Повреждаемость и профилактика изоляции статоров генераторов типа ТВ - 100 – 2 / Г.И. Лысаковский, Л.Д. Мицай // Электрические станции. – 1973. - №8. – С.73 – 75.
77. Кравченко Г.Є. Захист заглибних електронасосних агрегатів // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблема енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» / Г.Є Кавченко, В.Ф. Яковлєв. Вип.10. – Харків: ХДТУСГ, 2001. – С.512 – 514.
78. Кравченко Г.Є. Блок контролю фазних струмів станції керування та захисту заглибних електронасосних агрегатів // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблема енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» / Г.Є Кавченко, В.Ф. Яковлєв. Вип.10. – Харків: ХДТУСГ, 2002. – С.5.
79. Черноусова Л.В. Повышение эффективности защиты от перегрузки мощных двигателей. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. / Л.В. Черноусова, А.В. Зинченко. – 2002. - №3, - С.14 – 15.
80. Тищенко А.К. А.с. 1251223 СССР, МКИ Н 02 Н 7/09. / А.К. Тищенко, П.И. Савченко, И.П. Белаш (СССР). – 1986, Бюл. №30. – 3с.
81. Тищенко А.К. Защита электродвигателей вентиляционных установок с контролем тока в одной из фаз статорной обмотки // 1-я межвузовская конференция «Многоскоростной автоматизированный электропривод в

- сельском хозяйстве» / Тезисы докладов. / А.К. Тищенко, П.И. Савченко. –  
Зерноград, 1992. – С.19 – 20.
82. Тищенко А.К. А.с. 1675998 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для за-  
щиты электродвигателя от аномальных режимов работы / А.К. Тищенко,  
П.И. Савченко (СССР). – 1991, Бюл.№33. – 4с.
83. Овчаров В.В. А.С. 1056350 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для за-  
щиты трехфазных электродвигателей при опрокидывании / В.В. Овчаров,  
В.Н. Евтушенко, В.Я. Жарков (СССР). № 3422894/24 – 07; Заявлено  
16.04.83, Опубл. 23.11.83, Бюл. №8. – 3с.
84. Жарков В.Я. А.с. 1377956 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защи-  
ты трехфазных электродвигателей при опрокидывании / В.Я. Жарков, В.В.  
Овчаров, В.А. Мунтян (СССР). № 3988564/24 – 07; Заявлено 16.12.85,  
Опубл. 29.02.88, Бюл.№8. – 3с.
85. Кобылянский А.В. Тепловая защита электродвигателей / А.В. Кобылян-  
ский, А.Е. Рубаненко, А.М. Шумский// Энергетик. – 1987. - №7. – С.31 –  
32.
86. Пат. 237403 ГЛР, МКИ Н 02 Н 3/08. Verfahren zur avtomatlschen und kon-  
taktlosen Abschaltung eines erhohten Verbraucherstroms / Oostreigh Rlfus/ -  
№ 2763677; Заявлено 15.05.85, Опубл. 09.07.86.
87. Минаков В.Ф. А.с. 1582262 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Способ токовой за-  
щиты асинхронного электродвигателя / В.Ф. Минаков, Е.Ф. Минаков,  
И.А. Шихкеримов, С.Л. Кужеков (СССР). № 4467393 /24 – 07; Заявлено  
29.07.88, Бюл.№28, 1990. – 4с.
88. Чураков А.Я. А.с. 1568136 СССР, МКИ Н 02 Н 5/04, 7/08. Устройство для  
защиты группы электродвигателей от аварийных режимов / А.Я. Чураков,  
В.Я. Жарков (СССР). № 4474431 / 24 – 07; Заявлено 15.08.88, Опубл.  
30.05.90, Бюл. №20. – 4с.

