UNIVERSITATEA AGRARĂ DE STAT DIN MOLDOVA

Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 621.313.333

ȘAPOVALOV VEACESLAV

PERFECȚIONAREA DISPOZITIVELOR DE PROTECȚIE A MOTOARELOR ELECTRICE ASINCRONE TRIFAZATE UTILIZATE IN AGRICULTURĂ

SPECIALITATEA: 255.01 – TEHNOLOGII ȘI MIJLOACE TEHNICE PENTRU AGRICULTURĂ ȘI DEZVOLTAREA RURALĂ

Teză de doctor în științe tehnice

Conducător științific: Volconovici Liviu
profesor universitar,
doctor habilitat

Autorul: Șapovalov Veaceslav

CHIȘINĂU 2019

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОЛДОВЫ

На правах рукописи
УДК: 621.313.333

ШАПОВАЛОВ ВЯЧЕСЛАВ

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ТРЁХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ: 255.01 – ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный руководитель: Волконович Ливиу
профессор,
доктор хабилитат

Автор: Шаповалов Вячеслав

КИШИНЕВ 2019

© Шаповалов Вячеслав, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ADNOTARE **6**

АННОТАЦИЯ **7**

ANNOTATION **8**

СПИСОК АББРЕВИАТУР **9**

ВВЕДЕНИЕ. **10**

1. АНАЛИЗ ПАРКА, УСЛОВИЙ РАБОТЫ И ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ТРЁХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЖИВОТНОВОДСТВА РМ **17**

1.1 Анализ парка электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве на примере животноводства республики Молдова. 17

1.2 Факторы, влияющие на эксплуатационную надежность трёхфазных асинхронных двигателей, применяемых в животноводстве. 22

1.3 Основные причины выхода из строя асинхронных электродвигателей применяемых в животноводстве. Краткая характеристика применяемых защит. 27

1.4 Выводы по первой главе. 35

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ «НУЛЬ ДВИГАТЕЛЯ - НУЛЬ СЕТИ» КАК ИСТОЧНИКА АВРИЙНОГО СИГНАЛА ОБРЫВА ФАЗ **36**

2.1 Системы «нуль двигателя – нуль сети» как источник напряжения третьей гармоники с частотой 150 Гц. 36

2.2 Разработка математической модели трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя. Программа расчета параметров асинхронного двигателя. 41

2.3 Экспериментальные исследования системы нуль двигателя – нуль сети как источника аварийного сигнала обрыва фаз. 62

2.4 Выводы по второй главе. 81

3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТРЁХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ АВАРИЙНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ И ОБРЫВА ФАЗ **83**

3.1 Разработка и исследования измерительного преобразователя тока как источника сигнала аварийной перегрузки асинхронного электродвигателя. 83

3.2 Разработка структурной и принципиальной электрической схемы универсального защитного устройства. 95

3.3 Экономический эффект от внедрения разработанного универсального защитного устройства. 111

3.4 Выводы по третьей главе. 116
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ 118
БИБЛИОГРАФИЯ....120
ПРИЛОЖЕНИЯ 133
Приложение 1. Количество установленных и вышедших из строя асинхронных двигателей на объектах сельскохозяйственного назначения....134
Приложение 2. Программа расчетов параметров асинхронных двигателей с применением математической модели. 137
Приложение 3 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований системы «нуль двигателя – нуль сети» 146
Приложение 4. Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований датчиков тока....153
Приложение 5. Обзор патентной литературы. 162
Приложение 6. Результаты расчетов некоторых параметров асинхронных двигателей, выполненных с применением математической модели. 164
Приложение 7. Матрицы электромагнитных параметров трёхфазного асинхронного двигателя. 176
Приложение 8. Установочные таблицы для настройки пороговых элементов канала контроля токовой перегрузки. 180
Приложение 9а. Документы по внедрения разработанного защитного устройства 183
Декларация об ответственности 187
CV автора 188

ADNOTARE

la teza de doctor în ştiinţe tehnice cu tema: **„Perfecţionarea dispozitivelor de protecţie a motoarelor electrice asincrone trifazate utilizate în agricultură",** Veaceslav Şapovalov,

Chişinău, 2019.

Structura tezei include: introducere, trei capitole, concluzii generale şi recomandări, bibliografie din 176 surse, 9 anexe, 120 pagini text de bază, 39 figuri, 68 tabele, rezultatele cercetării sunt publicate în 19 lucrări ştiinţifice.

Cuvinte cheie: protecţia motoarelor asincrone, fiabilitatea funcţionării motoarelor asincrone, modelul matematic al unui motor de inducţie.

Scopul cercetării: constă în elaborarea unui dispozitiv universal pentru protecţia motoarelor electrice asincrone trifazate de principalele regimuri de rezervă.

Obiectivele cercetării constau în elaborarea unei scheme structurale şi conceptuale al dispozitivului de protecţie pe baza cercetării efectuate şi a modelului matematic propus.

Metodologia cercetării ştiinţifice include metodele de analiză, sinteză, modelare şi metoda ipotetică utilizată.

Noutatea şi originalitatea ştiinţifică constă în dezvăluirea esenţei apariţiei tensiunilor armonice ridicate în cablul zero a unui motor asincron.

Problema ştiinţifică importantă soluţionată în domeniul cercetat. Este obţinută o justificare teoretică a prezenţei în cablul zero a motorului asincron a unei tensiuni înalte armonice şi sunt determinaţi factorii care influenţează magnitudinea acestei tensiuni şi limitele modificării sale.

Semnificaţia teoretică a cercetării constă în justificarea schemei structurale şi a parametrilor necesari pentru toate tipurile de dispozitive de protecţie, a căror funcţionare se bazează pe apariţia unei tensiuni în cablul zero în momentul întreruperii fazei de alimentare.

Valoarea aplicativă a lucrării constă în faptul că caracteristicile obţinute pe cale experimentală ale unui motor asincron au servit drept bază pentru fundamentarea şi elaborarea sarcinii de proiectare a unui dispozitiv de protecţie universal, adică aducându-l la nivelul unei probleme de inginerie.

Implementarea rezultatelor ştiinţifice. Cercetările analitice şi experimentale au fost utilizate la elaborarea dispozitivului universal de protecţie, ale cărui mostre experimentale au fost implementate într-un şir de gospodării agricole din Republica Moldova (s. Volontirovca, r-ul Stefan-Vodă, ferma avicolă) şi din Rusia (or. Moscova, întreprinderile de apărare nr. 107078 şi nr. 125833).

АННОТАЦИЯ

докторской диссертации на соискание учённой степени доктора технических наук на тему; **"Усовершенствование устройств защиты трёхфазных асинхронных двигателей сельскохозяйственного применения"**, Вячеслав Шаповалов, Кишинев, 2019.

Структура диссертации состоит из: введения, трёх глав, общих выводов и рекомендаций, библиографии из 176 наименований, 9 приложений, 120 страниц основного текста, 39 рисунков, 68 таблиц, научные результаты были опубликованы в 19 научных работах.

Ключевые слова: защита асинхронных двигателей, надежность работы асинхронных двигателей, математическая модель асинхронного электродвигателя.

Цель исследования заключается в разработке универсального устройства защиты трехфазных асинхронных электродвигателей от основных аварийных режимов.

Задачи исследования заключаются в разработке структурной и принципиальной схемы защитного устройства на базе расчётов предложенной математической модели и выполненных исследований характеристик двигателей, работающих в аварийных режимах.

Методология научного исследования включает в себя использованные методы анализа, синтеза, моделирования и гипотетический метод

Научная новизна и оригинальность заключается в раскрытии сущности возникновения напряжения высших гармоник в нулевом проводе асинхронного двигателя и разработке специализированной математической модели асинхронного двигателя позволяющего определять напряжение высших гармоник в нулевом проводе.

Важная научная проблема, которая решена. Получено теоретическое обоснование наличия в нулевом проводе асинхронного двигателя напряжения высших гармоник, определены факторы, влияющие на величину этого напряжения и пределы его изменения.

Теоретическая значимость исследования состоит в обоснованности типовой структурной схемы и необходимых параметров для защитных устройств, работа которых основана на появлении напряжения в нулевом проводе в момент обрыва питающей фазы.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что полученные экспериментально характеристики асинхронного двигателя послужили основой для обоснования и разработки задания на проектирование универсального защитного устройства, то есть доведение его до уровня инженерной задачи.

Внедрение научных результатов. Опытные образцы защитного устройства были внедрены на ряде предприятий в России (г.Москва, оборонные предприятия №107078 и №125833).

ANNOTATION

Doctoral thesis in technical sciences: **„Improvement of protection devices for three-phase asynchronous motors used for agricultural purposes”,** Veaceslav Sapovalov,

Chisinau, 2019.

Thesis structure includes: the introduction, three chapters, general conclusions and recommendations, a bibliography of 176 sources, 9 annexes, and 120 pages of the basic text, 39 figures and 68 tables, research results are published in 19 scientific papers.

Key words: protection of asynchronous motors, reliability of asynchronous motors, mathematical model of an induction motor.

The purpose of research: to develop a universal device for the protection of asynchronous three-phase electric motors according to the main reserve regimes.

The objectives of research: to develop a structural and conceptual scheme of the protective device based on the performed research and the proposed mathematical model.

The methodology of scientific research includes the methods of analysis, synthesis, modeling and hypothetical method used.

Scientific novelty and originality of the research consist in identifying the essence of the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable of an asynchronous motor.

The important scientific problem solved in the researched field. It was reached a theoretical argumentation justifying the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable of an asynchronous motor and there were determined the factors that influence the magnitude of this voltage and the limits of its change.

The scientific significance of research consists in justifying the structural scheme and the required parameters for all types of protection devices, the operation of which is based on the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable when interrupting power supply.

The applicative value of research consists in the fact that the obtained experimental characteristics of an asynchronous motor have served as a basis for substantiating and developing concrete task for designing a universal protective device, i.e. bringing it to the level of an engineering problem.

The implementation of scientific results. Analytical and experimental researches were used to develop the universal protection device, the experimental samples of which were implemented in a range of agricultural farms from the Republic of Moldova (the poultry farm located in Volontirovca village, Stefan-Voda district) and Russia (defense enterprises nr. 107078 and nr. 125833 from Moscow)

СПИСОК АББРЕВИАТУР

РМ – Республика Молдова

РФ – Российская Федерация

США – Соединённые штаты Америки

СНГ- Содружество Независимых Государств

ВВП – Валовый внутренний продукт

АПК – Аграрно-промышленный Комплекс

ВНТК – Всесоюзная научно-техническая конференция

МНТК - Международная научно-техническая конференция

НТК - Научно-техническая конференция

КТУ – Кишинёвский Технический Университет

АН РМ – Академия наук Республики Молдова

ГАУМ – Государственный Аграрный Университет Молдова

ВНИИ – Всероссийский научно-исследовательский институт

ЭСХ – Электрификация сельского хозяйства

МТФ – Молочно-товарная ферма

СТФ – Свиноводческая товарная ферма

НТП – Нормы технологического проектирования

ТОЭ – Теоретические основы электротехники

ПУЭ – Правила устройств электроустановок

ЭВМ – Электронно-вычислительная машина

УВТЗ – Универсальная встроенная температурная защита

ФУЗ – Фазочувствительное устройство защиты

УЗУ – Универсальное защитное устройство

ЭДС – Электродвижущая сила

МДС – Магнитодвижущяя сила.

ВВЕДЕНИЕ.

Актуальность темы исследования.

Сельское хозяйство являться базовой частью национальной экономики Молдовы. Доля сельского хозяйства в ВВП страны составляет 17%, а совместно с перерабатывающей промышленностью сельскохозяйственного сырья - около 35% объема ВВП и примерно 50% от общего объема экспорта. В данном секторе страны занято свыше 33% рабочей силы страны. На сегодняшний день сельское хозяйство и перерабатывающая промышленность Молдовы дает более 3/5 объема национального дохода.

Сегодня экономика сельского хозяйства Республики Молдова переживает кризис. Нарушились межотраслевые связи в АПК. Из-за диспаритета цен сельские товаропроизводители получают лишь 10-15 % дохода от конечной продукции, в которой их затраты составляют 65-70 %. Ухудшилась материально-техническая база сельского хозяйства. Резко ухудшились финансовые результаты их деятельности - около 80 % предприятий стали убыточными. Одной из наиболее острых проблем государства и его регионов остается проблема продовольственной безопасности.

Вместе с тем сельское хозяйство располагает большими ресурсами, позволяющими улучшить положение. Главное богатство - это земля. За последние годы в республике выведены новые сорта продовольственных культур и породы животных, не уступающие мировым образцам. На селе проживает около 40% населения, большинство из них имеет длительный опыт работы в сельском хозяйстве, обладает необходимыми навыками и трудолюбием. Сельское хозяйство располагает многочисленными кадрами специалистов и руководителей высшей квалификации. Высок научный потенциал агропромышленного комплекса. Всё это даёт основание считать, что при правильной аграрной политике руководства страны сельское хозяйство можно сделать не только рентабельным, но и высоко доходным.

Сельское хозяйство является развивающейся отраслью народного хозяйства Республики Молдова. Развитие сопровождается увеличивающимся потреблением энергии, в общем балансе которой значительную и быстро растущую долю занимает электрическая энергия. Из всех видов энергии она наиболее легко транспортируется, преобразовывается и используется. С каждым годом появляется все больше способов и технологий ее применения. Новые машины, механизмы и технологии, порожденные научно-техническим прогрессом, требуют для своего осуществления именно электроэнергию.

Животноводство - вторая после растениеводства отрасль сельского хозяйства, значение которой невозможно переоценить. Эта отрасль специализируется на мясомолочном

скотоводстве, свиноводстве, овцеводстве и птицеводстве. Животноводство обеспечивает производство примерно 30,0% продукции сельского хозяйства по стоимости.

Практика показывает, что животноводство является самой энергоёмкой отраслью сельского хозяйства. На каждом животноводческом предприятии сегодня сосредоточено от нескольких десятков до нескольких сотен различных электродвигателей, приводящих в действие основное технологическое оборудование.

В связи с созданием многочисленных животноводческих ферм и быстрыми темпами их развития значительно возросла доля асинхронных электродвигателей, используемых для механизации трудоемких технологических процессов. При этом, чем выше уровень механизации производства, тем выше требования, предъявляемые к надежности электрооборудования. Сегодня надежная работа электрооборудования стала одним из главных условий нормального функционирования сельскохозяйственных предприятий.

Учитывая это, электротехническая промышленность проделала большую работу по улучшению характеристик и эксплуатационных показателей электродвигателей и пускозащитной аппаратуры. В последние годы в сельское хозяйство поступили новые асинхронные двигатели серий 4А, 5А и АИР, включающие и сельскохозяйственную модификацию (СХ), которая имеет изоляцию с повышенной стойкостью к действию влаги и химически активных веществ (аммиака, сероводорода). Именно поэтому, трёхфазные короткозамкнутые асинхронные двигатели последних серий считаются самыми надежными электрическими машинами.

Однако в сельском хозяйстве наблюдается сравнительно высокий процент их выхода из строя. Объясняется это главным образом тем, что в процессе эксплуатации возникают такие условия, на которые машина не рассчитана при проектировании. В итоге сельское хозяйство РМ терпит большие убытки от отказов в работе электрооборудования. Так, например, выход из строя электродвигателя малой или средней мощности обходится хозяйствам примерно в 700-1200 леев Технологические потери из-за отказа электродвигателя, как правило, значительно превышают его стоимость. Так, например, отказ хотя бы одного из элементов электрооборудования в поточной линии доения и первичной обработки молока на МТФ на 200 голов приводит к производственному ущербу, оцениваемому почти в 7000 леев, что во много раз превышает стоимость отказавшего устройства.

Аналогичная картина и в хозяйствах СНГ. Исследования, проведенные во Всероссийском Институте Электрификации Сельского Хозяйства (ВИЭСХ) показали, что ущерб от аварии одного даже небольшого электродвигателя в сельском хозяйстве России составляет примерно 2500-3500 рублей.

Из анализа материалов, полученных по результатам проведенных исследований, следует, что ежегодно в Молдове сдается в ремонт примерно 15-19% от всех установленных в хозяйствах электродвигателей. Исследованиями, проведенными в других странах с развитым животноводством: (Эстония, Латвия, Украина, США) - установлено, что в отдельные месяцы года в этих странах в ремонт сдавалось до 12,5-15,0 % всех электродвигателей, что значительно больше количества новых электродвигателей, вновь поступающих в хозяйства.

Как показали многочисленные исследования, одной из основных причин этого, является недостаточно надёжная защита электродвигателей от аварийных режимов. Широко применяемые в настоящее время тепловые реле и встроенная температурная защита не обеспечивают надёжную защиту электродвигателей сельскохозяйственных машин и механизмов, особенно при работе в неполнофазном режиме и в режиме заторможенного ротора, а это самые опасные аварийные режимы асинхронных электродвигателей. Следствием такого положения является низкая эксплуатационная надежность электродвигателей в сельском хозяйстве – в среднем их срок службы не превышает 4,0-5,0 лет, а в животноводстве всего 3,0-4,0 года при общей наработке 1500-2500 часов. Таким образом, ежегодно в сельском хозяйстве РМ необходимо восстанавливать огромное количество отказавших электродвигателей, на что расходуется большое количество дефицитных материалов, электроэнергии и дорогого рабочего времени.

Поэтому проблема повышения эксплуатационной надежности электродвигателей в сельском хозяйстве посредством совершенствования их защиты является актуальной и имеет большое народнохозяйственное значение.

Актуальным вопросам эксплуатационной надежности работы сельскохозяйственного электрооборудования посвящены работы известных авторов в области сельской электрификации: В.П. Берзан, Л.Ф. Волконович, Ф.М. Ерхан, В.М. Постолатий, И.А. Будзко, А.М. Мусин, И.И. Мартыненко, А.А. Пястолов, В.Г. Прищепа и других авторов. В них отмечается, что низкая эксплуатационная надежность работы электрооборудования в сельском хозяйстве определяется целым рядом взаимосвязанных факторов.

Особо следует отметить фактор отсутствия надежных устройств защиты от работы в анормальных режимах. Высокая аварийность сельских электродвигателей на 70% объясняется ненадёжностью работы именно защитных устройств.

При проектировании электродвигателей и их защитных устройств, берут за основу расчета так называемые «нормальные» условия, т.е. такие условия при которых параметры электродвигателя принимают номинальные значения. Однако, в процессе эксплуатации,

электродвигатели часто попадают в условия резко отличные от расчетных, при этом их параметры начинают изменяться в широких пределах. Работа электродвигателя, в таких анормальных условиях чаще всего и является причиной их преждевременного выхода из строя. Поэтому для повышения эксплуатационной надежности асинхронных двигателей целесообразно исследовать их работу как в номинальных, так и в аварийных режимах и уже на базе этого выполнять разработку нового или усовершенствование существующего защитного устройства.

Цель и задачи научных исследований.

Как отмечалось ранее исходной информацией для усовершенствования устройств защиты являются характеристики асинхронного двигателя, как объекта зашиты, в нормальных и аварийных режимах работы. То есть свойства устройств защиты должны быть согласованы со свойствами объекта защиты. Из этого вытекают цель и задачи настоящей работы.

Цель работы заключается в разработке универсального устройства для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей от основных аварийных режимов.

В процессе работы необходимо решить следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ видов и типов трёхфазных асинхронных двигателей, используемых в сельском хозяйстве РМ (на примере животноводства), а также условий их работы и внешние факторы, влияющие на их эксплуатационную надежность.
2. Разработать математическую модель трёхфазного асинхронного электродвигателя, работающего в условиях насыщения магнитной системы.
2. В соответствии с математической моделью разрабатывать программу расчетов необходимых характеристик асинхронного электродвигателя.
3. Согласно выполненным расчетам и данным, полученным в ходе экспериментов обосновать и разработать структурную схему универсального защитного устройства.
4. Разработать принципиальную электрическую схему защитного устройства. Выполнить расчеты элементов принципиальной электрической схемы.
6. Обосновать область использования предлагаемого защитного устройства и определить экономическую эффективность его применения.

Методология научных исследований.

Аналитические исследования системы нуль двигателя - нуль сети (как источник аварийного сигнала обрыва фаз) выполнены на основе разработанной математической модели асинхронного электрического двигателя как ферро магнитного устройства с

вращающимся магнитным полем и их сравнении с результатами экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования системы нуль двигателя - нуль сети выполнены в лабораторных условиях на специально разработанном стенде и в производственных условиях (в ряде хозяйств республики).

Экспериментальные исследования первичного преобразователя тока (как источника сигнала аварийной перегрузки) выполнены в лабораторных условиях на специально разработанном стенде.

При проведении научных исследований были использованы различные научные методы. Метод *анализа* в разделе – «Анализа парка асинхронных двигателей, используемых в сельском хозяйстве РМ». Метод *синтеза* – при обобщении результатов проведении исследований характеристик системы «нуль двигателя - нуль сети». Метод *моделирования* - при разработке специализированной математической модели асинхронного двигателя. Метод *гипотетический* - при определении сущности появления напряжения в нулевом проводе асинхронного двигателя.