89. Тубис Я. Б. Температурная защита асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве / Я.Б. Тубис, Г.К. Белов.– М.: Энергия, 1977. – 140с.
90. Богаенко И.Н. Температурная защита асинхронных электродвигателей / И.Н. Богаенко, Ю.В. Сердюк, М.А. Шатунов. – Киев: Техника, 1987. – 94с.
91. Васильченко В.И. А.с. 357644 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для температурной защиты электродвигателя / В.И. Васильченко, В.Б. Минько, Э.Ф. Романко, Б.С. Бабакин, Я.Б. Тубис, Г.К. Белов (СССР). Оpubл. 1972. Бюлю№33.
92. Тубис Я.Б. А.с. 363154 СССР. МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты асинхронного двигателя / Я.Б. Тубис, Г.К. Белов, Е.Е. Некрасов, В.Л. Легнер (СССР). Оpubл.1974. Бюл. №11.
93. Protecting motors against running overcurrent / Mc Partland James L. Elec. Contr. and Maint.- 1987. – 86. №6, p. 26 – 29.
94. Жарков В.Я. Устройство для защиты от перегрузки группы электродвигателей с коррекцией по температуре // Электрификация и теплофикация с.х. процессов. / В.Я. Жарков, А.Я. Чураков. – М.: АгроНИИТЭИИТО. – 1991. - №4. – С.1 – 4.
95. Устройство встроенной температурной защиты типа УВТЗ – 5. Руководство по эксплуатации. – Нальчик: НЗПП, 1988 – 8с.
96. Жарков В.Я. Устройство для температурной защиты нескольких электродвигателей // Электрификация и теплофикация с.х. процессов. / В.Я. Жарков, А.Я. Чураков. – 1990. - №3. – С.6 – 9.
97. Жарков В.Я. Разработка устройства для групповой температурной защиты электродвигателей // Тезисы конференции «Многоскоростной и электронизированный электропривод в с.х.». / В.Я. Жарков, А.Я. Чураков, А.М. Королев. – Зерноград, 1992. – С.17 – 18.

98. Жарков В.Я. Цифровой индикатор номера перегретого электродвигателя // Электрификация и теплофикация с.х. процессов. / В.Я. Жарков, Е.Г. Плотников. – М.: АгроНИИТЭИИТО. – 1990. - №3. – С.13 – 17.
99. Крутов В.И. Основы научных исследований. / В.И. Крутов, В.В. Попов. – М.: Высш.шк., 1989 – 128с.
100. Попова І.О. Патент 42932 А Україна, МПК<sup>7</sup> G01K7/16. Пристрій для контролю температури / І.О. Попова, А.В. Жарков (Україна). - № 2000020610; Заяв.04.02.2000; Опубл.15.11.2001, Бюл.№10.
101. Рожавский С.М. Несимметричные режимы работы сельскохозяйственных электрических сетей 380/220 В. / С.М. Рожавский. – М.: МИИСП,1970. – С.7 – 10.
102. Паперно Л.Б. Защита электродвигателей от работы в несимметричных режимах. / Л.Б. Паперно, М.М. Шумяцкий. – Рига: ЛатНИИНТИ, 1980.- С.7 – 10.
- 103.Кобзистый О.В. Совершенствование защиты электродвигателей от несимметрии питающего напряжения питающего напряжения: Автореф. дис... канд. техн. наук. Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия. / О.В. Кобзистый. – Зеленоград, 2000. – 24с.
104. Жарков В.Я. Діагностика режимів роботи та захисту електродвигунів в АПК. / В.Я. Жарков, І.О.Попова. – Деп.В ДНТБ України 27.07.2000, №158. Ук.2000. – 110с.
105. Данилов В.Н. Классификация устройства защиты электродвигателей от аварийных режимов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. / В.Н. Данилов.- 1987. - №6. – С.34 – 37.
106. Данилов В.Н. Защита электродвигателей от аварийных режимов // Техника в сельском хозяйстве. / В.Н. Данилов. – 1988. - №2. – С.19 – 22.
107. Попова И.А. Влияние асимметрии приложенного напряжения на работу асинхронного двигателя / И.А. Попова. - Сб. науч. трудов ТГАТА. – 1997. – Вып.1, Т.3 – С.23 – 27.

108. Сихиди Ф.Н. А.с. 1580479 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трёхфазного электродвигателя от обрыва фаз. / Ф.Н. Сихиди, Г.И. Поляков, В.И. Горбунов. №4343178/24 – 07; Заявлено 22.10.87, Бюл.№27, 1990. – С.252.
109. Алексеев В.С. Реле защиты / В.С. Алексеев, Г.П. Варчанов, Б.И. Панфилов, Р.З. Розенблюм. – М.: Энергия, 1967. – 464с.
110. Реле контроля трехфазного напряжения ЕЛ – 10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Внешторгиздат. – 6с.
111. Петько В.Г. Устройство для защиты трехфазных электродвигателей от асимметрии питающего напряжения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. - №10. – С.23 – 24.
112. Мазуха А.П. Защита двигателей при обрыве фазы // Техника в сельском хозяйстве / А.П. Мазуха. – 1987. - №7. – С.52.
113. Жарков В.Я. А.с. 1582260 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08. Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от неполнофазного режима и обратного чередования фаз / В.Я. Жарков, А.Я. Чураков (СССР). № 4441059/24 – 07; Заявлено 12.05.88, Опубл.30.07.90, Бюл.№28. – 4с.
114. Пат.238117 ГДР, МКИ G 01 R29/16/ Impedanznetzwerk fur Drehstromnetze zur Bildung eines Fehlersignals / Hullmann Frank, Eckardt Gunter, Liegmann Klaus, Ullman Bernd. - №2771845; Заявлено 10.06.88; Опубл. 06.08.89.
115. Пат. 131645 ПНР, МКИ Н 02 Н 7/08. Elektroniczny untad zabezpieczaiacy przed zta kolenoscia lub drakiem faz obwodachpradu troifazowego / Janues Marian, Gorajski Vichat, Zaktady Tworzyw.
116. Королев А.М. Совершенствование устройства фазочувствительной защиты // Механизация и электрификация сельского хозяйства. / А.М. Королев. – 1988. - №2. – С.31.
117. Попова І.О. Математична модель режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруги. // Праці Таврійської державної агротехнічної

- академії. / І.О. Попова, В.В.Овчаров. – Вип.5. – Мелітополь: ТДАТА, 2002. – С.11 – 18.
118. Попова І.О. Патент 50344 А Україна, МПК<sup>7</sup> H02H7/09. Пристрій захисту електродвигунів при несиметрії напруги / І. О. Попова, А.Я. Чураков, (Україна). - № 2001128981; Заяв.25.12.2001; Опубл.15.10.2002, Бюл.№10.
119. Мартиненко И.И. Проектирование систем автоматики. / И.И. Марыненко, В.Ф. Лысенко. – М.: Агроатомиздат, 1990. – 243с.
120. Савченко П.И. Устойчивость электропривода при аварийном снижении напряжения. // Питання електрифікації сільського господарства. Ювілейний науковий збірник ХДТУСГ. / П.И. Савченко, М.В. Худобин. – Харків: ХДТУСГ, 1998. –С.163 – 165.
121. Савченко П.И. Методика определения влияния отклонений напряжения на эффективность функционирования технологических процес сов сельскохозяйственного производства. // Питання електрифікації сільського господарства. Ювілейний науковий збірник ХДТУСГ. / П.И. Савченко. – Харків: ХДТУСГ, 1998. – С.240 – 242.
122. Савченко П.И. Пути повышения эффективности эксплуатации электрооборудования на малых сельскохозяйственных предприятиях // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». / П.И. Савченко, А.В. Уваров. – Вип. 6. – Харків: ХДТУСГ, 2001. –С.31 – 35.
123. Савченко П.И. Предварительная диагностика контактных соединений // Энергетика и электрификация. / П.И. Савченко, А.В. Уваров. - №8, 2001. С.31 – 35.
124. Савченко П.И. Анализ базовых методов и средств диагностирования электрооборудования сельскохозяйственного назначения// Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК

- України». / П.И. Савченко, А.В. Уваров. - Вип. 10. – Харків: ХДТУСГ, 2002. –С.203 – 216.
125. Савченко П.И. Устройство для регистрація замыканий ротора об обмотку статора. // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип.8. – Мелітополь: ТДАТА, 2002. – С.13 – 14.
126. Савченко П.И. Підвищення ефективності експлуатації енергетичного електрообладнання сільськогосподарських підприємств. // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. / П.И. Савченко, О.В. Мірошник, І.М. Трунова. - №1, 2003. – С.75 – 78.
127. Овчаров С.В. Диагностирование энергетических показателей асинхронных двигателей // Техника в сельскохозйственном производстве: Труды / Таврическая государственная агротехническая академия / С.В. Овчаров, Т.В. Нахаева. – Мелітополь: ТГАТА. – Т.1. – 1999. – С.8.
128. Вовк А.Ю. Диагностирование асинхронных двигателей при помощи круговой диаграммы // Техника в сельскохозйственном производстве: Труды / А.Ю. Вовк, С.В. Овчаров. - Мелітополь: ТГАТА. – Вип.1, Т.3. – 1997. – С.97 – 100.
129. Овчаров С.В. Дослідження симетричних складових асиметричної напруги на затискачах електродвигуна // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. / С.В. Овчаров. – Мелітополь:ТДАТА. – Вип.1, Т.17. – 2000. – С.8 – 10.
130. Овчаров С.В. Порівняльна характеристика режиму роботи асинхронного електродвигуна при автономному живленні та об'єднанні нульових точок // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». / С.В. Овчаров. – Вип.6. – Харків: ХДТУСГ, 2001.- С.376 – 377.
131. Овчаров С.В. Комп'ютерна система функціонального діагностування асинхронного електродвигуна // Праці / Таврійська державна агротехнічна