Научная гипотеза. В процессе предварительных исследований было установлено наличие в нулевом проводе трёхфазных асинхронных двигателей последних серий напряжения высших гармоник. Исходя из этого, нами было высказано гипотеза о том, что природой появления этих гармоник напряжения является не конструктивная асимметрия двигателя или питающей сети, как считалось ранее, а насыщение его магнитной системы.

Научная новизна исследования состоит в раскрытии сущности возникновения напряжения высших гармоник в нулевом проводе асинхронного двигателя. Т.е. асинхронные двигатели последних серий является в магнитном плане не линейными элементами, генерирующими в фазных обмотках напряжения высших гармоник, и наличие которых необходимо обязательно учитывать при разработке защит, основанных на использовании напряжения нулевой последовательности в качестве сигнала авариного режима обрыва фазы.

Теоретическая значимость проведённых исследований заключается в том, что была предложена специализированная математическая модель, позволяющая определять величину напряжения высших гармоник в нулевом проводе электродвигателя. Обоснованы параметры и характеристики предложенного универсального защитного устройства, определены его структурная и принципиальная электрические схемы, установлены его функциональные возможности и область применения. Научная новизна принятых технических решений подтверждена тремя авторскими свидетельствами по данной теме.

В результате проведённых научных исследований была решена *важная научная проблема* которая заключается в раскрытии сущности возникновения напряжения высших гармоник в нулевом проводе трёхфазных асинхронного двигателя.

Апробация результатов научных исследований.

Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на республиканских и международных научных семинарах, и конференциях:

1. II ВНТК «Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов», Днепродзержинск, 1985 г.
2. XX РНТК, КТУ, Кишинэу, 1986 г.
3. V ВНТК «Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов», Каунас, 1988 г.
4. XXII РНТК, КТУ, Кишинэу, 1989 г.
5. Юбилейный международный симпозиум ГАУМ, Кишинэу, 2000 г.
6. V МНТК ВНИИ ЭСХ, Москва, 2006 г.
7. VII МНТК ГАУМ, Кишинэу, 2015 г.
8. МНТК АН РМ, «Институт энергетики», Кишинэу, 2016 г.
9. На научных семинарах кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» КТУ и ГАУМ.

Структура работы с кратким изложением содержимого разделов.

Работа состоит из: введения, трёх глав, общих выводов и рекомендаций, библиографии из 176 наименований, 9 приложений, 120 страниц основного текста, 39 рисунков, 68 таблиц. Научные результаты были опубликованы в 19 научных работах.

В первой главе диссертации – «Анализ парка, условий работы и основных факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность асинхронных двигателей сельскохозяйственного применения (на примере животноводства РМ)» выполнен анализ парка асинхронных двигателей сельскохозяйственного применения и основных факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность. Определены основные причины выходов их из строя. Дана краткая характеристика применяемых видов защиты.

Во второй главе диссертации «Теоретических и экспериментальных исследований системы «нуль двигателя - нуль сети» как источника аварийного сигнала обрыва фаз» рассмотрены вопросы теоретического обоснования появления в нулевом проводе асинхронного двигателя напряжения высших гармоник и экспериментально определены факторы, влияющие на величину этого напряжения и пределы его изменения.

В третьей главе «Разработка и исследование универсального устройства защиты трёхфазного асинхронного двигателя от аварийной перегрузки и обрыва фаз» рассмотрены вопросы разработки структурной и принципиальной электрической схемы универсального защитного устройства, а также выбор и расчёт элементов принципиальной электрической схемы, ожидаемого экономического эффекта от его внедрения и срока окупаемости дополнительных затрат.

Ключевые слова: защита асинхронных двигателей, надежность работы асинхронных двигателей, математическая модель асинхронного электродвигателя.

1. АНАЛИЗ ПАРКА, УСЛОВИЙ РАБОТЫ И ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ТРЁХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЖИВОТНОВОДСТВА РМ

1.1 Анализ парка электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве на примере животноводства республики Молдова.

Сельское хозяйство Республики Молдова все более интенсивно насыщается современным электрифицированным технологическим оборудованием [19,31]. При этом на долю электропривода сельскохозяйственных машин приходится более 60% всей установленной мощности электроустановок и лишь 40% на другие потребители электроэнергии [94].

В настоящее время сельское хозяйство превратилось в одного из крупнейших потребителей низковольтных электродвигателей, особенно малой и средней мощности [157]. Непрерывно растет удельный вес асинхронных электродвигателей (от общего количества электродвигателей, поставляемых сельскому хозяйству). Это характеризуется следующими цифрами: 1995г.-37%, 2000г.-39 %, 2005г.-42%, 2010г.-46 %, 2015г.-51% ,2017-57% [94]. По данным Национального бюро статистики РМ на 01.01.2017.г в сельском хозяйстве работало свыше 970 тысяч асинхронных электрических двигателей с общей установленной мощностью свыше 630 тыс. кВт.

Практика эксплуатации асинхронных электродвигателей сельскохозяйственного применения показывает их высокую аварийность, что диктует необходимость поиска путей повышения их эксплуатационной надёжности, в том числе разработки новых и усовершенствования старых защитных устройств.

Исходя из этого, цель работы заключается в исследовании характеристик асинхронных двигателей, работающих в условиях аварийных режимов и в разработке универсального устройства защиты трехфазных асинхронных электродвигателей от этих аварийных режимов.

Для изучения поведения электродвигателей в анормальных условиях можно использовать либо метод экспериментальных исследований, либо метод математического моделирования. В работе использовано, как наиболее целесообразное, сочетание обоих этих методов.

Практическая значимость работы состоит в разработке универсального защитного устройства и обосновании типовой структурной защитных устройств, работа которых основана на появлении напряжения в нулевом проводе в момент обрыва питающей фазы.

Анализ парка электродвигателей, применяемых в животноводстве РМ, проведенный по материалам типовых проектов [142, 143, 144, 145, 146, 147] и по результатам непосредственных обследований на ряде крупных животноводческих предприятий Молдовы [100], показал, что в технологических процессах используются в основном электродвигатели серий А2, АО2, АО2…СХ, 4А, 4А…СХ с классом изоляции Е, В, мощностью от 0,18 до 75,0 кВт. Причем, территориально, они распределены следующим образом. В помещениях, где непосредственно содержится животные – 39,6%, в кормоцехах – 23,9%, в помещениях первичной обработки сельскохозяйственной продукции (доильные залы, молочные, холодильники и т.п.) – 16,5%. Таким образом, около 80% всех электродвигателей сосредоточены в помещениях производственной зоны в условиях повышенной влажности и химически агрессивной среды.

Как уже отмечалось, в сельском хозяйстве Республики Молдова используются асинхронные двигатели широкого диапазона мощностей. Однако количественное распределение их по мощности оказалось весьма неравномерное. Условно примем, что электродвигатели мощностью 0,18-3,0 кВт - это двигатели малой мощности, 3,0-11,0 кВт - средней мощности и свыше 11,0 кВт - большой мощности. В соответствии с этим распределение электродвигателей по мощности на объектах с/х назначения Молдовы будет соответствовать диаграмме на Рис. 1.1.

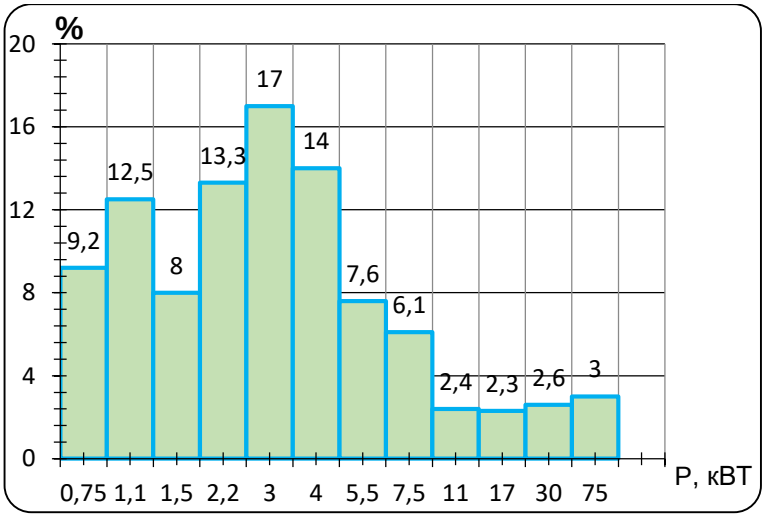


Рис. 1.1 Распределение асинхронных электродвигателей по мощности (в % от общего количества) на объектах с/х назначения Молдовы. Разработано автором на основе данных [100].

Такое распределение электродвигателей по мощности и значительная доля двигателей малой и средней мощности объясняется преобладающим влиянием такой отраслям сельского

хозяйства как животноводство. В качестве примера в Таблице №1.1 дано распределение двигателей по мощности на СТФ в селе Ешница Сорокского района.

Таблица №1.1. Распределение электродвигателей по мощности на СТФ село Ешница, Сорокский район. Разработано автором на основе данных [100].

Технологическая операция	**Количество (шт.)**	**Номинальная мощность (кВт)**
Установка «Климат-47»	110	P=1,1 кВт
Приточно-вытяжная вентиляция	96	P=2,2 - 3,0 кВт
Кормораздача	22	P=0,18 - 0,55 кВт
БИМ	16	P=1,1 кВт
Артезианские скважины	8	P=11,0 кВт
Другие технологические операции	48	P=0,55 - 3.0 кВт
Итого: Всего по ферме:	300 367	(82%) (100%)

Из диаграммы на Рис.1.1 следует - в сельском хозяйстве Молдовы примерно 60% от общего числа электрических двигателей составляют электродвигатели малой мощности, электродвигатели средней мощности – 32,1%, двигатели большой мощности лишь 7,9%. Результаты проведённых исследований показали, что для обеспечения технологических процессов на животноводческих фермах РМ используются в основном электродвигатели малой и средней мощности. Причем их общее количество составляет около 80% от числа всех установленных электродвигателей.

Примерно такая же картина распределения электродвигателей по мощности в животноводческих хозяйствах стран СНГ, например, в Украине [96] и в России [122]. По данным профессора И.С.Мишина [103,104] можно построить диаграмму распределения электродвигателей по мощностям на крупной СТФ Украины (Рис. 1.2).

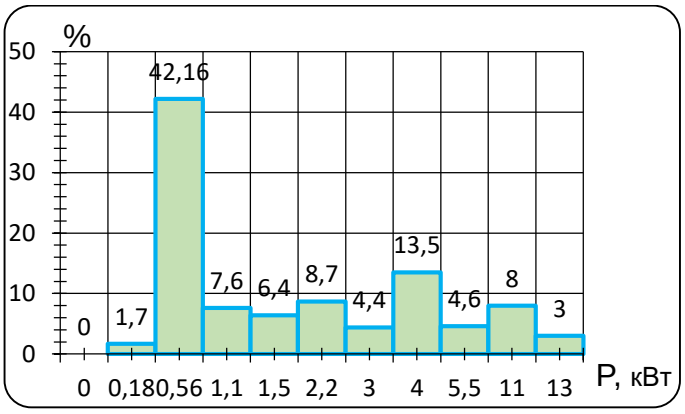


Рис. №1.2 Распределение асинхронных электродвигателей по мощности (в % от общего количества) на крупной СТФ Украины. По данным И.С. Мишина [103], стр. 31.

Из диаграммы видно, что 71% всех двигателей составляют двигатели малой мощности (P<=3,0 кВт), 26,1% - двигатели средней мощности (3,0 кВт <P<=11,0 кВт). Итого 97,1%.

Аналогичная картина и в областях РФ с развитым животноводством. По данным В.Н. Костюка [81,115] в хозяйствах Поволжской зоны более половины (61%) составляют двигатели малой мощности (1,1 кВт…3,0 кВт).

По данным А.Н. Михальчука [91,92] получены следующие результаты анализа парка электродвигателей, применяемых в животноводстве Вологодской, Ярославской и Владимирской областей РФ (круговые диаграммы на Рис. 1.3 и Рис. 1.4).

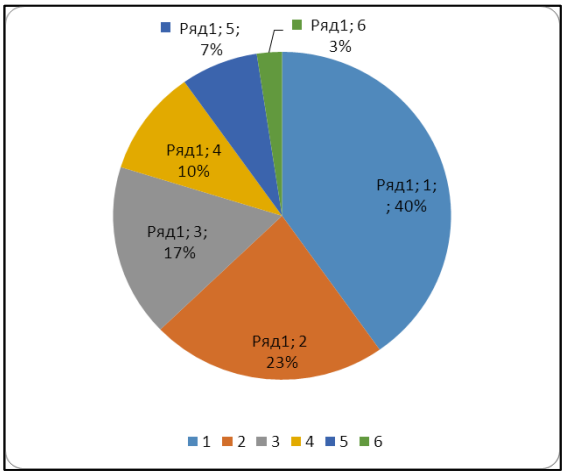


Рис. 1.3. Круговая диаграмма распределения электрических двигателей по мощности (P) (в % от общего количества двигателей, применяемых в с/х РФ).
По данным А.Н. Михальчука [96], стр. 248.

1.1	P= 0.18 – 0.75 кВт	40,2%
1.2	P= 0.75 – 3.00 кВт	22,6%
1.3	P= 3.00 – 11.0 кВт	17,0%
1.4	P=11.00 – 18.5 кВт	10,4%
1.5	P=15.50 – 30.0 кВт	7,4%
1.6	P=30.00 – 55.0 кВт	2,4%

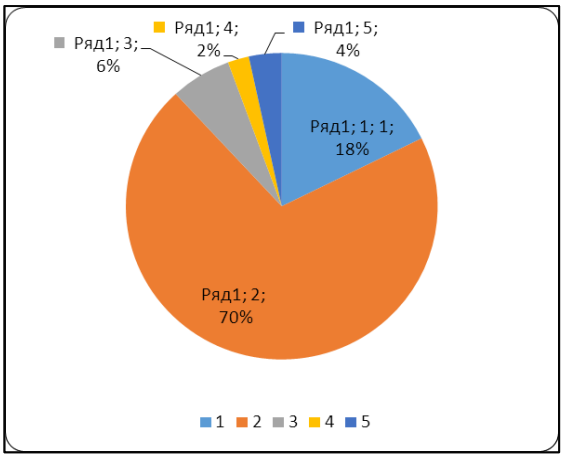


Рис. 1.4 Круговая диаграмма распределения электрических двигателей по скорости вращения (n) (в % от общего количества двигателей, применяемых в с/х РФ). По данным А.Н. Михальчука [97], стр. 35.

1.1 n =1000 об/мин 17,7%
1.2 n =1500 об/мин 70,4%
1.3 n =3000 об/мин 6,3%
1.4 n = 750 об/мин 2,2%
1.5 n = многоскоростные 3,4%

Таблица №1.2. Распределение трёхфазных асинхронных электродвигателей на объектах с/х назначения РМ. Разработано автором на основе данных [36,42,96,103,137,100].

Наименование отрасли	**Животноводство**	**Растениеводство**	**Подсобные предприятия**
Распределение, (в %) по частоте вращения, (об/мин)			
1000	10,4	6,5	2,8
1500	45,1	17,6	10,8
3000	4,4	1,1	1,3
По категории производственн. помещений, (в %):			
1	-	-	19,2
2	24,1	26,2	10,7
3	19,8	-	-
По продолжительности использования в году, (час)	690	970	850
По коэффициенту сезонности, (относительные единицы)	0,80	0,30	0,90
По степени загрузки, (относительные единицы)	0,70	0,55	0,40
По сроку службы до капитального ремонта, (год)	3,10	5,20	7,60

Обобщая материалы проведенных исследований и литературных источников [36,42, 96,103,109,114,137,100] можно составить итоговую усреднённую таблицу распределения асинхронных электродвигателей на объектах с/х назначения РМ (Таб.1.2).

Проведенный анализ парка электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве РМ, в частности в животноводстве, позволяет сделать некоторые выводы:

1. Двигатели, применяемые в животноводстве, составляют более 60% от всех электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве. Сосредоточены они в основном (более 80%) в помещениях производственной зоны с агрессивной средой.
2. В указанных объектах применяются в основном асинхронные короткозамкнутые электродвигатели серий АО, АО2, 4А и 4А СХ как общепромышленного, так и специального исполнения (из них наибольшее количество составляют двигатели серий АО2 и 4А).
3. Более 90% всех двигателей, применяемых в животноводстве, это двигатели малой и средней мощности, причем двигатели малой мощности (0,18-3,0 кВт) составляют около 60%.
4. Наибольшее применение (более 70,0%) имеют двигатели с числом пар полюсов равным четырем (то есть на 1500 об/мин синхронной скорости).

1.2 Факторы, влияющие на эксплуатационную надежность трёхфазных асинхронных двигателей, применяемых в животноводстве.

Увеличение количества электродвигателей в животноводстве, широкое использование автоматизированных и полу-автоматизированных производственных линий значительно повышает роль электродвигателей в выполнении основных технологических процессов. Выход даже одного электродвигателя из строя может полностью нарушить весь технологический процесс и нанести значительный экономический ущерб, средняя величина которого составляет в сельском хозяйстве по данным [110], (в пересчете на молдавский лей) примерно 1200–1500 лей/двигатель. Поэтому вопрос повышения эксплуатационной надежности электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве, является одним из основных вопросов при эксплуатации электроустановок в сельскохозяйственном производстве.

Актуальным вопросам эксплуатационной надежности асинхронных двигателей в сельском хозяйстве посвящены работы известных учёных в этой области: И.А.Будзко, А.О.Грундулиса, А.М.Мусина, И.И.Мартыненко, И.С.Мишина, П.С.Курбатовой,

А.П.Казимира, А.А.Пястолова и других авторов. В них отмечается, что низкая эксплуатационная надежность электродвигателей определяется целым рядом взаимосвязанных факторов. К ним относятся:

- влияние условий окружающей среды,
- тяжелые режимы работы,
- отсутствие надежных устройств защиты от работы в анормальных режимах,
- низкое качество электроэнергии,
- неудовлетворительная эксплуатация,
- дефекты изготовления и ремонта.

Важный фактор, в значительной степени определяющий специфику работы электродвигателей в сельском хозяйстве и влияющий на эксплуатационную надёжность - ***условия окружающей среды*** [47,48]. Как правило, для них характерны резкие колебания температуры, повышенная влажность, наличие значительного количества агрессивных газов, запыленность [120].

Параметры окружающей среды на животноводческих фермах обусловлены зоотехническими нормами на проектирование НТП СХ. Сравнение этих норм с данными ГОСТ-15150 [43] позволили сделать вывод о том, что ряд параметров окружающей среды животноводческих ферм значительно превышает допустимые значения по ГОСТу для асинхронных двигателей общепромышленного исполнения [14,21,22,22,46,81,82,83,105].

Обследования среды животноводческих помещений в ряде хозяйств в Молдове [100], показали, что в животноводческих помещениях, не оборудованных системой вентиляции, значения относительной влажности достигают 95-98%, содержание аммиака 0,09 г/м^3, углекислого газа 14,7 г/м^3, что в 4-6 раз превышает допустимые ГОСТом 15150 (климатические условия) нормы. Работая в таких условиях, изоляция электродвигателей интенсивно стареет, что становится одной из причин снижения их надежности.

В настоящее время промышленностью выпускаются специальные электродвигатели сельскохозяйственного исполнения (с индексом СХ), предназначенные для работы в помещениях с повышенной относительной влажностью и при наличии агрессивных газов, а также летучей пыли и температур окружающей среды до +40 ^{0}С. Осваивается производство асинхронных двигателей новейшей серии 7А [19]. Однако использование в сельскохозяйственном производстве только двигателей специальной серии 4А СХ и 7А экономически нерационально. К тому же, поступление этих двигателей в хозяйства республики весьма ограничено и не превышает 15-17% от общего количества.

В значительной степени эксплуатационная надежность электродвигателей определяется так же ***режимами их работы.*** Последние в свою очередь характеризуются продолжительностью работы и степенью загрузки. Режимы работы электродвигателей определяются их технологическим назначением. При этом степень нагрузки двигателей может быть весьма различной [92]. Так постоянную нагрузку имеют двигатели вентиляторов, насосов, транспортеров и другие. Двигатели кормоприготовительных машин, кормораздачи и уборки навоза – не равномерную. Одни и те же двигатели могут работать в различных условиях, в зависимости от места использования. Например, на крупных молочных фермах (по данным Э.К. Граматовича [47]) режим работы двигателей для приготовления кормов, доения, первичной обработки молока - длительный; для погрузки и раздачи кормов, удаления навоза - кратковременный, для водоснабжения и вентиляции - повторно кратковременный. По данным А.В. Мартынова и С.Ф. Лебедева [93] большинство электродвигателей в сельском хозяйстве РФ работают не догруженными, и лишь 3% из них работают с некоторой перегрузкой (диаграмма на Рис. 1.5).