- академія. / С.В. Овчаров, І.І. Соловійов. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.8. – 2002. С.98 – 100.
132. Овчаров В.В. Поліпшення роботи асинхронних електродвигунів поточних технологічних ліній в аномальних режимах // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / В.В. Овчаров, С.В. Овчаров. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.6. – 2002. – С.7 – 11.
133. Овчаров С.В. Діагностування та захист електродвигунів поточної технологічної лінії за температурою сталі // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В. Овчаров. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.9. – 2002. – С.82 – 85.
134. Овчаров С.В. Сила струму, споживаного електродвигуном, як діагностичний параметр // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. / С.В. Овчаров. - №4, 2003. С.50 – 55.
135. Овчаров С.В. Пристрій контролю дії надструмів групи асинхронних електродвигунів // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». / С.В. Овчаров. – Харків: ХДТУСГ, 2003.- С.279 – 284.
136. Корчемний М.О. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М.О. Корчемний, В.С. Федорейко, В.М. Щербань/ - Тернопіль. Підручник і посібник, 2001. – 984 с.
137. Назарьян Г.Н. энергосберегающая САР режима установки кормоприготовления с настраиваемой моделью // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / Г.Н. Назарьян, И.Д. Труфанов, А.В. Пирожок, И.А. Андрияс. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.6. – 2002. – С.7 – 11.
138. Труфанов И.Д. Теоретические аспекты моделирования экспертных энергосберегающих систем // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика // Вестник національного технического университе-

- та «ХПІ»: Труды ХНТУ «ХПІ». / И.Д. Труфанов, В.И. Бондаренко, И.А. Андрияс, С.Р. Мохамад, Ю.Э. Пачколин. – Вып.10. – Харьков, 2001. – 6с.
139. Кравченко А.Н. Стохастический анализ и синтез параметров энерготехнологического оборудования в условиях резкопеременных нагрузок // Технічна електродинаміка: Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки», частина 6. / А.Н. Кравченко, И.Д. Труфанов, В.П. Метельский. – Київ, 2000. – С.55 – 60.
140. Трунова И.М. Регулирование напряжения на вводе в сельскохозяйственное помещение // Збірник наукових праць Харківського Державного технічного університету сільського господарства. / И.М. Трунова, М.И. Гончар, А.А. Ясько. – Харків: ХДТУСГ, 1998.- С.204 – 208.
141. Трунова М.И. Определение характера потребляемого из сети тока смешанной нагрузкой электрифицированных технологических установок // Збірник наукових праць Харківського Державного технічного університету сільського господарства. / И.М. Трунова. – Харків: ХДТУСГ, 1998.- С.204 – 208.
142. Савченко П.И. Применение ЭВМ для определения оптимального напряжения при использовании местного автоматического регулирования напряжения для технологических процессов сельскохозяйственного производства // Труды международной конференции «Автоматизация производственных процессов в сельском хозяйстве». / П.И. Савченко, И.М. Трунова. – Минск: БАТУ, 2000. – С.57 – 59.
143. Савченко П.И. Технічні засоби раціонального використання електроенергії в технологічних процесах сільськогосподарського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». / П.И. Савченко, И.М. Трунова. – Вип. 6. - Харків: ХДТУСГ, 2001.- С.427 – 430.
144. Трунова И.М. Пропозиції щодо вдосконалення методики планування технічної експлуатації енергетичного обладнання сільськогосподарських

- підприємств // Вісник Харківського Державного технічного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». / І.М. Трунова. Вип.6. - Харків: ХДТУСГ, 2003.- С.134 – 138.
145. Байков Н. Топливоно – энергетический комплекс // Мировая экономика и международные отношения./ Н. Байков. – 1999. - №8. – С.49 – 54.
146. Ольховский Г.Г. Пути развития мировой энергетики // Электрические станции. / Г.Г. Ольховский.- 1999. - №6. – С. 10 – 14.
147. Гнедой Н.В. Энергетическая ситуация в Украине // Промышленная энергетика. / Н.В. Гнедой. – 1998. – 33. – С.10 – 15.
148. Карп И.П. Экономические показатели использования различных видов топлива в энергетике // Экотехнологии и ресурсосбережение. / И.П. Карп. – 1999. - №4. – С. 3 – 7.
149. Плачков І.В. Сучасний стан і перспективи розвитку електроенергетики в Україні / І.В. Плачков, А.К. Шидловський, Б.С. Стогній, та ін. // Энергетика и электрификация. – 1999. - №5. – С.1 – 15.
150. Праховик А.В. Создание и многофункциональных систем розничных тарифов на электрическую энергию // Энергетика и электрификация. / А.В. Праховик, В.Ф. Находов. – 1996. - №1. – С.40 – 42.
151. Шидловський А.К. Энергоэффективность топливно - энергетического комплекса Украины: достижения, проблемы, перспективы // Технічна електродинаміка. Спец.випуск. – 1998. - №2 – Т2. – С.247 – 251.
152. The Transition to a Sustainable World Energy Supply. World Energy Council. 16 Congress, PS/SRD 2.4, Tokyo; 95. – P.123 – 142.
153. Аелаян Г.С. Организационные структуры энергосбережения зарубежных стран // Теплоэнергетика. // Г.С. Аелан, С.Д. Молодцов. – 1999. - №4. – С.70 – 74.

154. Тонкаль В.Е. Энергосберегающая политика Украины // Проблемы энергосбережения. / В.Е. Тонкаль, Н.В. Гнедой, М.И. Минц. – 1995. - №1. – С.32 – 41.
155. Мороз О.В. Енергетична оцінка прогресивних тенденцій розвитку сільського господарства України // Економіка АПК. / О.В. Мороз. – 1998. - №7. – С.34 – 38.
156. Коврига В.В. Використання паливно – енергетичних ресурсів у тваринництві // Економіка АПК. / В.В. Коврига. – 1999. - №8. – С.70 – 75.
157. Корчемный Н.А. Проблемы энергосбережения в сельскохозяйственном производстве Украины // Тезисы научно – технической конференции «Энергосбережение в сельском хозяйстве». / Н.А. Корчемный. – М.: ВИ-ЭСХ, 1998. – С.140 – 142.
158. Лінник М.К. Шляхи енергозбереження у сільському господарстві // Агротехсервіс. / М.К. Лінник. – 1996. - № 8 – 9.
159. Северенчук З.Л. Енергетична ціна сільськогосподарської продукції // Економіка АПК. / З.Л. Северенчук. – 1996. - №4. – С.44 – 50.
160. Масло І.П. Проблеми енергозбереження в сільському господарстві України // Тези доповіді науково – технічної конференції «Енергозберігючі технології та технічні засоби для виробництва сільськогосподарської продукції» (Глеваха, 1993). / І.П. Масло. – Глеваха:УААН, 1993. – С.3 – 7.
161. Хадыко С.С. Техничко - экономические аспекты энергосбережения в АПК // Изв.Вузов.Энергетика. / С.С. Хадыко, В.М. Колончук. – 1997. - № 7 – 8. – С.88 – 93.
162. Державна програма економії енергоресурсів в агропромисловому комплексі України. Наукова концепція. – К.: ІМЕСГ, 1993. – 71с.
163. Буравльов Є.П. Оцінка можливості енергосамозабезпечення окремих територіально – адміністративних одиниць // Экотехнологии и

- ресурсосбережение. / Э.П. Буравльов, В.С. Стогній, Ю.П. Чаплинський. – 1997. - №2. – С.3 – 8.
164. Глущенко Д.П. Шляхи зниження енергоємності кормо виробництва // Вісник аграрної науки. / Д.П. Глущенко. – 1996. - №10. – С. 28 – 32.
165. Украина: Энергосбережения в зданиях. – К.:ТАСIS, 1995. – 274 с.
166. Райченко О.Е. Нормы расхода электрической энергии в животноводстве. / О.Е. Райченко, Н.Г. Кривошей. – К.:МСХУ, 1980. – 20с.
167. Корчемный Н.А. Нормы потребления электрической энергии в сельскохозяйственном производстве / Н.А. Корчемный, А.Ф. Филоненко, В.П. Машевский и др. – К.: МСХУ, 1985. – 51с.
168. Гнідий М.В. Метод розрахунку повних енергетичних витрат на виробництво продукції // Екотехнології и ресурсосбережение. / М.В.Гнідий, Г.О. Куц, Д.А. Терещук. – 1977. - №5. – С. 67 – 72.
169. Севернев М.М. Методика энергетической оценки технологий и комплексов машин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. / М.М. Севернев, В.А. Токарев. – 1986. - №9.- С.9 – 11.
170. Масло І.П. Енергетична оцінка сільськогосподарського виробництва // Техніка АПК. / І.П. Масло, М.І. Грицишин, О.М. Грибинюк. – 1994. - №6. – С.7 – 9.
171. Поликарпов Е.А. Особенности оценки краткосрочных инвестиций предприятия в энергосбережение // Промышленная энергетика. / Е.А. Поликарпов. – 1996. - №4. – С.2 – 3.
172. Марченко О.В. Оценка экономической эффективности энергоисточников с учётом неопределённости исходных данных. / О.В. Марченко. - Иркутск: СЭИ СОР АН, 1995. – 25с.
173. Варварский В.С. Упрощенная методика технико – экономического расчёта обоснованности мероприятий по энергосбережению в рыночных условиях // Промышленная энергетика. / В.С. Варварский, М.Л. Жуков, Б.М. Красовский. – 1995. - №2. – С. 2 – 3.