Время работы электродвигателей в животноводстве определяется объемом производства, используемой технологией, числом работающих машин и их производительностью, а также уровнем электрификации этого технологического процесса.

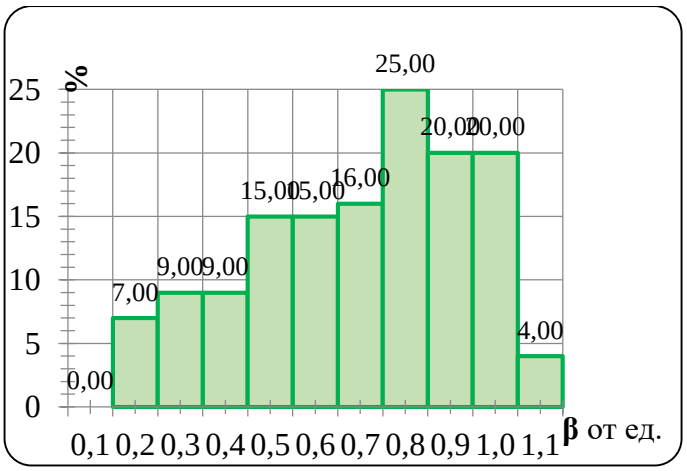


Рис. 1.5. Распределение электродвигателей по степени загрузки (β).
(в % от общего количества двигателей используемых в животноводстве РФ).
По данным А.В. Мартынова [93], стр. 21.

По данным В.И. Русанова и Е.З. Горелик [126] большинство электродвигателей в сельскохозяйственном производстве работают в длительном режиме с переменной нагрузкой, но незначительное количество часов в сутки. Анализ технологических карт и графиков работы [133] электрифицированного оборудования животноводческих помещений,

выполненный Д. Б. Соловьёвым показывает, что электродвигатели этих машин в основном работают кратковременно и в одну смену. Исключение составляют электродвигатели вентиляторов, работающих практически круглосуточно и электродвигатели технологического оборудования доильных залов и молочных, работающих в длительном режиме в одну смену.

Результаты исследований академика А.А. Пястолова [121] позволяют установить, что электродвигатели животноводческих машин, работающих в кратковременном режиме, загружены на 50-70%, а электродвигатели, работающие в длительном режиме - соответственно на 80%. Такая загрузка не вызывает интенсивного теплового старения изоляции. Главной причиной выхода электродвигателей из строя этих двигателей является работа в аварийном режиме обрыв фазы. Исключение составляют электродвигатели вентиляторов, работающих практически круглосуточно и электродвигатели технологического оборудования доильных залов и молочных, работающих в длительном режиме в одну смену.

Аналогичная картина и для электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве Республики Молдова [100]. Установлено что особенно много отказов приходится на двигатели, работающие в кратковременном и повторно кратковременном режимах. Снижение эксплуатационной надежности электродвигателей, работающих в этих режимах, объясняется тем, что при работе электродвигателя под нагрузкой он нагревается, а после остановки охлажденный воздух проникает внутрь двигателя и содержащаяся в нем влага конденсируется. Повторяющееся циклы работа–остановка, причем в животноводческих помещениях это, как правило, кратковременное включение и длительная остановка, способствует конденсации влаги из воздуха и, как следствие, интенсивному увлажнению изоляции.

Большое влияние на надежность электродвигателей имеют ***величина напряжения и симметричность питающей сети.*** Согласно нормам ПУЭ [118] для сельских электроустановок допустимые отклонения напряжения в питающей сети составляют ±7,5% от номинального значения, а для крупных животноводческих хозяйств ±5% [138,169]. Однако фактические отклонения напряжения значительно превышают допустимые значения. Например, по данным ряда исследований [2,3,17,70,170,171] фазные напряжения питающих линий, на вводах к сельскохозяйственным потребителям, изменяются от 170 В до 245 В, то есть отклоняются от нормы на ±20%.

По данным [100] в обследованных хозяйствах Молдовы значение фазных напряжений на вводах в животноводческие помещения изменялось в пределах от 180 вольт о 240 вольт, причем соотношение нагрузок разных фаз изменялось без определенной закономерности.

При изменении напряжения питания существенно меняются эксплуатационные показатели электродвигателей такие как: длительность пуска, электромеханический момент, температура нагрева и другие факторы [11,25,65,119,129,168,173]. Вращающий электромагнитный момент пропорционален току и магнитному потоку. При снижении напряжения магнитный поток машины уменьшается, в результате чего уменьшается и пусковой момент двигателя. При этом ток в роторе и статоре возрастает до величины, при которой восстанавливается нарушенное электрическое равновесие. Практически можно считать, что на каждый процент снижения напряжения происходит увеличение тока так же на один процент. Таким образом, несмотря на снижение напряжения, ток двигателя растет и может превысить допустимое значение.

Согласно исследованиям [148,174] превышение напряжения в питающей линии на 20% так же повышает температуру обмоток электродвигателей на 15-20 ^{0}С, одновременно снижая коэффициент мощности за счет резкого увеличения тока намагничивания (особенно для сильно насыщенных электродвигателей последних серий 4А).

Существенное влияние на эксплуатационную надежность работы асинхронных двигателей оказывают так же отсутствие надежных защит и неудовлетворительная эксплуатация электрооборудования. Последнее объясняется несколькими причинами. Во-первых, это отсутствие необходимого количества обслуживающего персонала. В настоящее время почти на всех крупных животноводческих комплексов, в которых работает по несколько сотен электродвигателей, численность обслуживающего персонала значительно отстает от роста машинного парка. Во-вторых, низкий уровень подготовки обслуживающего персонала. В-третьих, слабая материальная база электротехнической службы.

В последние годы в Республике Молдова получают распространение прогрессивные методы без разборной диагностики электрооборудования. Широкое внедрение этого метода в практику эксплуатации позволяет значительно сократить время на работы ППР, снизить затраты на техническое обслуживание и повысить надежность работы электрооборудования.
Выводы по теме параграфа:

1. Из приведенного выше обзора научной и справочной литературы по условиям эксплуатации сельскохозяйственных электроустановок можно сделать вывод о том, что условия работы электродвигателей в сельском хозяйстве имеют многочисленные

особенности, которые необходимо обязательно учитывать при разработке путей повышения их эксплуатационной надёжности.

2. Решая вопрос повышения надежности эксплуатации электродвигателей необходимо учитывать так же факт наличия всего имеющегося в хозяйствах парка электродвигателей. При этом составной частью мероприятий по повышению надежности должен быть вопрос применения высокоэффективной защиты электродвигателей от аварийных режимов.

1.3 Основные причины выхода из строя асинхронных электродвигателей применяемых в животноводстве. Краткая характеристика применяемых защит.

Согласно ГОСТ Р51689-2000 электродвигатели серии 4А рассчитаны на работу до капитального ремонта в течении 8-10 лет (или при наработке более 10000 часов). В тоже время по данным исследований [100] срок службы таких электродвигателей в сельском хозяйстве Молдовы не превышает в среднем 4,0 - 5,0 лет, а в животноводстве еще меньше: в кормоприготовлении – 3,7, в вентиляции – 3,2, в водоснабжении – 2,5, в доении – 2,3, в уборке навоза –2,0.

В ряде научных работ [24,68,108,117,137] (Россия, Белоруссия, Эстония) отмечается, что в сельском хозяйстве этих стран ежегодно выходит из строя от 15 до 19 % всех установленных в хозяйствах электродвигателей, что значительно превышает число электродвигателей, вновь поступающих в хозяйства.

Анализируя основные причины выхода из строя электродвигателей можно выделить три вида повреждений электродвигателей это:

- сгорание изоляции из-за перегрева обмотки,
- электрический пробой увлажнённой изоляции,
- механические повреждения.

Опыт эксплуатации электродвигателей в сельском хозяйстве РМ показывает, что наиболее часто встречаются повреждения первых двух видов. Механические повреждения (это в основном износ подшипников и ослабление креплений) возникают, как правило, после длительной эксплуатации и могут успешно предотвращаться при своевременном выполнении соответствующих профилактических мероприятий.

Причинами перегорания обмоток могут быть следующие анормальные режимы:

- Перегрузка рабочей машины.
- Работа в неполнофазном режиме.
- Работа при ассиметричном напряжении.
- Повышенное или пониженное напряжение в питающей сети.
- Затяжной пуск.

- Высокая частота включений.
- Ухудшение условий охлаждения.

Первые шесть режимов сопровождаются повышением тока в фазах сверх номинального. При ухудшении охлаждения перегрев может произойти и при токах ниже номинального значения.

Электрический пробой, как уже отмечалось в п.1.2, возникает чаще всего при увлажнении изоляции в результате неблагоприятных воздействий окружающей среды. Выпускаемые в настоящее время двигатели серии 4А…СХ имеют специальную изоляцию. Измерения показывают, что сопротивление изоляции этих двигателей в агрессивной среде животноводческих ферм не падает ниже допустимых значений. Повышение влагостойкости так же увеличило срок службы двигателей. Однако не устранена еще одна причина высокой аварийности – неудовлетворительная работа защитных устройств.

В технической литературе собран многочисленный статический материал о количественном соотношении причин выхода из строя асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве. Анализ литературных источников [52,68] (Латвия, Россия) показывает, что 70% всех отказов электродвигателей в животноводстве происходит из-за перегрева и сгорания обмотки статора, 20% из-за электрического пробоя изоляции и около 10% из-за механических повреждений. То есть сгорание обмотки наиболее распространенная причина аварии электродвигателей. Причем 60-70% сгорания обмотки происходит из-за обрыва фазы питающей линии, перегрузки или заклинивания ротора.

Исследованиями Глушакова А.М. и Соркинда М.С. [41,136] (Россия) установлено, что количество электродвигателей, вышедших из строя, составляет:

- по причине перегрузки - 33,5%,
- работы в неполнофазном режиме - 28,5%,
- по причине заклинивания ротора - 15%,
- из-за загрязнения и увлажнения изоляции и последующего ее пробоя - 18 %,

  и около 5% другие причины (в том числе и заводские дефекты).

Аналогичные исследования, выполненные в США по данной теме [12,172], дают такие цифры:

- перегрузка- 25,5%,
- повышенное увлажнение -16,7%,
- неисправность подшипников -11,9%,
- работа в неполнофазном режиме- 10,5%,

- естественный износ изоляции- 4,6%,
- другие причины- 30,8%.

На кафедре «Электрификация сельского хозяйства и электропривод» Кишиневского политехнического института так же были проведены исследования эффективности работы электродвигателей в условиях сельского хозяйства Молдовы и причин их выхода из строя [100]. Обследование выполнялось на ряде крупных животноводческих хозяйств республики. Для сбора статических данных по надежности электродвигателей сельскохозяйственного назначения была разработана соответствующая программа исследований и подобраны объекты с хорошо развитым электрохозяйством в различных районах республики. При этом нами применялись две методики:

1. Ведение журналов отказов электродвигателей.
2. Подконтрольная эксплуатация электродвигателей.

Сбор данных производился обеими методами на одних и тех же объектах в и одно и то же время.

Первый метод позволил систематизировать количество отказов электродвигателей с учетом условий их эксплуатации и применяемых систем защиты. По второму методу, который дает наиболее полноценную информацию о поведении электродвигателей в естественных условиях эксплуатации, были выявлены причины отказов электродвигателей и определены недостатки применяемых систем защиты. Подконтрольная эксплуатация является единственным методом, позволяющим исследовать фактический уровень эксплуатационной надежности электродвигателей. Недостатком этого метода является большое рассеивание данных по эксплуатации. Поэтому достоверные показатели могут быть получены только путем систематизированных наблюдений за достаточным количеством испытуемых электродвигателей и применение методов математической статистики для обработки полученных данных.

Для сбора сведений об отказах были включены следующие вопросы:

1. Наименование обследуемого объекта.
2. Тип, мощность асинхронных двигателей.
3. Дата их выпуска и установки на месте эксплуатации.
4. Характеристика помещения и режим работы.
5. Количество выходов из строя и причины отказов.
6. Дата замены.
7. Вид защиты, применяемый до ремонта.
8. Вид защиты, применяемый после ремонта.

На основе вышеприведенных методик были получены данные о количестве двигателей, вышедших из строя по хозяйствам в целом, а также причины выходов двигателей из строя.

Данные по количеству установленных и вышедших из строя двигателей по хозяйствам Республики Молдова приведены в Приложении 1 (Таблица П1.1). Результаты анализа причин выхода электродвигателей из строя приведены в Приложении 1 (Таблица П1.2). Результаты анализа причин выхода электродвигателей из строя, приведенных в Таблице П1.2 показывают, что из общего количества вышедших из строя двигателей:

30,5% - это результат возникшей перегрузки;

17,5% - сгоревшие из-за обрыва фазы питающей сети;

21,0% - результат механического заклинивания ротора;

31,0% - прочие причины, в числе которых случайные попадания влаги, несоответствие исполнения характеру окружающей среды, неправильная эксплуатация, заводские дефекты.

При обобщении данных по проведенным исследованиям [100] и данных из литературных источников [12,40,41,52,68,83,166] отказы электродвигателей по основным причинам можно обобщить и распределить следующем образом:

- Длительные перегрузки 30-35%.
- Неполнофазый режим 19-25%.
- Заклинивание ротора 15-17%.
- Увлажнение и загрязнение изоляции обмотки 15%.
- Нарушение охлаждения 5%.
- Механические повреждения и заводские дефекты 10%

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что около 70% двигателей выходят из строя по причине технологических и аварийных перегрузок, обрыва фазы питающей линии и заклинивания ротора и, следовательно, большую часть всех отказов можно предотвратить разработкой и внедрением универсальной надежной защиты от указанных аварийных режимов.

Краткая характеристика применяемых защит асинхронных двигателей.

Вопросам эксплуатации, анализа и усовершенствования средств защиты асинхронных электродвигателей посвящены работы таких известных учёных как: А. М. Мусин, А.А. Пястолов, А.С. Грундулис и ряд других авторов. А также работы целого ряда западноевропейских исследователей: Д. Чаппи, К.А. Гудчайлд, Р.Д. Смит, Т. Шмелчер.

Защиты от перегрузок.

В настоящее время, как в РМ, так и за рубежом в сельскохозяйственных электроприводах основное средство защиты от перегрузок – различные тепловые реле с биметаллическими элементами. Известно, что эти тепловые реле имеют целый ряд недостатков.

Во-первых, эти устройства косвенного действия, они реагируют на температуру теплового реле, а не на величину тока в фазах, то есть косвенно моделируют нагревательный процесс. Между тем нагревательный процесс двигателя и теплового реле существенно различаются, и большая сила тока не всегда означает высокую температуру обмотки [113,164].

Во-вторых, тепловое реле имеет большой разброс характеристик, в результате чего при перегрузках в пределах 20-50% от номинального значения мощности они часто не срабатывают. Работы С.В. Валобуева, Зайцева Ю.М. Овчарова В.В. и А.М. Мусина [27,28,63,111,107,113] показали, что только в 67% тепловые реле отключают электродвигатель при токах нагрузки на 20% выше номинального, и только в 21% тепловых реле защищают электродвигатель от обрыва фазы.

В-третьих, согласно данным С.И. Кострубы [80] в условиях животноводческих ферм при появлении напряжения прикосновения или шагового напряжения больше 24В устройство защиты должно срабатывать в течении 5·10 секунд. Это условие не выполняется не тепловыми реле типа ТРН, и не трехполюсными тепловыми реле с улучшенными характеристиками и ускоренным срабатыванием при неполнофазном режиме типа РТТ и ТРЛ. Кроме того, тепловые реле требуют специальной проверки перед установкой, а так же постоянно в процессе всей эксплуатации.

В РМ и за рубежом используется так же защита от аварийных перегрузок типа УВТЗ (универсальная встроенная температурная защита) [149,150,151]. Она действует в зависимости от температуры обмотки двигателя. Датчиками температуры в этой защите служат позисторы, встроенные в лобовые части обмоток двигателя. Нагрев изоляции до опасного значения приводит к резкому возрастанию сопротивления позистора, что служит сигналом для исполнительного элемента на отключение электродвигателя. Внедрение УВТЗ дало возможность снизить уровень аварийности электродвигателей при перегрузках, однако ряд недостатков присущих самой конструкции защиты не позволили массово внедрить ее в практику. Главный из них - тепловая инерция позисторов [112]. В режиме заторможенного ротора (механическое заклинивание или не запуск при работе на двух фазах) скорость возрастания температуры доходит до 7-10C^{o} град/сек, (при максимально допустимой

скорости 3 град/сек, определенной для вида изоляционных материалов, применяемых в электродвигателях). В результате двигатель остается включенным в сеть до опасного перегрева обмотки, что ведет к структурным изменениям в изоляционных материалах - появлению микротрещин и ее ускоренному старению.

В технической литературе так же отмечаются и другие недостатки УВТЗ в том числе: слабая чувствительность к токам короткого замыкания и сложность монтажа измерительных преобразователей (особенно в процессе ремонта электродвигателя).

Известны устройства на интегральных микросхемах [53,123,139,156], моделирующие процесс нагрева электродвигателя с использованием конденсаторных моделирующих схем, работающих в режимах функционального генератора и счетных накопителей. Однако такие устройства весьма сложны, стоимость их весьма значительна, и они еще не отработаны для широкого внедрения. Кроме того, процесс нагрева электродвигателя различен для двигателей различной мощности и различного исполнения, следовательно, данное защитное устройство возможно использовать лишь для узкого типа электродвигателей наиболее точно соответствующих используемому типу модели. Для защиты электродвигателей сельскохозяйственного исполнения эти устройства просто неприемлемы.

В последние годы было разработано множество различных схем, обеспечивающих защиту электродвигателей от аварийных перегрузок. Анализ патентной литературы показал, что эти защиты можно подразделить на пять больших групп [54]:

- К первой группе относятся защиты, реагирующие на изменение величины тока нагрузки, а чувствительным элементом является электромагнитное реле ([13, 22, 24, 25, 58, 62], Приложение 5, «Обзор патентной литературы»).
- Ко второй – защиты, реагирующие на изменение величины тока нагрузки с чувствительными элементами - биметаллическими пластинами ([14,32,45], Приложение 5, «Обзор патентной литературы»).
- К третьей – защиты, реагирующие на изменение величины тока с чувствительным элементом трансформатором тока ([16,18,19,20,23, 27, 29, 37,38,39,41,40,42,47,48,54,61, 65,64,66, 71,73, 74,75, 76], Приложение 5, «Обзор патентной литературы»).
- К четвертой - защиты, реагирующие на изменение непосредственно температуры обмоток двигателя, где чувствительные элементы-полупроводниковые элементы-позисторы ([15, 17, 26, 28, 46, 48, 67], Приложение 5, «Обзор патентной литературы»).

- К пятой группе - комбинированные схемы, реагирующие одновременно на величину нагрузки и температуру обмоток двигателя либо сопротивление изоляции обмоток двигателя ([21,72], Приложение 5, «Обзор патентной литературы»).

Интенсивное развитие полупроводниковой техники дает возможность широко использовать появляющиеся новые полупроводниковые элементы для создания различных защитных устройств, действующих в зависимости от изменения электрических величин в момент аварийного режима [84,154]. Поэтому подавляющее большинство схем защит в последние годы, выполнены именно с применением полупроводниковых устройств [20,55,56].

Защиты от обрыва фаз.

В сельском хозяйстве довольно часто наблюдаются случаи обрыва фазы питающей линии. Это объясняется недостаточно высоким уровнем надежности сельскохозяйственного электроснабжения. Указанный анормальный режим может возникнуть и в случаи перегорания одной или нескольких плавких вставок предохранителей в силовом распределительном устройстве.

Определённую защиту от работы на двух фазах обеспечивают и схемы защиты от тепловых перегрузок, рассмотренные ранее. Однако надежность срабатывания тепловой защиты зависит от величины перегрузки на валу двигателя и оказалась недостаточной при загрузке электродвигателей менее 50% от номинальной мощности.

Для защиты электродвигателей от неполнофазных режимов (асимметрии фазных напряжений) разработаны специальные защиты, работающие по принципу фильтрации симметричных составляющих нулевой последовательности [40,76,86,133,165]. Недостатки таких защит – высокие требования к стабильности параметров, применяемых в схемах конденсаторов и резисторов фильтра, а также возможность ложного срабатывания при отклонении частоты питающего напряжения и наличия в сети высших гармоник.

Для защиты электродвигателей от неполнофазных режимов применяются также фазоимпульсные устройства [37,38,39], которые реагируют на фазовые соотношения между трехфазными токами. В качестве измерительных преобразователей в этих устройствах используются быстронасыщающиеся трансформаторы тока с прямоугольной петлей гистерезиса. Однако фазоимпульсные устройства защиты не нашли применения в сельском хозяйстве в связи с повышенной чувствительностью к асимметрии питающего напряжения, сложной схемой и ограниченным функциональным действием. Аналогичные устройства известны и в зарубежных странах, например, в Англии, Швейцарии.