174. Шелковский Б.И. Утилизация и использование вторичных энергоресурсов компрессорных станций. / Б.И. Шелковский, А.С. Патыченко, В.П. Захаров. – М.: Недра, 1991. – 160с.
175. Бартори И. Энергосберегающие технологии и агрегаты на животноводческих фермах. / И. Бартори, П. Рафай. – М.: Агропромиздат, 1988. – 228с.
176. Барышко Д.Я. Учёт расхода горячей и холодной воды у потребителей // Водоснабжение и санитарная техника. / Д.Я. Барышко, М.Н. Бурдинин, Г.Б. Корнеев. – 1997. - №9. – С.24 – 25.
177. Корчемний М.О. Розрахунок потужності електродвигунів для привода сільськогосподарських машин із випадковим навантаженням // Вісник сільськогосподарської науки. / М.О. Корчемний. – 1982. - №7. – С.48 – 52.
178. Корчемний М.О. Динаміка асинхронних електроприводів сільськогосподарських машин при випадкових навантаженнях: Автореф.дис...д.т.н.:05.20.02 / Нац. Аграрний університет. / М.О. Корчемний. – К., 1995. – 36с.
179. Радина Е. Алгоритм регулювання напруги асинхронних двигателів // Електричність. / Е. Радина. – 1983.- №9. – С.20 – 23.
180. Корчемний Н.А. Оптимізація параметрів регулюваного електропривода пастоизготовителя // Создание высокопроизводительных средств механизации в животноводстве. Научные труды ВНИПТИМЭСХ./ Н.А. Корчемний, В.А. Дацышин. – зерноград, 1990. – С.145 – 148.
181. Корчемний М.О. Оптимізація структури і режимів роботи електроприводів сільськогосподарських машин // Вісник Тернопільського державного технічного університету. / М.О. Корчемний, В.С. Федорейко. – 2000 – Т.5. - №1. – С.74 – 80.
182. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. / Б.С. Лезнов. – М.:ИК «Ягорба». – «Биоинформсервис», 1998. – 179с.

183. Мамлыга В. Энергосбережение в механизмах с «вентиляторным» характером загрузки // Материалы 1 – ой международной конференции по управлению использованием энергии. / В. Мамалыга, А. Соловей. – К.: Taccis, 1995. – С.104 – 110.
184. Вербовой П.Ф. Асинхронные двигатели для тиристорного электропривода. / П.Ф. Вербовой, А.П. Заболотный, А.М. Сьянов. – К.: Нукова думка, 1994. – 242с.
185. Барський В.А. Серія енергозберігаючих електроприводів РЕН потужністю від 1,1 до 320 кВт / В.А. Барський, Н.М. Дубов, А.А. Пащенко, І.В. Уфимцев. // Енергетична ефективність і екологія. – 1997. - №2. – С.4 – 6.
186. Исакова В.М. Регулируемые электропривода переменного тока в устройствах технологической автоматизации энергообъектов // Энергоинформ.- К. – 1997. - №5. – С.2.
187. Косоухов Ф.Д. Потери мощности и напряжение в сельских сетях 0,38 кВ при неполнофазных ответвлениях от трёхфазной линии // Механизация и электрификация сельского хозяйства. / Ф.Д. Косоухов. – 1985. - №2. – С. 10 – 12.
188. Правила устройства электроустановок. – М.:Энергоиздат, 1985. – 445с.
189. Рекомендации по рациональному использованию и экономии электрической энергии в личных подсобных хозяйствах и быту сельского населения. – М.:ВИЭСХ, 1989. – 39с.
190. Энергетика и нетрадиционные источники энергии в сельской местности // Сб. тр.Всесоюзного семинара по комплексным вопросам энергетики сельских районов. – Иркутск, 1988. – С.28 – 40.
191. Вихорев Ю.А. Проблемы малой энергетики как основы местной самоэнергоснабженности // Проблемы энергосбережения./ Ю.А. Вихорев, С.П. Денисюк. – 1995. - №2-3. – С.8 – 13.

192. Шульга В.Г. Основні результати та завдання впровадження нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії в Україні // *Енергетика и электрификация.* / В.Г. Шульга, В.П. Коробко, М.М. Жовнір. – 1995. - №2. – С.39 – 42.
193. Вихорев Ю.А. Энергетическая ситуация и использование солнечной энергии в Украине // *Гелиотехника.* / Ю.А. Вихорев. – 1997.- №5 – 6. – С.67 – 73.
194. Корчемный Н.А. Оценка длительности рабочих периодов использования источников возобновляемой энергии в сельскохозяйственном производстве // *Сб.тр. ИМЭСХ.* / Н.А. Корчемный, В.М. Головкин, Э.С. Вакал. – К.: Урожай, 1986. - №63. - С. 24 – 26.
195. Корчемный Н.А. Использование энергии солнца и ветра в сельском хозяйстве Украины / Н.А. Корчемный, В.П. Машевский, В.М. Головкин и др. – К.: АПК Украина, 1989. – 84с.
196. Ковилянський Я.А. Перспективи применения аккумуляторов фазового перехода // *Энергетическое строительство.* / Я.А. Ковилянський, В.И. Старостенко, Н.Н. Старостенко. – 1995. - №4. – С.45 - 48.
197. Кудря С.О. Системи акумулювання і перетворення енергії відновлювальних джерел // *Автореф.дис...д.т.н.* – К., 1996. – 37с.
198. Кибковский С.А. Разработка комбинированной системы теплоснабжения с использованием нетрадиционных экологически чистых источников энергии // *Автореф.дисс...к.т.н.* / С.А. Кибковский. – Днепропетровск, 1993. – 17с.
199. Масло І.П. Проблеми енергозбереження в сільськогосподарського виробництва України // *Тези доповіді міжнародної науково – технічної конференції «Енергосберегающие технологии и энергетические средства в сельскохозяйственном производстве»* / І.П. Масло. – Якимівка:УААН – ІМЕСГ, 1995 – С.3 – 4.

200. Масло І.П. Шляхи розвитку енергетичного, технічного та технологічного забезпечення сільськогосподарського виробництва в умовах ринку // Тези доповіді науково – технічної конференції з питань розвитку механізації та автоматизації сільськогосподарського виробництва в умовах ринкових відносин. / І.П. Масло. – Глеваха:УААН - ІМЕСГ, 1994. – С.4 – 8.
201. Рей Д. Экономия энергии в промышленности: Пер.с англ. / Д.Рей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 150с.
202. Кораблёв В.П. Экономия электроэнергии в быту. / В.П. Кораблёв. – М.: Энергоатомиздат, 1987. 96с.
203. Юревиц Э. Эффективность использования жидкого топлива, электроэнергии и теплоты грунта для обогрева жилых домов Ливанского экспериментального домостроительного комбината / Э.Юревиц, Л. Далберга, Е Рубе, А. Брокане // Использование тепловой энергии в сельском хозяйстве. – Елгава: ЛСХА,1985. Вып.228. – С.16 – 29.
204. Овчаров С.В. Діагностування та захист електродвигунів поточної технологічної лінії за температурою сталі магнітопроводу. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В.Овчаров. – Вип.5, - Мелітополь: ТДАТА, 2002. – 99с.
205. Овчаров В.В. Исследование режимов работы электродвигателей при объединении нулевых точек обмоток. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / В.В.Овчаров, С.В.Овчаров. – Вип.32. - Мелітополь: ТДАТА, 2005. – 148с.
206. Овчаров С.В., Витер В.А. Влияние качества напряжения на режим работы электродвигателей в условиях соизмеримой мощности. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В.Овчаров, В.А. Витер. – Вип.32. - Мелітополь: ТДАТА, 2005. – 148с.
207. Овчаров В.В. Тепловой переходный процесс в асинхронном электродвигателе при пуске в условиях соизмеримой мощности. // Праці / Таврійська