На кафедре электротехники Латвийской сельскохозяйственной академии под руководством профессора А.О. Грундулиса были разработаны устройства защиты электродвигателей типа ФУЗ (фоточувствительное устройства защиты) [5,6,7,8,10]. Устройство ФУЗ предназначено для защиты от обрыва фаз и работает по принципу контроля угла сдвига фаз между токами нагрузки, изменяющегося со значением в 120^0 в симметричном режиме до 180^0 (или 0^0) при обрыве фазы. Устройство получило широкое использование в сельском хозяйстве Латвии. Однако, несмотря на относительную простоту схемы и простоту в эксплуатации устройство имеет ряд существующих недостатков:

1. Устройство иногда срабатывает от пусковых токов.
2. Устройство не чувствительно к небольшим до 50% технологическим перегрузкам.
3. Устройство не реагирует на длительность перегрузки и срабатывает мгновенно.
4. Устройство имеет большой вес и объем.

Частично эти недостатки были устранены в дальнейших модификациях устройства ФУЗ-У и ФУЗ-М.

Ряд защит асинхронных двигателей от неполнофазных режимов основаны на появлении напряжения $U_{oo'}$ между нулевыми точками двигателя и сети в момент обрыва фаз [35,56,76,91]. Если цепь нулевого провода такого двигателя замкнуть на реле, даже с очень большим сопротивлением, то при обрыве фазы напряжение $U_{oo'}$ изменяется, но меняется незначительно, что создает трудности при настройке защит, а это приводит, либо к ложным отключениям, либо к несрабатыванию при обрыве фаз.

Для предотвращения этих явлений с целью увеличения чувствительности и надежности исполнительных органов в цепь нулевого провода устанавливают умножитель напряжения. Однако это значительно усложняет схему. Для случаев изменения напряжения между нулевыми точками в большом диапазоне при обрыве фазы нулевой провод должен быть нормально разомкнут. При этом в цепь нулевых точек должен включается пороговый элемент, который замыкает нулевой провод только при появлении критического напряжения в нем. На таком принципе основаны схемы защиты асинхронных двигателей от неполнофазного режима [13,37,39,49,64].

Схемы защит, основанные на не симметрии токов, работают, в большинстве случаев, на принципе сравнения заданного стабилизированного сигнала с изменяющимся сигналом от двух или трех фаз питающей сети. ([62,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,79], Приложение 5, «Обзор патентной литературы»). Однако указанные схемы довольно сложны, так как требуют наличия большого количества промежуточных звеньев.

Комбинированные защиты.

Одновременное использование сразу нескольких устройств защиты для одного электродвигателя нельзя считать наиболее рациональным решением вопроса. Более целесообразно разрабатывать универсальные защитные устройства, объединяющие в себе возможность защиты от нескольких (наиболее вероятных) анормальных режимов [172].

1.4 Выводы по первой главе.

Проведенные исследования в ряде животноводческих хозяйствах РМ, а также анализ результатов аналогичных исследований по данной тематике, проведённых в ряде других стран с развитым животноводством позволяют сделать следующие выводы:

- В животноводстве массово используется лишь ограниченная часть трёхфазных асинхронных двигателей. Это электродвигатели серий АО2 и 4А как общепромышленного, так и специального исполнения, малой и средней мощности (0,18 кВт–11,0 кВт). Из них наибольшее количество (около 80,0%) установлены в производственной зоне с вредными условиями среды.
- Установлено, что около 70% выходов из строя асинхронных двигателей, работающих в сельскохозяйственном производстве, составляют такие аварийные режимы как перегрузка, заклинивание ротора, и обрыв фазы питающей линии. Сравнительный анализ результатов по выходу электродвигателей из строя полученных различными авторами и в различное время позволяет сделать вывод о том, что количество электродвигателей, вышедших из строя, с годами не только не уменьшилось, а наоборот продолжает увеличиваться.
- Существующие в настоящее время схемы защиты электродвигателей от перегрузки, и обрыва фаз малоэффективны в силу целого ряда присущих им недостатков. Для повышения эксплуатационной надежности асинхронных электрических двигателей целесообразно исследовать их поведение в указанных аварийных режимах и усовершенствовать применяемые защитные устройства.
- Разрабатываемое защитное устройство должно быть рассчитано для асинхронных трёхфазных электродвигателей двигателей массового применения, т.е. малой и средней мощностью (от 0,18 кВт до 11,0кВт) и быть универсальным (защищать двигатель от основных аварийных режимов).

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ «НУЛЬ ДВИГАТЕЛЯ - НУЛЬ СЕТИ» КАК ИСТОЧНИКА АВРИЙНОГО СИГНАЛА ОБРЫВА ФАЗ

2.1 Системы «нуль двигателя – нуль сети» как источник напряжения третьей г

а Как следует из курса ТОЭ [58] между нулевой точкой трехфазной сети и нулевой точкой р трёхфазного потребителя, соединенного в звезду в несимметричном режиме появляется м напряжение. На этом явлении может быть основана защита трехфазных потребителей от не о имметричных режимов и в частности от обрыва питающей фазы асинхронных двигателей.

н Напряжения между нулевой точкой двигателя (0^1) и нулевой точкой источника и итания (0) для этого случая определяется формулой:

к

и $$U_{OO^1} = \frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (2.1)$$

Где: U_{OO^1} - напряжение между нулевыми точками двигателя и питающей сети;

с $U_A; U_B; U_C$ - напряжение фаз источника;

$Y_A; Y_B; Y_C$ - полные проводимости фаз двигателей.

ч При отсутствии нулевого провода и обрыве фазы (с заторможенным ротором) напряжение а U_{OO^1} достигает величины, при этом напряжение на двух остальных фазах двигателя равно с т значению $\frac{U_{AB}}{2}$. В рассмотренных схемах защиты электродвигателей напряжение U_{OO^1} о фиксируется исполнительным элементом (реле), установленным в нулевом проводе и т действующем на отключение электродвигателя через схему управления. («Приложение 5» о «Обзор патентной литературы» [56,63,59,57,69,73,74,80,82,83,84,86,87]), [141] й

Практика эксплуатации таких защит показала, что во многих случаях происходит их ложное срабатывание. В работах А.С. Галюк и А.О. Грундулис [40,49] приводится анализ 1 работы устройств защиты электродвигателей по напряжению нулевой последовательности и 5 причин их ложного срабатывания. По мнению этих авторов, ложное срабатывание таких 0 устройств, происходит из-за наличия между нулевыми точками сети и двигателя, даже в режиме симметричного питания, напряжения U_0' обусловленного некоторой асимметрией Г электрической системы самого двигателя. Причем величина этого напряжения и её фазовый ц сдвиг носит случайный характер и зависит от конструкции самого двигателя. Кроме этого . если в трёхфазной сети и напряжение не симметрично (в сельских электрических сетях это явление неизбежно), тогда между указанными точками появляется еще напряжение

асимметрии U_0'', величина и фазовый угол которого зависят от структуры асимметрии сети и скольжения двигателя. При наличии переменной асимметрии самой сети фазовые углы этих напряжений (U_0' и U_0'') могут совпасть. В этом случае суммирующее напряжение становиться максимальным, формула (2.1) и защита срабатывает, хотя обрыва фазы нет.

$$(U_{0\ max} = U_0' + U_0'') \qquad (2.1)$$

Проведенные нами исследования [33,162,161] показали, что даже при абсолютной симметрии фазных напряжений между нулевыми точками двигателя и сети имеется напряжение U_0. Поэтому нами было высказано предположение о том, что природой его появления является не конструктивная асимметрия двигателя или питающей сети, а насыщение магнитной системы двигателя. То есть асинхронные двигатели последних серий являются в магнитном плане не линейными элементами, генерирующими в фазных обмотках напряжения высших гармоник, появляющиеся в нулевом проводе (для двигателей без выведенной нулевой точки, или фазные обмотки, которых соединены в треугольник, в схему включается искусственная звезда, собранная из высокоомных резисторов дающая нулевую точку). Наличие этих гармоник необходимо обязательно учитывать при разработке защит, основанных на использовании напряжения нулевой последовательности в качестве сигнала авариного режима обрыва фазы. Покажем это математически.

Из курса «Электрические машины» [116] известно, что при включении в сеть с синусоидальным напряжением, частотой (ν) трехфазного асинхронного электродвигателя с числом пар полюсов (P) в его магнитопроводе создаётся вращающееся со скоростью ($\omega=2\pi\nu/P$) магнитное поле. При этом дискретное распределение обмотки статора по пазам приводит к созданию несинусоидальной по форме пространственной волны магнитодвижущей силы (м.д.с.), которую можно разложить на ряд нечётных пространственных гармоник [98]. Особенностью этих гармоник является то, что они перемещаются вдоль воздушного зазора с разными скоростями и в различных направлениях. Имея скорость вращения в (ν) меньше скорости вращения основного поля и число пар полюсов в ν раз больше числа пар полюсов основного поля, эти высшие пространственные гармоники пересекают неподвижную статорную обмотку и создают в ней электродвижущую силу (э.д.с.).

Ряд приёмов, применяемых при выполнении обмоток асинхронных электродвигателей, таких как укорочение шага, распределение проводников по пазам и соединение фаз в звезду полностью исключают в токе наличие гармоник кратных трем и значительно ослабляют пятую и седьмую гармоники. Это даёт основание считать, что токи во времени и м.д.с. вдоль

пространственной линии окружности статора изменяются практически по синусоидальному закону. Однако, учитывая нелинейность ферромагнитной среды в условиях магнитного насыщения магнитопровода, даже синусоидальному закону распределения кривой м.д.с. в воздушном зазоре двигателя соответствует не синусоидальная волна распределения магнитной индукции $B(t.\gamma)$[34]. Такую волну магнитной индукции можно разложить в ряд нечетных гармоник (метод Фурье), при этом наиболее сильно будет выражены первая и третья. Эти гармоники в отличие от пространственных гармоник, обусловленных не синусоидальностью м.д.с., являются следствием насыщения магнитной системы двигателя. (такие гармоник принято называть ***гармониками насыщения***) [89].

Вращаясь со скоростью основного магнитного поля, пространственная не синусоидальная волна магнитной индукции $B(t.\gamma)$, определяемая формулой (2.2), индуктирует в каждой фазе электродвигателя ЭДС, содержащие нечетные гармоники (в основном первую и третью), определяемые формулами (2.3).

$$B(t\cdot\gamma)=B_{M1}\sin(\omega_1\cdot t-p\gamma_1)+B_{M3}\sin 3(\omega_1\cdot t-p_1\cdot\gamma) \qquad (2.2)$$

где: $B_{M1}.B_{M3}$ - соответственно амплитуда индукции первой и третьей гармоник

ω_1 - угловая частота,

ρ_1 - число пар полюсов статора,

γ - пространственный угол.

$$\begin{aligned} e_{ad} &= E_{m1}\cos\omega_1\cdot t+E_{m3}\cos 3\omega_1\cdot t \\ e_{cd} &= E_{m1}\cos(\omega_1\cdot t+2\pi/3)+E_{m3}\cos 3\omega_1\cdot t \\ e_{bd} &= E_{m1}\cos(\omega_1\cdot t-2\pi/3)+E_{m3}\cos 3\omega_1\cdot t \end{aligned} \qquad (2.3)$$

Учитывая это, найдем напряжение между нулём двигателя и нулём сети (точки 0 и 0') по методу двух узлов (Рис.2.1) по формуле (2.4).

$$U_0=\frac{(e_{at}+e_{ad})g_a+(e_{bt}+e_{bd})g_b+(e_{ct}+e_{cd})g_c+(i_a+i_b+i_c)}{g_a+g_b+g_c} \qquad (2.4)$$

$e_{at}.e_{bt}.e_{ct}$ - Э.Д.С. вторичных обмоток трансформатора (Т) системы электроснабжения,

$e_{ad}.e_{bd}.e_{cd}$ - Э.Д.С. обмоток статора двигателя (М),

g - проводимости ветвей по фазам,

i - токи по фазам.

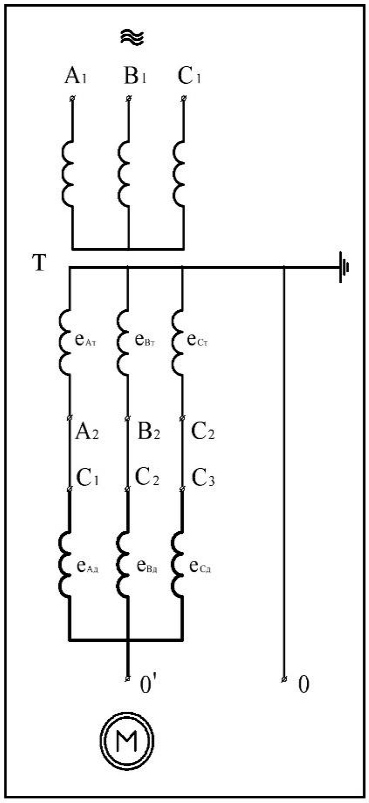


Рис. 2.1 Схема расчета напряжения между точками 0 и $0'$ по методу двух узлов.

Для случая симметричного трансформатора (Т), симметричного электродвигателя (М) и симметричного питающего кабеля, Э.Д.С. трансформатора - $e_{at}.e_{bt}.e_{ct}$ синусоидальны по форме, имеют одинаковые амплитуды и, поэтому сумма их произведений: $e_{at} \cdot g_a + e_{bt} \cdot g_b + e_{ct} \cdot g_c$ равна нулю. Так же равна нулю и сумма токов по фазам $i_a + i_c + i_b$ Тогда уравнение (2.4) принимает вид:

$$U_{.0} = \frac{e_{ad} \cdot g_a + e_{bd} \cdot g_b + e_{cd} \cdot g_c}{3g} . \qquad (2.5)$$

Подставив в формулу значения э.д.с. $(e_{ad}.e_{bd}.e_{cd})$ из (2.3) получим:

$$U_0 = E_{m3} \cos \cdot 3\omega_1 \cdot t \qquad (2.6)$$

Таким образом, в трехфазных асинхронных короткозамкнутых электрических двигателях ***с насыщенной магнитной системой*** *даже при абсолютной конструктивной симметрии двигателя и абсолютно симметричном электропитании между нулевой точкой обмотки статора и нулевой точкой сети возникает синусоидальное напряжение утроенной частоты 150 Гц.*

При обрыве одной из фаз между указанными выше точками (00`) дополнительно появляется напряжение нулевой последовательности основной гармоники с частотой 50 Гц, которое суммируется с напряжением третьей гармоники. Об этом свидетельствует и форма напряжения U00' полученная при осцилографировании этого напряжения в разных режимах работы электродвигателя (Рис. 2.2-2.4). Очевидно, что для правильной настройки устройств защиты от обрыва фазы, основанных на появлении напряжения между этими точками, необходимо знать количественные значения этого напряжения U_0' и факторы, влияющие на его величину.

Для подтверждения заявленного теоретического предположения были выполнены расчёты (с использованием математической модели) и проведены соответствующие экспериментальные исследования.

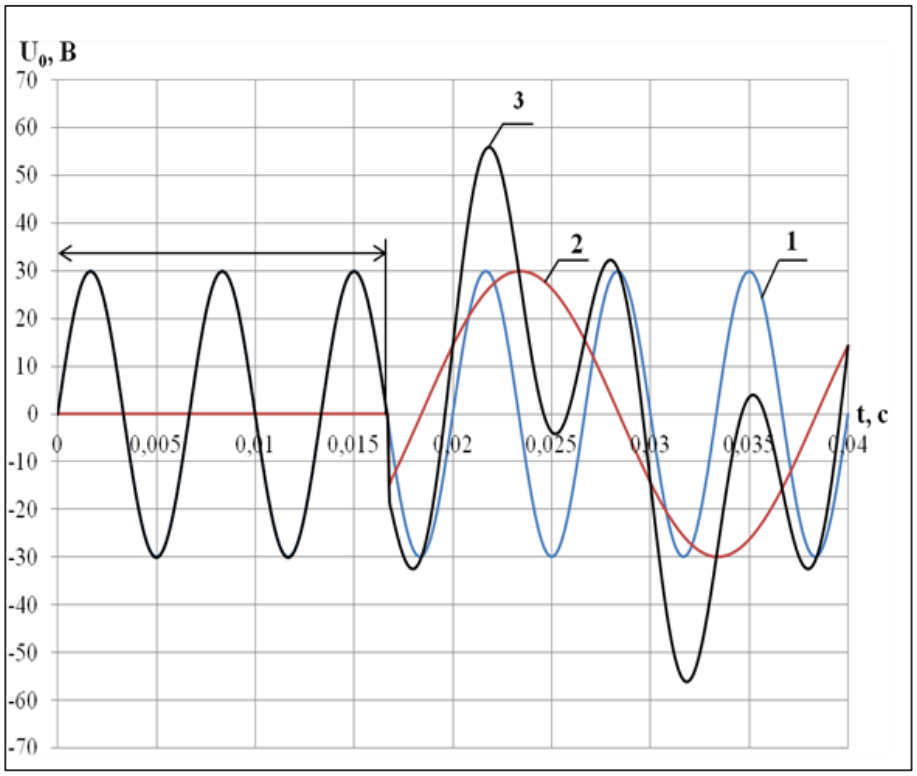


Рис.2.2 Характер изменения напряжения U_0 для двигателя 4А80В4УЗ при обрыве фазы в режиме ХХ (холостого хода).
Стрелкой показан момент обрыва фазы сети.
1 – составляющая напряжения U_0, f = 150Гц;
2 – составляющая напряжения U_0, f = 50Гц;
3 – суммарное напряжение составляющих.
Разработано автором по данным [162].

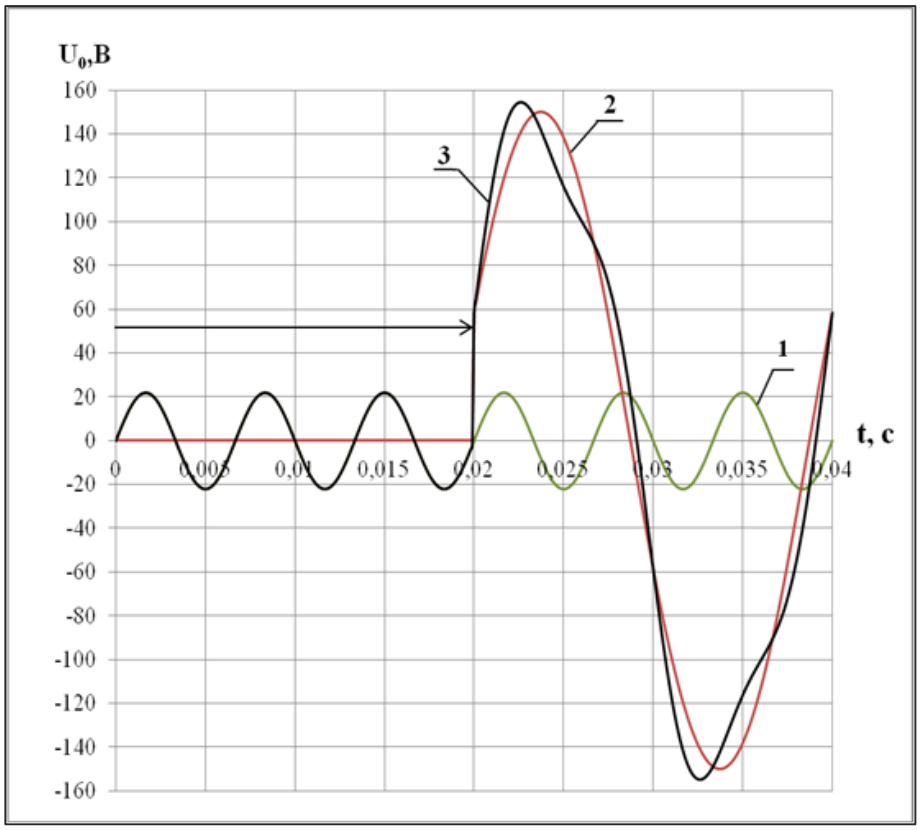


Рис. 2.3 Характер изменения напряжения U_0 для двигателя 4А80В4УЗ с номинальной нагрузкой при обрыве фазы сети в режиме КЗ.

Стрелкой показан момент обрыва фазы сети.

1 – составляющая напряжения U_0, f = 150Гц;

2 – составляющая напряжения U_0, f = 50Гц;

3 – суммарное напряжение составляющих.

Разработано автором по данным [162].

2.2 Разработка математической модели трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя. Программа расчета параметров асинхронного двигателя.

Предпосылки разработки математической модели асинхронного двигателя.