- державна агротехнічна академія. / В.В.Овчаров, С.В.Овчаров, В.А. Витер. – Вип.45. - Мелітополь: ТДАТА, 2006. – 148с.
208. Овчаров В.В. Методика аналитического исследования перегрузочных характеристик асинхронных электродвигателей из условия допустимого теплового износа изоляции. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / В.В.Овчаров, С.В.Овчаров, Н.В.Корецькая. – Вип.45. - Мелітополь: ТДАТА, 2006. – 148с.
209. Овчаров С.В. Методика исследования энергосберегающих режимов работы насосных агрегатов. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В.Овчаров. – Вип.8. Т.10. - Мелітополь: ТДАТА, 2008. – 184с.
210. Овчаров С.В. Динаміка вітроенергетичної установки з вертикальною віссю. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В.Овчаров, О.Ю. Михайленко – Вип.8. Т.10. - Мелітополь: ТДАТА, 2008. – 184с.
211. Овчаров С.В. Методика аналитического исследования пусковых режимов асинхронных электродвигателей в условиях соизмеримой мощности. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В.Овчаров, Д.В.Стойчев, В.А. Витер. – Вип.8. Т.10. - Мелітополь: ТДАТА, 2008. – 184с.
212. Овчаров С.В. Исследование потерь активной мощности и расхода ресурса изоляции силового трансформатора в квазиустановившемся режиме. / С.В. Овчаров. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2009. №44. – 162с.
213. Овчаров В.В. Исследование потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе в функции скольжения. / В.В.Овчаров, С.В. Овчаров, Р.В. Телюта, О.В. Юдина. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2009. №44. – 162с.
214. Овчаров С.В. Исследование потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе. / С.В. Овчаров, Р.В. Телюта. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – 151с.
215. Овчаров С.В. Діагностування перетворення електричної енергії в заглибному електродвигуні. // Праці / Таврійська державна агротехнічна

- академія. / С.В.Овчаров, А.В. Островський, С.Ф. Курашкін. – Вип.10. Т.4. - Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – 184с.
216. Овчаров С.В. Экспериментальное исследование параметров ветроэнергетической установки с вертикальной осью. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В.Овчаров, Е.Ю. Михайленко. – Вип.10. Т.4. - Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – 184с.
217. Овчаров С.В. Анализ влияния параметров системы «электродвигатель – рабочая машина» на тепловые переходные процессы при пуске двигателя. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В.Овчаров, Д.В. Стойчев. – Вип.10. Т.4. - Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – 184с.
218. Овчаров С.В. Конструктивные особенности ВЭУ с поворотными лопастями и вертикальной осью. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / С.В.Овчаров, Е.Ю. Михайленко. – Вип.11. Т.3. - Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – 180с.
219. Овчаров В.В. Пути энергосбережения при передаче и преобразовании энергии в агропромышленном комплексе. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / В.В. Овчаров, С.В. Овчаров. – Вип.11. Т.3. - Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – 180с.
220. Островский А.В. Исследование потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе. // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. / А.В. Островский, С.В. Овчаров, Р.В. Телюта. – Вип.11. Т.3. - Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – 180 с.
221. Овчаров С.В. Аналітичне дослідження електромеханічних перехідних процесів при пусках асинхронних електродвигунів в умовах порівняльної потужності. // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК» / С.В. Овчаров. – К., 2011. – Вип.166, ч.4 – С. 187 – 193
222. Овчаров С.В. Аналитическое исследование тепловых переходных процессов при пуске асинхронных электродвигателей в условиях соизмеримой

- мощности. // Общегосударственный научно-производственный информационный журнал «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит» / С.В. Овчаров. – Харьков, 2011. – №12(94) – С. 59 – 65
223. Овчаров С.В. Аналитическое исследование расхода ресурса изоляции асинхронного электродвигателя в послепусковой период. // Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет. / С.В. Овчаров, А.А. Сребков. – Вип.12. Т.2. - Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – С. 73 – 80
224. Патент на корисну модель № 38435 Україна, МПК (2006) H05B 6/00 Проточний водонагрівач трансформаторного типу / С.В. Овчаров – u2008 10570; Заявл. 21.08.2008; Опубл. 12.01.2009, Бюл. №1.
225. Патент на корисну модель № 50427 Україна, МПК (2009) F03D 7/00 Вітроенергетична установка з вертикальною віссю / С.В. Овчаров, О.Ю. Михайленко – u2000 12539; Заявл. 03.12.2009; Опубл. 10.06.2010, Бюл. №11.