Общепризнанная классическая теория электрических машин рассматривает асинхронный электродвигатель, как линейную идеализированную систему [1, 18,77,116]. Основываясь на этой теории, спроектированы и выполнены, существующие в настоящее время, основные защитные устройства электрического двигателя такие, например, как тепловые реле, токовые реле и т.д. Эта теория основывается на целом ряде допущений:

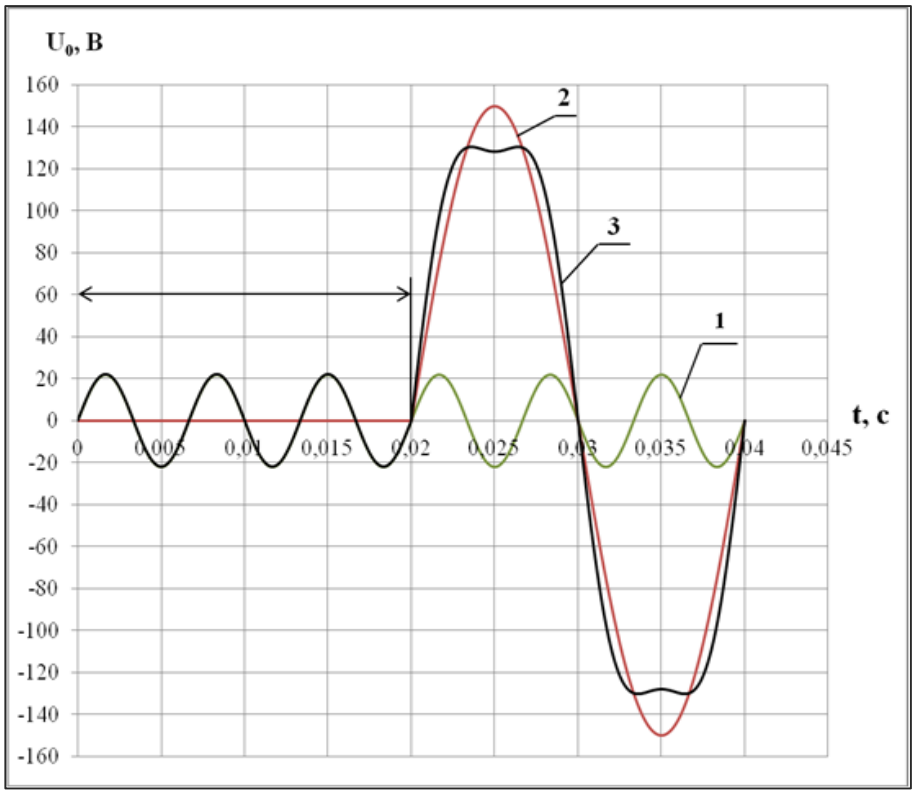


Рис. 2.4 Характер изменения напряжения U_0 для двигателя 4А80В4УЗ с номинальной нагрузкой при обрыве фазы сети в режиме КЗ.

Стрелкой показан момент обрыва фазы сети.

1 – составляющая напряжения U_0, f = 150Гц;

2 – составляющая напряжения U_0, f = 50Гц;

3 – суммарное напряжение составляющих.

Разработано автором по данным [162].

- Электрическая машина не насыщена.
- Потерями в стали пренебрегают.
- Обмотки машин сосредоточены. Для двухфазных – они сдвинуты на 90 электрических градусов, а для трехфазных - на 120 электрических градусов.
- Поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие.
- Намагничивающая сила обмоток и магнитные поля синусоидально распределены вдоль окружности воздушного зазора.
- Воздушный зазор равномерен, отсутствует эксцентриситет расточки статора и ротора
- Ротор симметричен.
- Намагничивающая сила сосредоточенной обмотки равна силе реальной обмотки.
- Машина симметрична, т.е. фазы статора и ротора имеют равные электрические параметры независимо от не симметрии фазных токов и напряжений.

Несмотря на все эти допущения, классическая теория электрических машин позволяет, с достаточной для инженерной практики точностью, рассматривать электромагнитные и электромеханические процессы переходных и в установившихся режимах работы электродвигателей. А также рассчитывать все необходимые параметры электрической машины, используемые для ее проектирования и эксплуатации.

Однако опыт развития электромашиностроения, за последние годы, показывает, что основной путь снижения металлоемкости выпускаемых машин - максимальное использование их ферромагнитного материала, что неизбежно ведет к значительному насыщению их магнитопроводов. Это особенно характерно для наиболее распространенных электрических машин – трёхфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей последних серий 4А и 5А. Исходя из этого, предложено асинхронные двигатели этих серий рассматривать как нелинейные насыщенные магнитные системы.

Из рассмотренных литературных источников наиболее корректно физическое состояние насыщенной электрической машины может быть описано математической моделью электромеханического преобразователя, приведенного в работах академика Копылова А.П. [77,78]. Модель рассматривает насыщенную электрическую машину, однако нелинейность ее учитывается характеристикой намагничивания главной магнитной цепи при допущении синусоидального распределения магнитодвижущих сил (м. д. с.) обмоток, т.е. электрическая машина рассматривается как линейный элемент, но с изменяющимися параметрами (в зависимости от степени насыщения).

Проведенные нами исследования [161,167] показали, что даже при синусоидальном распределении магнитодвижущей силы вдоль полюсного деления в нелинейной ферромагнитной среде (сталь статора и ротора двигателя) генерируется спектр пространственных нечетных гармоник магнитной индукции высших порядков, называемых - ***гармоники насыщения***. Эти гармоники влияют на ряд характеристик электрической машины, в том числе на величину и характер напряжения между нулем обмоток статора двигателя и нулем сети. А именно это напряжение предлагается использовать как составную часть аварийного сигнала обрыва фазы питающей сети. Эти обстоятельства делают классическую модель недостаточно пригодной для исследования некоторых параметров в асинхронной машине с учетом наличия спектра гармоник насыщения.

Исходя из выше изложенного, можно считать целесообразным, дополнить существующие виды математических моделей специализированной математической моделью. Такая. модель будет учитывать ряд перечисленных ранее особенностей

выпускаемых в настоящее время электродвигателей и позволит рассчитать напряжения высших гармоник в рулевом проводе электродвигателя.

Допущения, принятые при составлении математической модели.

В соответствии с [98] при записи уравнения математической модели были приняты следующие допущения:

1. Магнитное поле машины принимается плоскопараллельным.
2. Сложное магнитное поле условно можно представить состоящим из трех частей: полей рассеяния статора, ротора и рабочего поля. Магнитные проводимости по путям потоков рассеяния и путям рабочего потока взаимно независимы.
3. Реальный ротор заменяется эквивалентным с числом зубцов равным числу зубцов статора, при этом суммарное сечение всех зубцов эквивалентно и реального роторов в поперечной плоскости машины остается неизменным.
4. Магнитные сопротивления схемы замещения магнитной цепи принимаются сосредоточенными (сопротивления воздушного зазора, зубцов статора и ротора, участков ярм статора и ротора, заключенных между двумя зубцами).
5. Характеристика намагничивания отдельных элементов магнитной цепи совпадает со средней кривой намагничивания предельного гистерезисного цикла.
6. Радиальными составляющими магнитной индукции и напряженности магнитного поля в ярмах и тангенциальными составляющими в зубцах пренебрегаем.
7. Считаем, что потокосцепления рассеяния электрических контуров являются линейными функциями, зависящими только токов контуров.

Алгоритм определения электромагнитных параметров трехфазного асинхронного электродвигателя.

Для математического описания переходных процессов асинхронного электродвигателя необходимо составить уравнения электрического равновесия для напряжений электрических контуров и уравнение равновесия моментов, действующих на ротор.

Электродвигатель обычно представляют, как систему магнитно-связанных обмоток, расположенных на статоре и роторе [34,73]. Взаимодействие обмоток статора и ротора зависит от их взаимного положения в пространстве при вращении ротора. Взаимная индуктивность обмоток фазы "А" на статоре и фазы "а" ротора может быть представлена в виде:

$$M_{Aa} = M \cdot \cos\rho; \quad (2.1)$$

Где: М - максимальная величина взаимной индуктивности, при совпадении осей обмоток фазы "А" и "а" статора и ротора.

$$\rho = \int_0^t \omega + \rho_0 \quad (2.2)$$

где: ρ - угол между осями обмоток статора и ротора фаз "А" и "а"

ω = 2пр*n - угловая частота ротора;

n – частота вращения ротора;

p – число пар полюсов;

ρ_0 - начальных угол между обмотками А и а.

Для трехфазного статора и ротора уравнения электрического равновесия имеют вид системы уравнений (2.3):

$$\left.\begin{aligned} \frac{d_{(\omega\cdot\Psi_A)}}{d_\tau} + R \cdot i_A &= U_A \\ \frac{d_{(\omega\cdot\Psi_B)}}{d_\tau} + R \cdot i_B &= U_B \\ \frac{d_{(\omega\cdot\Psi_C)}}{d_\tau} + R \cdot i_C &= U_C \end{aligned}\right\} \text{Уравнения статора}$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{d_{(\omega\cdot\Psi_a)}}{d_\tau} + r \cdot i_a &= \emptyset \\ \frac{d_{(\omega\cdot\Psi_b)}}{d_\tau} + r \cdot i_b &= \emptyset \\ \frac{d_{(\omega\cdot\Psi_c)}}{d_\tau} + r \cdot i_c &= \emptyset \end{aligned}\right\} \text{Уравнения ротора} \quad (2.3)$$

где: ω=2π·f - угловая синхронная частота;

$\omega\Psi_A$, $\omega\Psi_a$ - полные синхронные потокосцепления фазы (А) статора и (а) ротора;

i_A, i_a - ток в фазе А статора и ротора;

R_A, r_a - активное сопротивление фазы А статора и ротора;

τ = ω·t - синхронное время.

Известна математическая модель насыщенного трехфазного статического ферромагнитного устройства с вращающимся магнитным полем (работа профессора Р.В. Фильца [153]) в которой естественно отсутствуют уравнения движения. В предлагаемой математической модели из уравнений электрического равновесия статического ферромагнитного устройства были исключены уравнения цепей подмагничивания статора и система дополнена уравнениями движения ротора [101,102]. Кроме того, в предлагаемой

модели уравнения электрического равновесия ротора, с помощью матриц преобразования, представляются в заторможенных трёх фазных осях.

Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя в этом случае может быть определен как частная производная по углу поворота ротора от общего запаса электромагнитной энергии машины $W_{\text{ЭМ}}$ определяемой уравнением (2.4)

$$W_{\text{ЭМ}} = 0{,}5(\Psi_A \cdot i_A + \Psi_B \cdot i_B + \Psi_C \cdot i_C + \Psi_a \cdot i_a + \Psi_{\text{c}} \cdot i_{\text{c}} + \Psi_b \cdot i_b) \quad (2.4)$$

Тогда электромагнитный момент определиться уравнением (2.5).

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{\partial W_{\text{ЭМ}}}{\partial \gamma} p\ , \quad (2.5)$$

а уравнение движения ротора уравнением (2.6)

$$M_{\text{ЭМ}} - M_{\text{мех}} = \frac{1}{p} * \text{I} * \frac{d\omega}{dt} \quad (2.6)$$

где: I - момент инерции ротора и приведенный момент инерции рабочего механизма. M_{Mex} - механический момент на валу ротора.

Если теперь найти выражения для полных потокосцеплений фаз статора и ротора, то совместно с (2.3 - 2.5) получится система уравнений трехфазной асинхронной машины, в которой зависимыми переменными являются шесть токов и шесть потокосцеплений, электромагнитный момент и частота вращения. Система нелинейная т.к. в ней имеются уравнения, в которых коэффициенты являются функциями зависимых переменных рассматриваемой системы, кроме того в ней содержится ряд коэффициентов, являющихся функциями не зависимой переменной - времени.

Полные потокосцепления определяются магнитным состоянием электродвигателя. В то же время полные потокосцепления являются сложными нелинейными многомерными функциями токов электродвигателя и после их дифференцирования по синхронному времени в уравнениях (2.3) - появляются дифференциальные коэффициенты само и взаимоиндукции. Чтобы найти токи из (2.3) следует вначале найти численное значение этих коэффициентов, которые в свою очередь определяются геометрическими размерами магнитопровода, параметрами обмоток и величиной приложенного напряжения.

Наиболее корректным, с математической и физической точек зрения, является подход к задаче, когда уравнения электрического состояния (2.3) решаются совместно с уравнениями магнитного состояния. При этом задается алгоритм расчета коэффициентов само и взаимоиндукции [152].

Для совместного решения уравнений электрического состояния и магнитного равновесия продифференцируем синхронное потокосцепление как сложную функцию по синхронному времени $(\partial\tau)$ [79].

$$p_{(\omega\Psi_i)} = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial(\omega\Psi i)}{\partial i_k} \cdot \frac{\partial i_k}{\partial \tau} \quad (2.7)$$

где: $p -$ оператор дифференцирования.

Подставив (2.7) в (2.3) получим ряд уравнений статорной и роторной цепей:

$$\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial(\omega\Psi_i)}{\partial i_k} \cdot \frac{\partial i_k}{\partial \tau} + R \cdot i_k = U_i$$

$$\ldots \quad (2.8)$$

$$\sum \frac{\partial(\omega\Psi_j)}{\partial i_k} \cdot \frac{\partial i_k}{\partial \tau} + r \cdot i_k = \emptyset$$

где: $\frac{\partial(\omega\Psi_i)}{\partial i_k}$ частая производная синхронного потокосцепления по току.

По своему физическому смыслу частая производная потокосцепления по току представляет собой дифференциальную индуктивность соответствующего электрического контура. Таким образом, для численного интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений (2.8) необходимо рассчитывать на каждом шаге интегрирования дифференциальные индуктивные сопротивления электрических контуров. Если при этом учесть все определяющих их факторы, то после интегрирования, с уже рассчитанными коэффициентами можно полупить необходимый результат.

Предлагаемая математическая модель асинхронной машины содержит следующие уравнения:

- Электрического равновесия цепей статора и ротора;
- Магнитного состояния (их количество может быть различным и зависит от уровня детализации магнитопровода; в свою очередь уровень детализации определяется спецификой решаемых задач, необходимостью достижения заданной точности и.т.д.)
- Электромеханического преобразования энергии.

Запишем вышеперечисленные уравнения в векторной форме [106]

$$\begin{cases} \frac{d(\omega_0 \overrightarrow{\Psi})}{d\tau} + \overrightarrow{\iota} \cdot R - \vec{U} = 0 & (2.09) \\ \omega_0 \vec{\Psi} = \omega_0 \vec{\Psi}(\vec{\varphi}, \vec{\iota}) & (2.10) \\ f(\vec{\varphi}, \vec{\iota}) = 0 & (2.11) \\ M_э - M_c - J\frac{d\omega}{d\tau} = 0 & (2.12) \end{cases}$$

где: $\vec{\Psi}, \vec{U}, \vec{\imath}, \vec{\varphi}$ – вектора синхронных потокосцеплений, напряжений, токов и магнитных потоков схемы замещения магнитной цепи;

$\omega_0 = 2\pi \cdot f$ - угловая синхронная скорость;

$\tau = \omega_0 \cdot t$ - синхронное время;

R – матрица активных сопротивлений электрических контуров;

$\omega -$ скорость вращения ротора;

$M_c -$ момент сопротивления на валу двигателя, являющийся известной функцией скорости;

J $-$ момент инерции вращающихся частей;

$M_э$ – электромагнитный момент, развиваемый двигателем и определяемый согласно формуле:

$$M_э = \frac{P}{\omega_0\sqrt{3}}[\omega_0\Psi_A \cdot (i_B - i_c) + \omega_0\Psi_B \cdot (i_c - i_A) + \omega_0\Psi_C \cdot (i_A - i_B)] \quad (2.13)$$

Для совместного решения уравнений (2.09–2.11), приведём уравнения (2.10 - 2.11) к дифференциальному виду, для чего в соответствии с методикой [98] продифференцируем их как сложные функции по независимой переменно τ:

$$\frac{d(\omega_0\overrightarrow{\Psi})}{d\tau} = \frac{\partial(\omega_0\overrightarrow{\Psi})}{\partial\vec{\imath}} \cdot \frac{d\vec{\imath}}{\partial\tau} + \frac{\partial(\omega_0\overrightarrow{\Psi})}{\partial\vec{\varphi}} \cdot \frac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\tau} \quad (2.10a)$$

$$\frac{\partial f}{\partial\vec{\varphi}} \cdot \frac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\tau} + \frac{\partial f}{\partial\vec{\imath}} \cdot \frac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} = 0 \quad (2.11a)$$

Введем обозначения:

$$\frac{\partial(\omega_0\overrightarrow{\Psi})}{\partial\vec{\imath}} = A_{11}; \quad \frac{\partial(\omega_0.\overrightarrow{\Psi})}{\partial\vec{\varphi}} = A_{12}; \quad \frac{\partial f}{\partial\vec{\varphi}} = A_{22}; \quad \frac{\partial f}{\partial\vec{\imath}} = A_{21;} \quad (2.14)$$

где $A_{11,}$ $A_{12,}$ $A_{21,}$ $A_{22,}$ матрицы соответствующих частных производных.

С учетом уравнений (2.10а), (2.11а) и (2.14) уравнения (2.09), (2.10) и (2.11) примут вид (2.15-2.17):

$$\begin{cases} \dfrac{d(\omega_0\overrightarrow{\Psi})}{d\tau} + \vec{\imath} \cdot R - \vec{U} = 0 & (2.15) \\ \dfrac{d(\omega_0\overrightarrow{\Psi})}{d\tau} = A_{11} \cdot \dfrac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} + A_{12} \cdot \dfrac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\tau} & (2.16) \\ A_{22} \cdot \dfrac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\tau} + A_{21} \cdot \dfrac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} = 0 & (2.17) \end{cases}$$

Из уравнений (2.17) получим уравнение (2.18):

$$\frac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\tau} = -A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot \frac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} \quad (2.18)$$

где: A_{22}^{-1} - матрица, обратная матрице A_{22}.

Подставим (2.18) в (2.16):

$$\frac{d(\omega_0 \cdot \overrightarrow{\Psi})}{\partial\tau} = (A_{11} - A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot A_{12}) \cdot \frac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} \tag{2.19}$$

Обозначим:

$$(A_{11} - A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot A_{12}) = S_\Psi \qquad \text{и} \qquad (-A_{22}^{-1} \cdot A_{21}) = S_\varphi \tag{2.20}$$

В общем виде матрицы S_Ψ и S_φ имеют вид:

$$\frac{d(\omega_0\overrightarrow{\Psi})}{\partial\vec{\imath}} = S_\Psi = \begin{vmatrix} \frac{\partial(\omega_0\Psi_1)}{\partial i_1} & \frac{\partial(\omega_0\Psi_1)}{\partial i_2} & \cdots & \frac{\partial(\omega_0\Psi_1)}{\partial i_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial(\omega_0\Psi_n)}{\partial i_1} & \frac{\partial(\omega_0\Psi_n)}{\partial i_2} & \cdots & \frac{\partial(\omega_0\Psi_n)}{\partial i_n} \end{vmatrix} \tag{2.20a}$$

$$\frac{d(\overrightarrow{\varphi})}{\partial\vec{\imath}} = S_\varphi = \begin{vmatrix} \frac{\partial(\varphi_1)}{\partial i_1} & \frac{\partial(\varphi_1)}{\partial i_2} & \cdots & \frac{\partial(\varphi_1)}{\partial i_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial(\varphi_k)}{\partial i_1} & \frac{\partial(\varphi_k)}{\partial i_2} & \cdots & \frac{\partial(\varphi_k)}{\partial i_k} \end{vmatrix} \tag{2.20b}$$

Тогда с учетом уравнений (2.19) и (2.20) уравнения (2.09 - 2.12) запишутся в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{d(\omega_0\vec{\Psi})}{d\tau} + \vec{\imath} \cdot R - \vec{U} = 0 & (2.21) \\ \dfrac{\partial(\vec{\varphi})}{\partial\tau} = s_\varphi \cdot \dfrac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} & (2.22) \\ \dfrac{\partial(\omega_0.\vec{\Psi})}{\partial\tau} = s_\Psi \cdot \dfrac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} & (2.23) \\ M_э - M_c - I\dfrac{d(\omega)}{d\tau} = 0 & (2.24) \end{cases}$$

Таким образом, получена система обыкновенных дифференциальных уравнений (2.21 – 2.24) математической модели асинхронной машины. Численно интегрируя эти уравнения по синхронному времени τ, получим семейство интегральных кривых:

$$\vec{\varphi} = \overrightarrow{\varphi}(\tau)\,, \quad \omega_0\vec{\Psi} = \omega_0\vec{\Psi}(\tau), \quad \overrightarrow{\imath} = \vec{\imath}(\tau), \quad M_э = M(\tau). \tag{2.25}$$

Эти кривые описывают характеристики электрической машины, как в переходных, так и в установившихся режимах

В работе рассматривается развернутая методика составления уравнений (2.09 - 2.11).

Методика составление уравнений электрического равновесия.

Вектора, входящие в уравнения (2.09), электрического равновесия асинхронной машины в реальных фазовых координатных осях статора и ротора имеют координаты:

$$\begin{cases} \omega_0\vec{\Psi} = colon\,(\omega_0\Psi_A,\ \omega_0\Psi_B, \omega_0\Psi_C,\ \omega_0\Psi_a, \omega_0\Psi_b, \omega_0\Psi_c) \\ \vec{\imath} = colon\,(i_A,\ i_B,\ i_C, i_a, i_b, i_c) \\ \vec{U} = colon\,(U_A,\ U_B,\ U_C, U_a, U_b, U_c) \end{cases} \quad (2.26)$$

а матрица сопротивлений R: R = diag $(R_A, R_B, R_C, R_2,\ R_2,\ R_2)$

В теории электрических машин широко применяется запись математических уравнений электрических машин в различных преобразованных координатах. В работе, при написании уравнений электрического равновесия ротора используются заторможенные трехфазные оси координат и тогда указанные векторы будут иметь имеют координаты:

$\omega_0\overrightarrow{\Psi_\sim} = colon\,(\omega_0\Psi_A, \omega_0\Psi_B, \omega_0\Psi_C, \omega_0\widetilde{\Psi}_a, \omega_0\widetilde{\Psi}_b, \omega_0\widetilde{\Psi}_c)$ и

$\overrightarrow{\imath_\sim} = colon\,(i_A, i_B, i_C, \widetilde{\imath_a}, \widetilde{\imath_b}, \widetilde{\imath_c})$ (2.27)

определяемые через векторы (15) в соответствии с преобразованиями:

$\overrightarrow{\imath_\sim} = \prod \cdot \vec{\imath}\ ; \quad \omega_0\overrightarrow{\Psi_\sim} = \prod \cdot \omega_0\vec{\Psi}\ ; \quad \overrightarrow{U_\sim} = \prod \cdot \vec{U}$ (2.28)

где: $\prod$ – матрица преобразований, имеющая вид:

$\prod =$

1					
	1				
		1			
			$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos\gamma$	$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos(\gamma+\rho)$	$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos(\gamma-\rho)$
			$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos(\gamma-\rho)$	$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos\gamma$	$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos(\gamma+\rho)$
			$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos(\gamma+\rho)$	$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos(\gamma-\rho)$	$\frac{1}{3}+\frac{2}{3}\cos\gamma$

где: γ – начальный угол;

ρ – угол сдвига фаз питающей сети.

Обратные преобразования имеют вид:

$\vec{\imath} = \prod^{-1} \cdot \overrightarrow{\imath_\sim}, \quad \omega_0 \cdot \overrightarrow{\Psi} = \prod^{-1} \cdot \omega_0 \cdot \Psi_\sim$ (2.29)

где: $\prod^{-1}$ обратная матрица матрицы $\prod$.

Преобразования уравнений электрического равновесия ротора с помощью матрицы $\prod$ с физической точки зрения отражают замену трехфазной обмотки вращающегося ротора трехфазной неподвижной обмоткой. При этом оси фаз a,b,c ротора совмещены с осями A,B,C фаз статора, а обмотка статора

остается без изменений. Параметры ротора в этом случае становятся функциями от угла поворота ротора.

С учетом выше изложенного уравнение (2.15) в заторможенных осях примет вид:

$$\frac{d(\omega_0\vec{\Psi})}{d\tau} + K \cdot \omega_0 \cdot \vec{\Psi}_{\sim} + \vec{\imath}_{\sim} \cdot R - \overrightarrow{U_{\sim}} = 0 \qquad (2.30)$$

где: $\overrightarrow{U_{\sim}} = \Pi \cdot \vec{U} = colon\left(U_A, U_B, U_C, U_a, U_b, U_c\right)$ - вектор напряжений в заторможенных трехфазных осях;

$\vec{\imath}_{\sim}, \omega_0 \cdot \overrightarrow{\Psi_{\sim}}$ - векторы токов и потокосцеплений определяемых выражением (17).

K= $\frac{d(\Pi^{-1})}{d\tau} \cdot \Pi$ – матрица вида (2.31)

$$K = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \hline \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \hline \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \hline \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 & -1 \\ \hline \emptyset & \emptyset & \emptyset & -1 & \emptyset & 1 \\ \hline \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 & -1 & \emptyset \\ \hline \end{array} \cdot \frac{\omega}{\omega_0\sqrt{3}} \qquad (2.31)$$

где: ω - угловая скорость вращения ротора (эл.рад/сек).

С учётом вышеизложенного система уравнений электрического равновесия, в заторможенных трехфазных осях, составленная для электрической схемы асинхронного двигателя относительно линейных напряжений в соответствии с выражениями (2.28 – 2.31) примет вид (2.32a-f).

$$\begin{cases} i_A \cdot R_A + \frac{d(\omega_0\Psi_A)}{d\tau} - \frac{d(\omega_0\Psi_B)}{d\tau} - i_B \cdot R_B = U_{AB} & (2.32a) \\ i_B \cdot R_B + \frac{d(\omega_0\Psi_B)}{d\tau} - \frac{d(\omega_0\Psi_C)}{d\tau} - i_C \cdot R_C = U_{BC} & (2.32b) \\ i_A + i_B + i_C = 0 & (2.32c) \\ \frac{d(\omega_0\widetilde{\Psi}_a)}{d\tau} - \frac{d(\omega_0\widetilde{\Psi}_b)}{d\tau} + \frac{\omega}{\omega_0\sqrt{3}}(\omega_0\widetilde{\Psi}_b - 2\omega_0\widetilde{\Psi}_c + \omega_0\widetilde{\Psi}_a) + \widetilde{\imath_a}R_2 - \widetilde{\imath_a}R_2 = 0 & (2.32d) \\ \frac{d(\omega_0\widetilde{\Psi}_b)}{d\tau} - \frac{d(\omega_0\widetilde{\Psi}_c)}{d\tau} + \frac{\omega}{\omega_0\sqrt{3}}(\omega_0\widetilde{\Psi}_c - 2\omega_0\widetilde{\Psi}_a + \omega_0\widetilde{\Psi}_b) + \widetilde{\imath_b}R_2 - \widetilde{\imath_c}R_2 = 0 & (2.32e) \\ \widetilde{\imath_a} + \widetilde{\imath_b} + \widetilde{\imath_c} = 0 & (2.32f) \end{cases}$$

где: R_k— активные составляющие сопротивлений фаз статора (k = A, B, C);

R_2— активные составляющие сопротивлений фаз ротора;

$U_{AB} = U_m \cdot \sin(\omega t), \quad U_{BC} = U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2 \cdot П}{3}\right)$ - линейные напряжения сети;

$U_m -$ амплитудное значение линейного напряжения сети.

Методика составление уравнений магнитного состояния трехфазного асинхронного электродвигателя.

Запись уравнений электрического равновесия в заторможенных трехфазных осях (т. е. замена вращающегося ротора эквивалентным неподвижным позволяет перейти к составлению уравнений магнитного состояния для схемы замещения магнитной цепи электрической машины, в которой не содержится взаимно перемещающихся электрических контуров. Такая схема предложена в [99] для статических устройств с вращающимся магнитным полем. На Рис. 2.5, в качестве примера, приведена разветвленная схема замещения магнитной цепи асинхронного двигателя 4АА50В2У3. Схема составлена в соответствии с принятыми допущениями по методике, приведенной в [98]. Для этой схемы запишем две группы уравнений магнитного состояния.

Первая группа уравнений (2.33) выражает математическую связь между синхронными потокосцеплениями контуров ($\omega_0 \vec{\Psi}$) и токами ($\vec{\imath}$), и так называемыми внутренними координатами магнитного состояния (в. к. м. с.). В качестве элементов вектора (в. к. м. с.) ($\vec{\varphi}$) можно выбрать либо магнитные потоки отдельных ветвей схемы замещения, либо магнитные потоки контуров. Во втором случае число элементов вектора ($\vec{\varphi}$), а, следовательно, и число уравнений, значительно меньше. Поэтому уравнения этой группы записаны относительно контурных магнитных потоков контуров.

$$
\begin{aligned}
&\omega_0 \Psi_A = x_{\sigma A} \cdot i_A + \omega_0 \cdot W_1 \cdot (\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_7 - \varphi_8)\\
&\omega_0 \Psi_B = x_{\sigma B} \cdot i_B + \omega_0 \cdot W_1 \cdot (\varphi_5 + \varphi_6 - \varphi_{11} - \varphi_{12})\\
&\omega_0 \Psi_C = x_{\sigma C} \cdot i_C + \omega_0 \cdot W_1 \cdot (\varphi_9 + \varphi_{10} - \varphi_3 - \varphi_4)\\
&\omega_0 \widetilde{\Psi}_a = x_{\sigma a} \cdot \tilde{\imath}_a + \omega_0 \cdot W_2 \cdot (\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_7 - \varphi_8)\\
&\omega_0 \widetilde{\Psi}_b = x_{\sigma b} \cdot \tilde{\imath}_b + \omega_0 \cdot W_2 \cdot (\varphi_5 + \varphi_6 - \varphi_{11} - \varphi_{12})\\
&\omega_0 \widetilde{\Psi}_c = x_{\sigma c} \cdot \tilde{\imath}_c + \omega_0 \cdot W_2 \cdot (\varphi_9 + \varphi_{10} - \varphi_3 - \varphi_4)
\end{aligned}
\qquad (2.33)
$$

где: $\varphi_k (k = 1, 2 \ldots 13)$ – магнитные потоки не зависимых контуров схемы замещения магнитной цепи на (Рис. 2.5).

$x_{\sigma A}, x_{\sigma B}, x_{\sigma C}$ – индуктивные сопротивления рассеяния статора.

$x_{\sigma a}, x_{\sigma b}, x_{\sigma c}$ – индуктивные сопротивления рассеяния ротора.

W_1, W_2 – число витков обмоток в пазах статора и ротора.

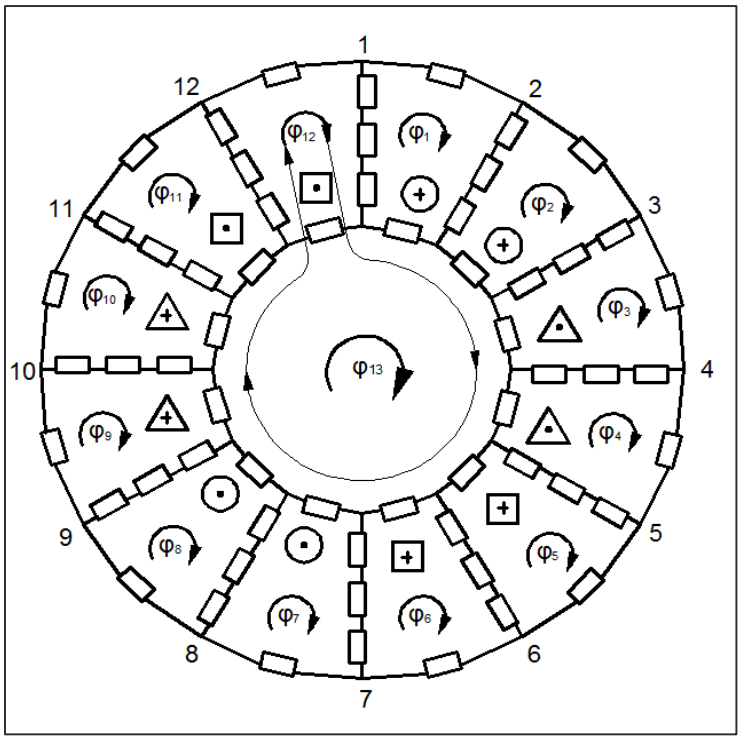


Рис. 2.5. Схема замещения магнитной цепи асинхронного двигателя типа 4АА50В2У3 (схема контурных магнитных потоков φ).

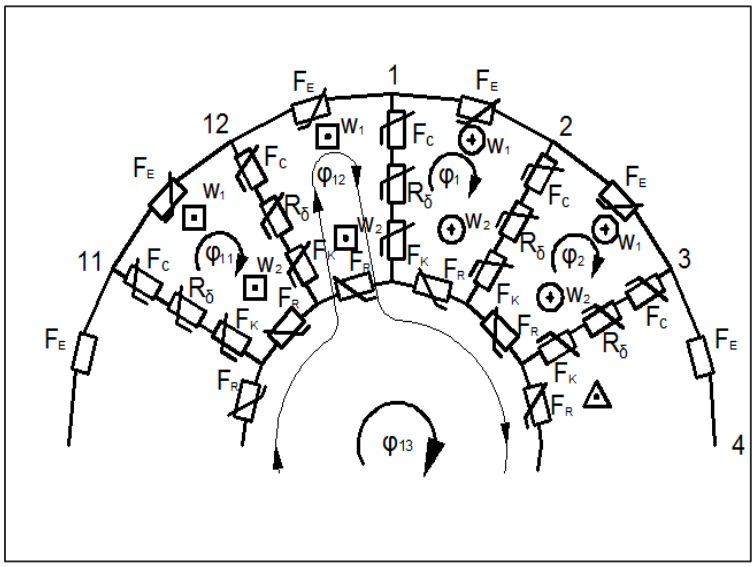


Рис. 2.6 Фрагмент схемы замещения магнитной цепи асинхронного двигателя типа 4АА50В2У3. Элементы магнитной цепи статора и ротора (элементы матрицы А22).

Вторая группа уравнений магнитного состояния (2.34) составлена по второму закону Кирхгофа для магнитных цепей. Аналогом тока служит магнитный поток. На Рис.2.6 показан

фрагмент разветвленной схемы замещения магнитной цепи для двигателя 4АА50В2У3. Число уравнений для данного примера равно числу независимых магнитных контуров (для выбранного в качестве примера электрического двигателя оно равно 13).

Уравнения имеют вид:

$$F_c(\varphi_1-\varphi_{12})+R_\delta(\varphi_1-\varphi_{12})+F_k(\varphi_1-\varphi_{12})+$$
$$+F_E(\varphi_1)-F_c(\varphi_2-\varphi_1)-R_\delta(\varphi_2-\varphi_1)-F_k(\varphi_2-\varphi_1)-$$
$$-F_R(\varphi_{13}+\varphi_{12}-\varphi_1)-i_A\cdot W_1-\tilde{\imath}_a\cdot W_2=0$$

$$F_c(\varphi_2-\varphi_1)+R_\delta(\varphi_2-\varphi_1)+F_k(\varphi_2-\varphi_1)+F_E(\varphi_2)-$$
$$-F_c(\varphi_3-\varphi_2)-R_\delta(\varphi_3-\varphi_2)-F_k(\varphi_3-\varphi_2)-F_R(\varphi_{13}+\varphi_{12}-\varphi_2)-$$
$$-i_A\cdot W_1-\tilde{\imath}_a\cdot W_2=0$$

$$F_c(\varphi_3-\varphi_2)+R_\delta(\varphi_3-\varphi_2)+F_k(\varphi_3-\varphi_2)+F_E(\varphi_3)=$$
$$=F_c(\varphi_4-\varphi_3)-R_\delta(\varphi_4-\varphi_3)-F_R(\varphi_{13}+\varphi_{12}-\varphi_3)+$$
$$+i_C\cdot W_1+\tilde{\imath}_c\cdot W_2=0$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.34)$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots....$$
$$F_E(\varphi_{12})-F_c(\varphi_1-\varphi_{12})-R_\delta(\varphi_1-\varphi_{12})-F_k(\varphi_1-\varphi_{12})+F_c(\varphi_{12}-\varphi_{11})$$
$$+R_\delta(\varphi_{12}-\varphi_{11})+F_k(\varphi_{12}-\varphi_{11})+\sum_{k=1}^{11}F_R(\varphi_{12}+\varphi_{13}-\varphi_k)+i_B\cdot W_1-\tilde{\imath}_b\cdot W_2=0$$

$$\sum_{k=1}^{11}F_R(\varphi_{13}+\varphi_{12}-\varphi_k)+F_R(\varphi_{13})=0$$

где: R_δ - линейное магнитное сопротивление воздушного зазора;

$F_c(\varphi), F_k(\varphi), F_E(\varphi), F_R(\varphi)$ - падение магнитных напряжений на отдельных участках магнитной цепи в теле статора и ротора.

Уравнения (2.32), (2.33) и (2.34) образуют исходную систему дифференциальных нелинейных и алгебраических уравнений математической модели асинхронной машины. Продифференцируем уравнения (2.33) и (2.34) по векторам токов и магнитных потоков:

$$\overrightarrow{\varphi_\sim}=colon\,(\varphi_A,\varphi_B,\varphi_C,\widetilde{\varphi_a},\widetilde{\varphi_b},\widetilde{\varphi c})$$
$$\vec{\imath}=colon\left(i_{A,}\,i_{B,}\,i_{C,}i_{a,}i_{b,}i_c\right).$$

Далее, в соответствии с уравнением (2.14), формируем элементы матриц A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, и в соответствии с уравнением (2.20) – элементы матриц S_Ψ и S_φ.

В развернутом виде полные производные синхронных потокосцеплении цепей статора и ротора имеют вид (2.35).

$$\frac{d(\omega_0\Psi_A)}{d\tau} = x_{AA}\cdot\frac{di_A}{d\tau} + x_{AB}\cdot\frac{di_B}{d\tau} + x_{AC}\cdot\frac{di_C}{d\tau} + x_{Aa}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_a}{d\tau} + x_{Ab}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_b}{d\tau} + x_{Ac}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_c}{d\tau}$$

$$\frac{d(\omega_0\Psi_B)}{d\tau} = x_{BA}\cdot\frac{di_A}{d\tau} + x_{BB}\cdot\frac{di_B}{d\tau} + x_{BC}\cdot\frac{di_C}{d\tau} + x_{Ba}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_a}{d\tau} + x_{Bb}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_b}{d\tau} + x_{Bc}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_c}{d\tau}$$

$$\frac{d(\omega_0\Psi_C)}{d\tau} = x_{CA}\cdot\frac{di_A}{d\tau} + x_{CB}\cdot\frac{di_B}{d\tau} + x_{CC}\cdot\frac{di_C}{d\tau} + x_{Ca}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_a}{d\tau} + x_{Cb}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_b}{d\tau} + x_{Cc}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_c}{d\tau} \qquad (2.35)$$

$$\frac{d(\omega_0\Psi_a)}{d\tau} = x_{aa}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_a}{d\tau} + x_{ab}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_b}{d\tau} + x_{ac}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_c}{d\tau} + x_{aA}\cdot\frac{di_A}{d\tau} + x_{aB}\cdot\frac{di_B}{d\tau} + x_{aC}\cdot\frac{dic}{d\tau}$$

$$\frac{d(\omega_0\Psi_b)}{d\tau} = x_{ba}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_a}{d\tau} + x_{bb}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_b}{d\tau} + x_{bc}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_c}{d\tau} + x_{bA}\cdot\frac{di_A}{d\tau} + x_{bB}\cdot\frac{di_B}{d\tau} + x_{bC}\cdot\frac{di_C}{d\tau}$$

$$\frac{d(\omega_0\Psi_c)}{d\tau} = x_{ca}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_a}{d\tau} + x_{cb}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_b}{d\tau} + x_{cc}\cdot\frac{d\tilde{\imath}_c}{d\tau} + \cdot\frac{di_A}{d\tau} + x_{cB}\cdot\frac{di_B}{d\tau} + x_{cC}\cdot\frac{dic}{d\tau}$$

где: x_{AA} … , x_{AB} … , x_{aa} … , x_{ab} … - собственные и взаимные индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора (элементы матрицы индуктивных сопротивлений).

Формулы для расчета дифференциальных магнитных сопротивлений отдельных участков магнитной цепи двигателя (элементов матрицы A_{22}) определяются следующими уравнениям:

Элементы зубцов статора:

$$\begin{aligned} Fc1 &= \frac{l_c}{S_c}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{c1}) & B_{c1} &= \left|\frac{\varphi_1}{S_c}\right| \\ Fc2 &= \frac{l_c}{S_c}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{c2}) & B_{c2} &= \left|\frac{\varphi_2}{S_c}\right| \\ &\vdots & &\vdots \\ Fc12 &= \frac{lc}{S_c}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}\cdot(Bc_{12}) & B_{c12} &= \left|\frac{\varphi_{12}}{S_c}\right| \end{aligned} \qquad (2.36)$$

Элементы спинки статора:

$$\begin{aligned} Fe1 &= \frac{l_e}{S_e}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{e1}) & B_{e1} &= \frac{\varphi_1-\varphi_{12}}{S_e} \\ Fe2 &= \frac{l_e}{S_e}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{e2}) & B_{e2} &= \frac{\varphi_2-\varphi_1}{S_e} \\ &\vdots & &\vdots \\ Fe12 &= \frac{l_e}{S_e}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{e12}) & B_{e12} &= \frac{\varphi_{11}-\varphi_{10}}{S_e} \end{aligned} \qquad (2.37)$$

Элементы зубцов ротора

$$\begin{aligned} Fk1 &= \frac{l_k}{S_k}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{k1}) & B_{k1} &= \frac{\varphi_1-\varphi_2}{S_k} \\ Fk2 &= \frac{l_k}{S_k}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{k2}) & B_{k2} &= \frac{\varphi_2-\varphi_1}{S_k} \\ &\vdots & &\vdots \\ Fk12 &= \frac{l_k}{S_k}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{k12}) & B_{12} &= \frac{\varphi_{12}-\varphi_{11}}{S_k} \end{aligned} \qquad (2.38)$$

Элементы тела ротора:

$$\begin{aligned} FR_1 &= \frac{l_R}{S_R}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{R1}) & B_{R1} &= \frac{\varphi_{13}+\varphi_{12}-\varphi_1}{S_R} \\ FR_2 &= \frac{l_R}{S_R}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{R2}) & B_{R2} &= \frac{\varphi_{13}+\varphi_{12}-\varphi_2}{S_R} \\ &\vdots & &\vdots \\ FR_{11} &= \frac{l_R}{S_R}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{R11}) & B_{R11} &= \frac{\varphi_{13}+\varphi_{12}-\varphi_{11}}{S_R} \\ FR_{12} &= \frac{l_R}{S_R}\cdot\frac{\partial H}{\partial B}(B_{R12}) & B_{R12} &= \frac{\varphi_{13}}{S_R} \end{aligned} \qquad (2.39)$$

Для выполнения расчётов необходимо иметь математическое выражение уравнения кривой намагничивания стали двигателя и её первой производной $\left(\frac{\partial H}{\partial B}\right)$. На основании предварительно выполненных расчетов и анализа технической литературы по данной теме, была составлена эмпирическая зависимость первой производной кривой намагничивания для стали магнитопровода электродвигателя вида:

$$\frac{\partial H}{\partial B} = 376 + 418\cdot B^{10} \qquad (2.40)$$

Уравнение (2.18) для рассматриваемого примера в матричной форме имеет вид (2.41):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial\varphi_1}{\partial\tau} \\ \frac{\partial\varphi_2}{\partial\tau} \\ \frac{\partial\varphi_3}{\partial\tau} \\ \vdots \\ \frac{\partial\varphi_{13}}{\partial\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\varphi_1}{\partial i_A} & \frac{\partial\varphi_1}{\partial i_B} & \frac{\partial\varphi_1}{\partial i_C} & \frac{\partial\varphi_1}{\partial i_a} & \frac{\partial\varphi_1}{\partial i_b} & \frac{\partial\varphi_1}{\partial i_c} \\ \frac{\partial\varphi_2}{\partial i_A} & \frac{\partial\varphi_2}{\partial i_B} & \frac{\partial\varphi_2}{\partial i_C} & \frac{\partial\varphi_2}{\partial i_a} & \frac{\partial\varphi_2}{\partial i_b} & \frac{\partial\varphi_2}{\partial i_c} \\ \frac{\partial\varphi_3}{\partial i_A} & \frac{\partial\varphi_3}{\partial i_B} & \frac{\partial\varphi_3}{\partial i_C} & \frac{\partial\varphi_3}{\partial i_a} & \frac{\partial\varphi_3}{\partial i_b} & \frac{\partial\varphi_3}{\partial i_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial\varphi_{13}}{\partial i_A} & \frac{\partial\varphi_{13}}{\partial i_B} & \frac{\partial\varphi_{13}}{\partial i_C} & \frac{\partial\varphi_{13}}{\partial i_a} & \frac{\partial\varphi_{13}}{\partial i_b} & \frac{\partial\varphi_{13}}{\partial i_c} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{di_A}{d\tau} \\ \frac{di_B}{d\tau} \\ \frac{di_C}{d\tau} \\ \vdots \\ \frac{di_c}{d\tau} \end{bmatrix} \qquad (2.41)$$

Подставив в уравнение (2.32) вместо полных производных синхронных Потокосцеплений соответствующие им значения из (2.35) и исключив токи фазы В, (i_B и $\tilde{\imath}_{b)}$ получим систему уравнений (2.42).

$$
\begin{aligned}
&(x_{AA} - x_{BA} - x_{AB} + x_{BB}) \cdot \frac{\partial i_A}{\partial \tau} + (x_{AC} - x_{BC} - x_{AB} + x_{BB}) \cdot \frac{\partial i_c}{\partial \tau} + \\
&+x_{Aa} - x_{Ba} - x_{Ab} + x_{Bb}) \cdot \frac{\partial \tilde{\imath}_a}{\partial \tau} + (x_{Ac} - x_{Bc} - x_{Ab} + x_{Bb}) \cdot \frac{\partial \tilde{\imath}_c}{\partial \tau} = \\
&= U_{AB} - (-i_A - i_C) \cdot R_B - i_A \cdot R_A \\
&(x_{BA} - x_{CA} - x_{BB} + x_{CB}) \cdot \frac{\partial iA}{\partial \tau} + (x_{BC} - x_{CC} - x_{BB} + x_{CB}) \cdot \frac{\partial i_C}{\partial \tau} \\
&+(x_{Ba} - x_{Ca} - x_{Bb} + x_{Cb}) \cdot \frac{\partial \tilde{\imath}_a}{\partial \tau} + (x_{Bc} - x_{Cc} - x_{Bb} + x_{Cb}) \cdot \frac{\partial \tilde{\imath}_c}{\partial \tau} = \\
&= U_{BC} — (i_C - i_A) \cdot R_B + i_C \cdot R_C \\
&(x_{aA} - x_{aB} - x_{bA} + x_{bB}) \cdot \frac{\partial i_A}{\partial \tau} + (x_{aC} - x_{aB} - x_{bB} + x_{bC}) \cdot \frac{\partial i_C}{\partial \tau} + (x_{ab} - x - \\
&-x + x_{bb}) \cdot \frac{\partial \tilde{\imath}_A}{\partial \tau} + (x_{ac} - x_{ab} - x_{bb} + x_{bc}) \cdot \frac{\partial \tilde{\imath}_c}{\partial \tau} = \\
&= \frac{\omega \cdot P}{\omega_0 \sqrt{3}} \cdot \left(\omega_0 \cdot \widetilde{\Psi}_b - 2 \cdot \omega_0 \cdot \widetilde{\Psi}_c + \omega_0 \cdot \widetilde{\Psi}_a\right) - \tilde{\imath}_a \cdot R_2 + (-\tilde{\imath}_a - \tilde{\imath}_c) \cdot R_2 \\
&(x_{cA} - x_{cB} - x_{bA} + x_{bB}) \cdot \frac{\partial i_a}{\partial \tau} + (x_{cC} - x_{cB} - x_{cC} + x_{bC}) \cdot \frac{\partial i_c}{\partial \tau} + \\
&+(x_{aa} - x_{cb} - x_{ba} + x_{bb}) \cdot \frac{\partial \tilde{\imath}_a}{\partial \tau} + (x_{ac} - x_{cb} - x_{bb} + x_{bc}) \cdot \frac{\partial \tilde{\imath}_c}{\partial \tau} = \\
&= -\frac{\omega \cdot P}{\omega_0 \sqrt{3}} \cdot \left(\omega_0 \cdot \widetilde{\Psi}_c - 2 \cdot \omega_0 \cdot \widetilde{\Psi}_b\right) - \tilde{\imath}_c \cdot R_2 - (-\tilde{\imath}_a - \tilde{\imath}_c) \cdot R_2
\end{aligned}
\qquad (2.42)
$$

Приведенные уравнения (2.35-2.42) образуют полную систему обыкновенных дифференциальных уравнений математической модели асинхронной машины. В результате их численного интегрирования можно рассчитать и проанализировать электромагнитные и электромеханические процессы в электрической машине.

Исходными данными для расчета являются:

1. Геометрические размеры магнитопровода.
2. Магнитное сопротивление воздушного зазора.
3. Обмоточные данные (число витков обмотки в пазах статора и ротора)
4. Активные сопротивления фаз статора и ротора и индуктивные сопротивления рассеяния.

5. Величины приложенных напряжений.
6. Начальное и конечное время интегрирования.
7. Начальный шаг интегрирования.

Алгоритм расчета электромагнитных параметров электродвигателя предусматривает:

- ввод исходных данных, начальных условий и формирование матриц A_{11}, A_{12}, A_{21};
- расчет дифференциальных магнитных сопротивлений и формирование матрицы A_{22};
- решение матричного уравнения относительно матрицы Sφ;
- решение матричного уравнения относительно матрицы Sψ;
- решение системы уравнений электрического равновесия относительно производных $\frac{di}{d\tau}$ путём интегрирование дифференциальных уравнений методом Рунге - Кутта;
- печать результатов счета.

Блок-схема программы расчета электромагнитных параметров электродвигателя по описанному алгоритму приведена на Рис. 2.5.

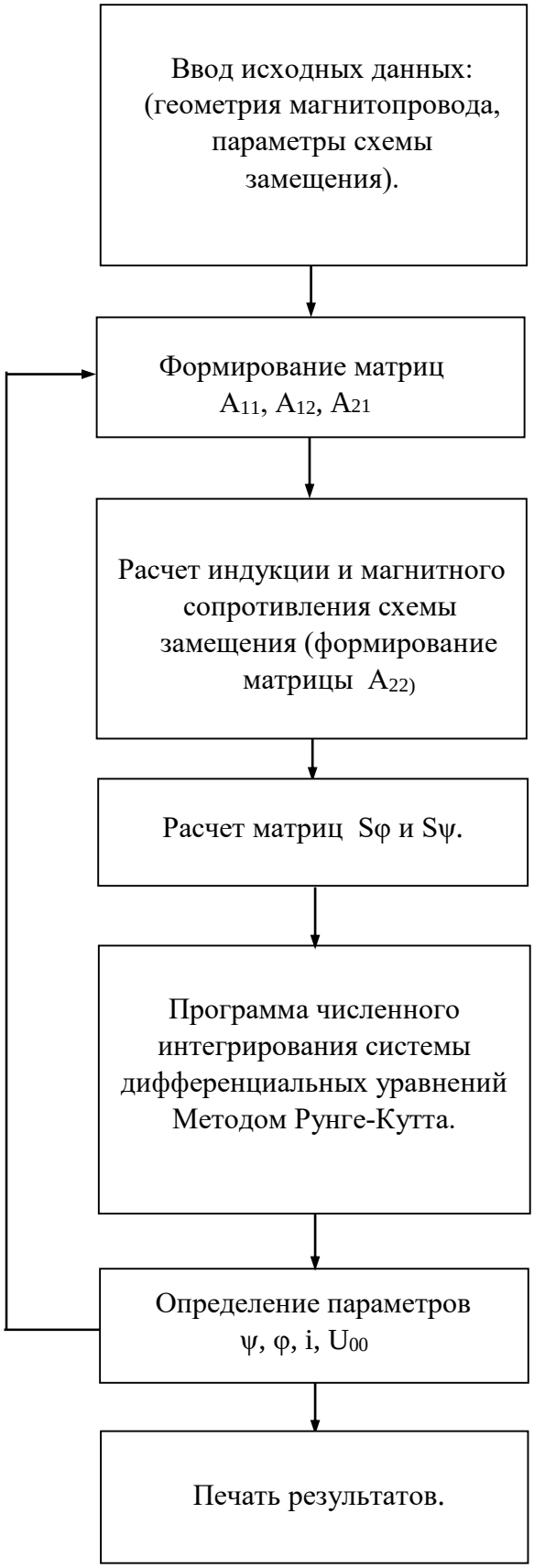


Рис. 2.5 Блок-схема расчёта параметров трёхфазного асинхронного двигателя по математической модели.

Общий вид решения предложенной математической модели.

Общий вид решения предложенной математической модели в векторной форме [160] может быть представлено в следующем виде:

Исходные уравнения.

$$\left.\begin{array}{l} \frac{d(\omega_0\vec{\Psi})}{d\tau} + \vec{\imath}\cdot R - \vec{U} = \emptyset \\ d(\omega_0\vec{\Psi}) = \omega_0\vec{\Psi}(\vec{\varphi},\vec{\imath}) \\ f(\vec{\varphi},\vec{\imath}) = \emptyset \end{array}\right\} \quad (2.43)$$

Продифференцируем их по независимой переменной по времени (τ)

$$\frac{d(\omega_0\vec{\Psi})}{d\tau} = \frac{\partial(\omega_0\vec{\Psi})}{\partial\vec{\imath}}\cdot\frac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} + \frac{\partial(\omega_0\vec{\Psi})}{\partial\vec{\varphi}}\cdot\frac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\tau} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial f}{\partial\vec{\varphi}}\cdot\frac{\partial\vec{\varphi}}{\partial\tau} + \frac{\partial f}{\partial\vec{\imath}}\cdot\frac{\partial\vec{\imath}}{\partial\tau} = \emptyset \quad (2.45)$$

Обозначим:

$$\frac{\partial(\omega_0\vec{\Psi})}{\partial\vec{\imath}} = A11\ ;\ \ \frac{\partial(\omega_0\vec{\Psi})}{\partial\vec{\varphi}} = A22\ ;\ \ \frac{\partial f}{\partial\vec{\varphi}} = A\,12\ ;\ \ \frac{\partial f}{\partial\vec{\imath}} = A21; \quad (2.46)$$

Далее:

$$\begin{array}{l} S\varphi = -A21\cdot A22^{-1}. \\ S\psi = -A11 + A12\cdot S\varphi; \\ S\psi = A11 - A12\cdot A21\cdot A22^{-1}. \end{array} \quad (2.47)$$

Подставив принятые обозначения (2.47) в (2.43) получим систему уравнений:

$$\left.\begin{array}{l} p\left(\omega_0\vec{\Psi}\right) + \vec{\imath}\cdot R - U = \emptyset \\ p\left(\omega_0\vec{\Psi}\right) = A11\cdot p\vec{\imath} + A12\cdot p\vec{\varphi} \\ A22\cdot p\vec{\varphi} + A21\cdot p\vec{\imath} = \emptyset \end{array}\right\} \quad (2.48)$$

Подставляем (2.46 – 2.47) в (2.43 – 2.45) и окончательно получим систему дифференциальных уравнений вида (2.49).

$$\begin{cases} p\vec{\varphi} = -A21\cdot A22^{-1}\cdot p\vec{\imath} = S\varphi\cdot p\vec{\imath} \\ p\left(\omega_0\vec{\Psi}\right) = (A11 - A12\cdot A21\cdot A^{-1}\ )\cdot p\vec{\imath} = S\psi\cdot p\vec{\imath} \\ S\psi\cdot p\vec{\imath} + R\cdot\vec{\imath} - \vec{U} = \emptyset \end{cases} \quad (2.49)$$

Численно интегрируя уравнения (2.49) методом Рунге-Кутта четвертого порядка получим искомые значения параметров электродвигателя.

Программа расчета параметров асинхронного электродвигателя, работающего в условиях насыщения магнитной системы.

На основании представленной математической модели была разработана компьютерная программа. Программа разработана в объеме 377 операторов с использованием соответствующих математических приложений в виде программ и подпрограмм [9], в том числе:

- Решение простых алгебраических уравнений первого порядка, программа (FUNCION DMDB(Y)).
- Решение алгебраических уравнений, представленных в матричной форме, программа (CALL GELG).
- Транспонирование матриц к обратному виду, подпрограмма SUBROUTIN FCN (X.Y).
- Приведение прямоугольных матриц к треугольному виду по методу Гаусса, подпрограмма SUBROUTIN DERY.
- Численное интегрирование дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутта, программа CALL (RKCS) и других.

Полная программа математической модели представлена в Приложении 2, а блок-схема расчёта на Рис.2.5.

Программа позволяет выполнять расчеты необходимых параметров асинхронного электродвигателя в том числе: фазные токи, значения магнитной индукции на любом участке магнитной цепи электродвигателя, напряжение системы нуль двигателя – нуль сети работающего в условиях насыщения магнитной системы. Необходимые параметры электродвигателя можно определить и вывести на печать при работе двигателя, как в нормальном, так и в аварийном режиме, и в любой момент времени.

В Приложении 6 представлены результаты расчётов некоторых параметров асинхронных двигателей, выполненных с применением разработанной компьютерной программы.

Экспериментальные исследования показали, что расчеты, выполненные с применением математической модели адекватны с результатами экспериментальных исследований с относительной погрешностью не более 5 -7%. [163,162].

В Приложении 7 представлен так же вид матриц A11, A12, A21, A22.
(электромагнитные параметры асинхронного двигателя 4АА50В2У3).

2.3 Экспериментальные исследования системы нуль двигателя – нуль сети как источника аварийного сигнала обрыва фаз.

Согласно рекомендациям [62,127,128] были определены объект исследования, цели и программа исследований.

Объект исследования - система нуль двигателя – нуль сети.

Цель исследования - получение ряда характеристик системы нуль двигателя – нуль сети необходимых для разработки защитного устройства электродвигателя от аварийного режима «обрыв фазы питающей сети».

Программа исследований.

Для выполнения поставленной задачи необходимо определить ряд зависимостей системы нуль двигателя – нуль сети от параметров электродвигателя в нормальных и аварийных режимах.

1. Зависимость напряжение системы нуль двигателя – нуль сети (U00') от степени загрузки исследуемого электродвигателя (скольжения S).
2. Зависимость напряжение системы нуль двигателя – нуль сети (U00') от числа пар полюсов исследуемого электродвигателя (p).
3. Зависимость напряжение системы нуль двигателя – нуль сети (U00') от величины номинальной мощности исследуемого электродвигателя (Pн).
4. Изменение напряжение системы нуль двигателя – нуль сети (U00') в режиме «обрыв фазы сети».
5. Зависимость напряжение системы нуль двигателя – нуль сети (U00') в симметричном (по электропитанию) режиме от величины напряжения питающей сети (Uc).
6. Зависимость напряжения (U00') и мощности системы «нуль двигателя – нуль сети» (P00′) от тока нагрузки в системе «нуль двигателя – нуль сети».

Методика проведения экспериментальных исследований.

Для выполнения программы исследований была собрана лабораторная установка представленная на Рис. 2.6. Список оборудования и комплекта измерительных приборов, используемых для выполнения программы экспериментальных исследований, был составлен с учетом рекомендаций [59,66,85,90].

Установка состоит из исследуемого электродвигателя (1), генератора постоянного тока как нагрузочного устройства (2), трёхфазного регулятора напряжения (3), выключателя фазы питающей сети (4) и комплекта подключаемых измерительных приборов.

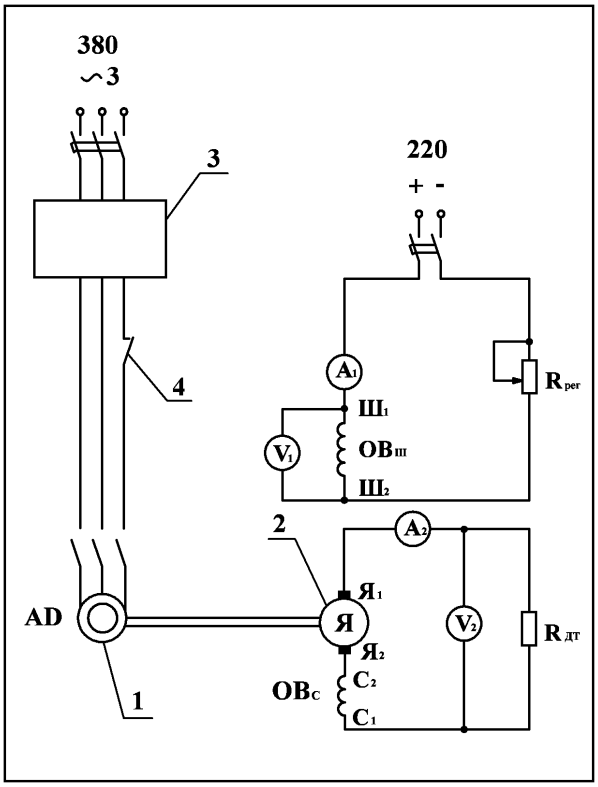


Рис. 2.6 Схема лабораторной установки для проведения исследований параметров системы «нуль двигателя – нуль сети».

Список оборудования и комплект измерительных приборов, используемых для выполнения программы экспериментальных исследований:

1. Трехфазный универсальный измерительный комплект К-50.
2. Трехфазный лабораторный автотрансформатор типа АТСК-25/05.
3. Генератор постоянного тока типа П62М 230 (11,0 кВт).
4. Порошковый электромагнитный нагрузочный тормоз типа ПТ-6М1
5. Реостат ползунковый лабораторный типа РСП4-8.
6. Реостат ползунковый лабораторный типа РСП4-21.
7. Вольтметры лабораторные электромагнитной системы типа Э544, Э545.
8. Вольтметры лабораторные электродинамической системы типа Д5102, Д5103.
9. Амперметр лабораторный электродинамической системы типа Д533.
10. Амперметр лабораторный магнитоэлектрический типа М104.
11. Мили амперметр лабораторный электромагнитной системы типа Э513/3, Э513/4.
12. Ваттметр однофазный лабораторный типа Д 5065 .
13. Тахометр типа АТ-6 (стробоскопический без контактный лазерный).
14. Осциллограф аналоговый однолучевой С1-73.
15. Осциллограф аналоговый однолучевой С1-19Б.

Для измерения напряжение системы «нуль двигателя – нуль сети» (U00') были использованы лабораторные вольтметры типа: Э544, Э545 и Д5102, Д5103, включаемые между двумя точками: нулевой точкой обмотки статора исследуемого электродвигателя и нулём питающей сети.

Изменение степени нагрузки исследуемого электродвигателя осуществлялось электромагнитным тормозом типа ПТ-6М1 за счет изменения величины напряжения в обмотке возбуждения тормоза или с помощью генератора постоянного тока типа П62М 230. Нагрузка генератора создавалась лампами накаливания и реостатом сопротивления. Изменение нагрузки исследуемого электродвигателя контролировалось по амперметру измерительного комплекта К-50, включенному в статорную цепь исследуемого электродвигателя и тахометром без контактного типа АТ–6 по изменению числа оборотов ротора исследуемого электродвигателя пересчитанных на величину скольжения.

Изменение величины питающего напряжения, подаваемого на исследуемый двигатель, осуществлялось с помощью трехфазного регулятора напряжения АТСК-25/05 мощностью 16 кВА и контролировалось вольтметрами в каждой фазе измерительным комплектом К-50 включённого в статорную цепь исследуемого электродвигателя.

Режим обрыва фаз создавался с помощью выключателя (АЕ 1014) включенного в одну из фаз исследуемого двигателя.

Определение мощности системы нуль двигателя – нуль сети (P00') измерялось с помощью ваттметра типа Д5065.

Для получения зависимости напряжения (U00') от тока (I00') система 00' была замкнута на нагрузочное сопротивление реостатного типа РСП4-8 с сопротивлением Rн=800 Ом, и номинальным током Iн=1,4 А. Путём изменения величины сопротивления реостата РСП4-8 ток (I00') изменялся от min до max значения (от режима ХХ до режима КЗ). Ток в системе «нуль двигателя – нуль сети» измерялся амперметром М-104.

Форма напряжения (U00') регистрировалась осциллографом типа С1-73, включённым между двумя точками - нулевой точкой обмотки статора исследуемого электродвигателя и нулём питающей сети и откалиброванным по осям, а также фоторегистратором.

Каждый опыт выполнялся не менее пяти раз. Полученные экспериментальные данные заносились в соответствующие таблицы.

По всему объёму экспериментальных данных была выполнена статистическая обработка полученных данных.

Статистическая обработка результатов измерений.

Методика обработки результатов прямых измерений.

Теория статистической обработки результатов экспериментов [75,124,130,155] рекомендует за приближенное значение измеряемой величины принимать среднее арифметическое значение, определяемое по формуле (2.50)

$$\overline{\mathrm{X}} = \frac{\sum n_i X_i}{n}. \qquad (2.50)$$

Но и это среднее значение $\overline{\mathrm{X}}$ не будет представлять собой истинного значения измеряемой величины, а только его приближенную оценку. Поэтому далее необходимо оценить его ошибку ΔX, величина которой связана с надежностью (доверительной вероятностью). В итоге приходим к записи результата измерений в виде доверительного интервала: $\overline{\mathrm{X}} \pm \Delta\mathrm{X}$. Задача заключается в том, чтобы по данным эксперимента найти приближенную оценку результата измерений $\overline{\mathrm{X}}$ и его ошибку $\Delta\mathrm{X}$ (для заданной надежности γ).

Для оценки случайной погрешности измерения используют среднее квадратичное отклонение σ, определяемое по формуле (2.51).

$$\sigma = \sqrt{D}, \qquad (2.51)$$

где D – дисперсия, характеризующая разброс случайных величин вокруг среднего значения определяемая по формуле (2.52).

$$D = \frac{\sum n_i (X_i - \bar{X})^2}{n}. \qquad (2.52)$$

Если число измерений мало ($n<30$) и информации недостаточно, то оценку рассеяния "уточняют" и применяют исправленную дисперсию и исправленное среднее квадратичное отклонение S^3, определяемую по формуле (2.53).

$$S^2 = \frac{n}{n-1} D \qquad (2.53)$$

Случайная погрешность измерения, характеризующая точность определения среднего арифметического, оценивается стандартной ошибкой по формуле:

$$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \qquad (2.54)$$

Для расчета абсолютной ошибки $\Delta\mathrm{X}$ при малом количестве измерений используем специальный коэффициент, зависящий от надежности (γ) и числа измерений (n), называемый коэффициентом Стьюдента (t). (Таблица 3.1), тогда $\Delta\mathrm{X}$ определиться по формуле (2.55)

$$\Delta\mathrm{X} = S_{\bar{X}} \cdot t, \qquad (2.55)$$

где: ΔX – абсолютная ошибка для данной доверительной вероятности (надежности);

$S_{\bar{X}}$ – стандартная ошибка;

$t = t(\gamma, n)$ – коэффициент Стьюдента.

При достаточном (в статистическом смысле) числе измерений ($n>30$) коэффициент Стьюдента стремится к значению коэффициента Лапласа.

Значения коэффициента t для расчёта доверительного интервала приведены в справочной литературе. В оценке доверительного интервала была использована доверительная вероятность P = 0,95.

Алгоритм статистической обработки экспериментальных данных прямых измерений (составлен, согласно рекомендациям, приведенным в [125]).

1. Определяется конечная выборка из (n) измеренных величин.
2. Выборка нормализуется по возрастанию.
3. Производится оценка погрешности измерительных приборов.
   (оценка погрешности производится по классу точности прибора либо по шкале).
4. Производится вычисление среднего арифметического значения по формуле:

$$Xcp = \sum_{i=1}^{n} Xi/n \qquad (2.56)$$

5. Определяется отклонение каждого измерения от среднего арифметического.

$$\Delta Xi = Xi - Xcp \qquad (2.57)$$

6. Определяется сумма квадратов всех отклонений.

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta Xi \qquad (2.58)$$

7. Определяется исправленная выборочная дисперсия (если 4<n<10).

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta Xi}{n-1} \qquad (2.59)$$

8. Определяется средняя квадратичная ошибка отдельных измерений.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta Xi}{n-1}} \qquad (2.60)$$

9. Определяются и исключаются из расчетов грубые ошибки.

10. Определяется квадратичная ошибка среднего арифметического.

$$Sx = S/\sqrt{n} \qquad (2.61)$$

11. Определяется верхняя граница приборной погрешности (абсолютна ошибка Δпр).
    Абсолютная погрешность прибора (Δпр) определяется по классу точности прибора (α%) или по верхнему пределу измерений (lim γ) по формуле:

$$\Delta пр = \alpha * (lim\gamma)/100 \qquad (2.62)$$

12. Задаётся доверительная вероятность (P) и, с учетом количества измерений (n), по соответствующей таблице определяется коэффициент Стьюдента (tст) .
13. Определяется абсолютная погрешность измерения (Δизм).

$$\Delta изм = Sx^* tст \quad (2.63)$$

14. Определяется относительная погрешность измерения (δизм).

$$\delta изм = \frac{\Delta изм}{Xср} * 100\% \quad (2.64)$$

15. Определяется полная погрешность измерения (Δ пол).

$$\Delta пол = \sqrt{\Delta изм^2 + \Delta пр^2} \quad (2.65)$$

16. Производится округление значений вначале полной погрешности прибора, а затем с учетом полученного значении и полной погрешности измерений.
17. Записывается окончательный результат по стандартной форме.

Алгоритм и методика исключения из расчетов грубых ошибок при статистической обработке экспериментальных данных прямых измерений.

Существуют различные методики исключение грубых промахов при статистической обработке результатов экспериментальных данных [125] в том числе:

- Исключение грубых промахов по критерию (3σ).
- Исключение грубых промахов по критерию Диксона (Z-критерию).
- Исключение грубых погрешностей по критерию Шовоне.

Однако указанные критерии дают удовлетворительные результаты при условии, что количество измерений в рассматриваемой выборке n ≥ 30…50. При малых выборках с числом измерений n <10 определение грубых погрешностей рекомендуется оценивать по критерию Граббса-Романовского, который и был применён в данной работе.

Критерий можно применять, если число измерений (n) невелико – не превышает 10 (т.е. 4<n<10). Статистический критерий обнаружения грубых погрешностей основан на предположении, что выборка взята из генеральной совокупности, распределенной нормально. Это позволяет использовать для анализа распределения наибольшее по абсолютному значению расчетное отклонение:

$$\beta p = \frac{(\Delta Ximax)}{S} \quad (2.66)$$

где: βp - расчетное значение квантиля распределения статистик;

Δximax - максимальное отклонение измеренных значений от среднестатистического;

S - среднеквадратическая ошибка $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta Xi}{n-1}}$.

При этом необходимо учесть, что значения Xср и S определяются без учета сомнительного измерения.

Для уровней значимости α = 0,10; 0,05; 0,01 или доверительной вероятности (1–α) = 0,90; 0,95; 0,99 и n=3-5 значения (βт) приведены в Таблице. 2.1. На практике обычно используют уровень значимости α= 0,05 (результат получается с 95 %-й доверительной вероятностью).

Для того, чтобы в группе из n наблюдений: (X1 X2, ..., Xn) отбросить сомнительный результат надо:

а) вычислить дробь $$\beta p = \frac{Xcp - Ximax}{S}; \qquad (2.67)$$

б) по Таблице 2.1 найти теоретическое значение βт (в зависимости от n и выбранного уровня значимости Р);

в) сравнить рассчитанное по п. «а» значение βр с βт. Если βр > βт, то результат измерения следует отбросить как грубый промах.

Таблица 2.1 Значения квантилей распределения максимального отклонения (βт).

n	**Уровни значимости Р**			
	0,1	0,05	0,025	0,01
3	1,41	1,41	1,41	1,41
4	1,65	1,69	1,71	1,72
5	1,79	1,87	1,92	1,96

г) процедуру исключения промахов следует повторить для следующего по абсолютному значению максимального относительного отклонения, но предварительно необходимо пересчитать βр и S для выборки нового объема (n – 1).

Результаты статистической обработки экспериментальных исследований.

В соответствии с программой исследований были проведены эксперименты и получены опытные данные зависимости напряжения U00' от ряда факторов: мощности двигателя, скольжения двигателя, числа пар полюсов, напряжения питающей сети, режима работы двигателя. Полученные результаты представлены в соответствующих таблицах.

В Таблице 2.2 представлены экспериментальные данные – зависимости напряжения U00` от скольжения двигателя S (до статистической обработки). Для построения графической зависимости по этим данным были сняты семь точек. Опытные данные по каждой точке повторялись не менее пяти раз.

Таблица 2.2. Экспериментальные данные зависимости напряжения (U00) от скольжения (S) для двигателя 4А 80 А2 У3 (до статистической обработки).

№ опыта	№ точки S,%	1 0,1	2 1,0	3 2,0	4 4,0	5 6,0	6 8,0	7 10
1	U00, В	21,7	19,7	18,5	16,3	15,5	15,5	15,5
2	U00, В	20,2	19,6	18,3	16,3	14,8	15,0	15,6
3	U00, В	22,0	20,1	17,9	15,7	15,2	15,3	15,2
4	U00, В	22,5	20,5	17,5	16,5	14,7	15,1	15,7
5	U00, В	22,4	20,7	18,1	15,9	15,2	14,9	15,0

В соответствии с приведенной методикой и алгоритмом была выполнена статистическая обработка представленных в Таблице 2.2 опытных данных. Результаты обработки сведены в таблицы, приведенные в Приложении 3 (состоящем из Таблиц П3.1 - П3.7).

«Таблицы П3.1 - П3.3 Отсев грубых ошибок»,

«Таблицы П3.4 – П3.6. Расчет абсолютной ошибки»

«Таблица П3.7 Итоговая таблица статистической обработки».

В Таблице П3.7 приведен доверительный интервал и окончательный результат, записанный в стандартной форме. По этим результатам была построена Таблица 2.7 и график на Рис.2. 7

Аналогичным образом была выполнена статистическая обработка остальных экспериментальных данных.

Результаты экспериментальных исследований.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных, полученных в ходе исследований, выполненных автором, и предусмотренных программой исследований, представлены в Таблицах №2.7–2.16. На основании этих табличных данных были построены соответствующие графические зависимости, представленные на Рис.2.7 - 2.16.

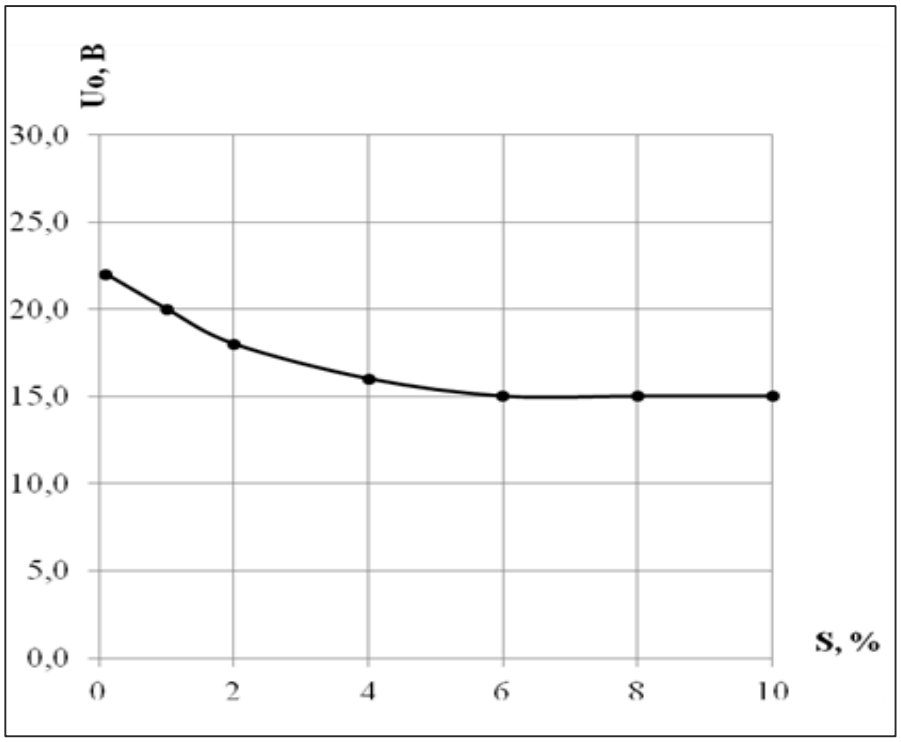


Рис. 2.7 Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от скольжения двигателя (S).

Таблица 2.7. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от скольжения двигателя (S).
Двигатель 4А 80 А2 У3.
$P_н$=1,5 кВт.
Симметричный режим $U_с=U_н$=380В.
S (%) - скольжение.
U_{00} (В) - напряжение нейтрали (ампл. значение).

S (%)	**0,1**	**1,0**	**2,0**	**4,0**	**6,0**	**8,0**	**10,0**
U_{00} (В)	22,0	20,0	18,0	16,0	15,0	15,0	15,0

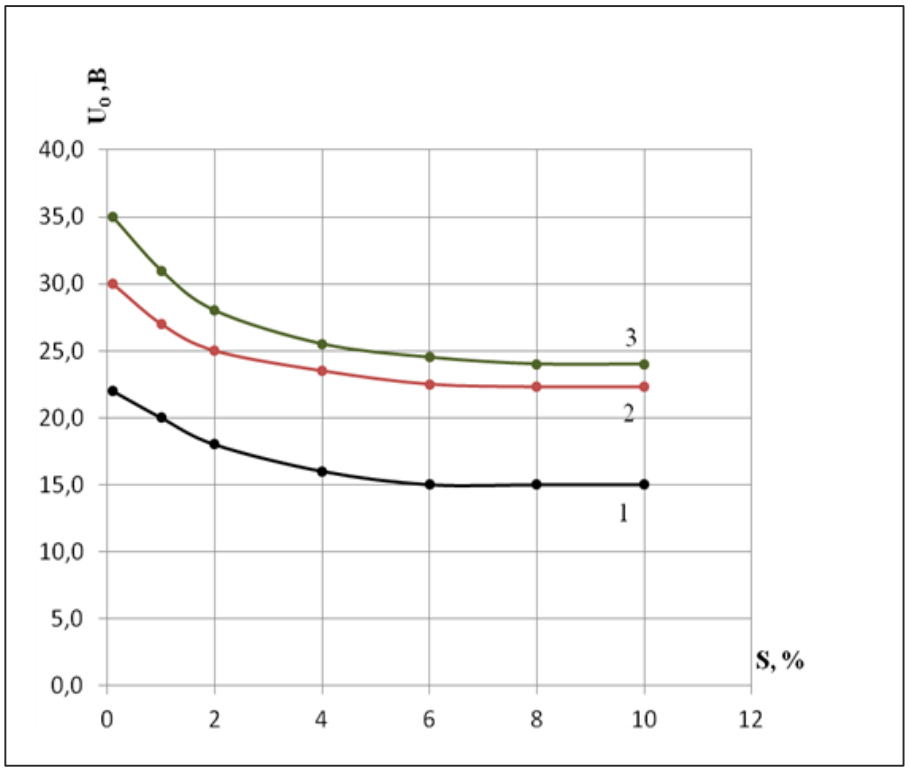


Рис. 2.8. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от скольжения двигателя (S) при различном числе пар полюсов (p).
Линия 1–(при p=1). Линия 2–(при p=2). Линия 3–(при p=3).

Таблица 2.8. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от скольжения двигателя (S).
Двигатели $P_н$=1,5 кВт.
Симметричный режим $U_с=U_н$=380В.
S (%) - скольжение.
U_{00} (В) - напряжение нейтрали (ампл. значение).
p-число пар полюсов.

	S (%)	**0,1**	**1,0**	**2,0**	**4,0**	**6,0**	**8,0**	**10,0**
U_{00} (В) (ампл.)	**p=1**	22,0	20,0	18,0	16,0	15,0	15,0	15,0
	p=2	30,0	27,0	25,0	23,5	22,5	22,3	22,3
	p=3	35,0	31,0	28,0	25,5	24,5	24,0	24,0

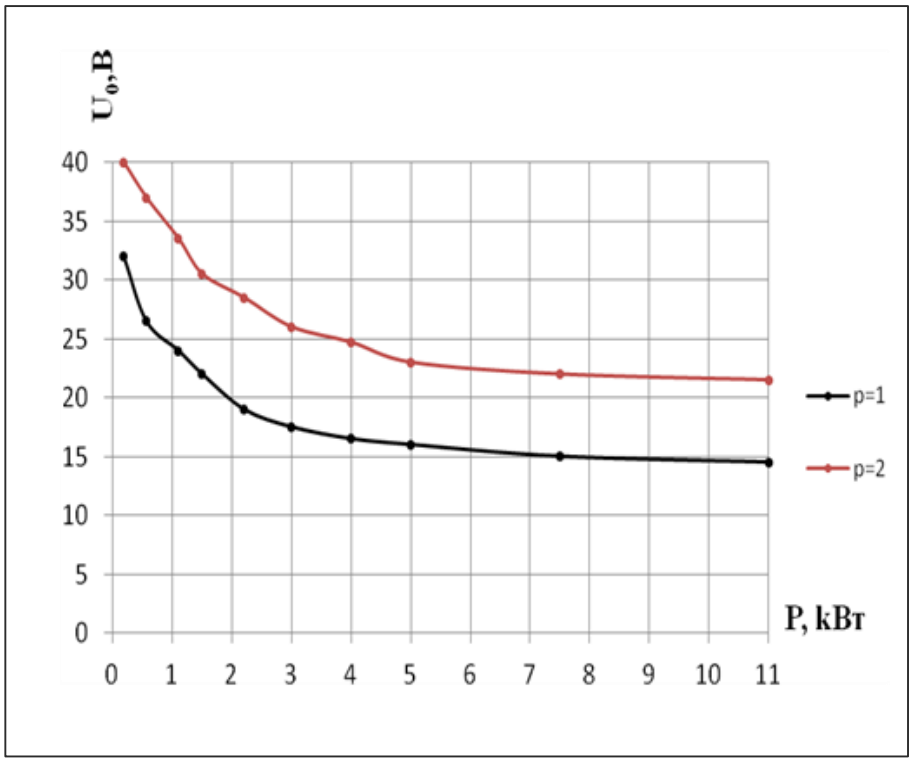


Рис. 2.9. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от мощности двигателя ($P_н$) при различном числе пар полюсов (p).
Линия 1 – (при p=1). Линия 2 – (при p=2).

Таблица 2.9. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от мощности двигателя.
Двигатели 0,18кВт – 11,0 кВт.
Режим ХХ.
Симметричный режим питания $U_с=U_н=380В$.
$P_Н$ (кВт)- номинальная мощность двигателя.
U_{00} (В) - напряжение нейтрали (ампл. значение).
p -число пар полюсов.

	$P_Н$ (кВт)	**0,18**	**0,55**	**1,10**	**1,50**	**2,20**	**3,00**	**4,00**	**5,00**	**7,50**	**11,0**
U_{00} (В) (ампл.)	**p=1**	30,0	26,5	24,0	22,0	19,0	17,5	16,5	16,0	15,0	14,5
	p=2	40,0	37,0	33,5	30,5	28,5	26,0	24,7	23,0	22,0	21,5

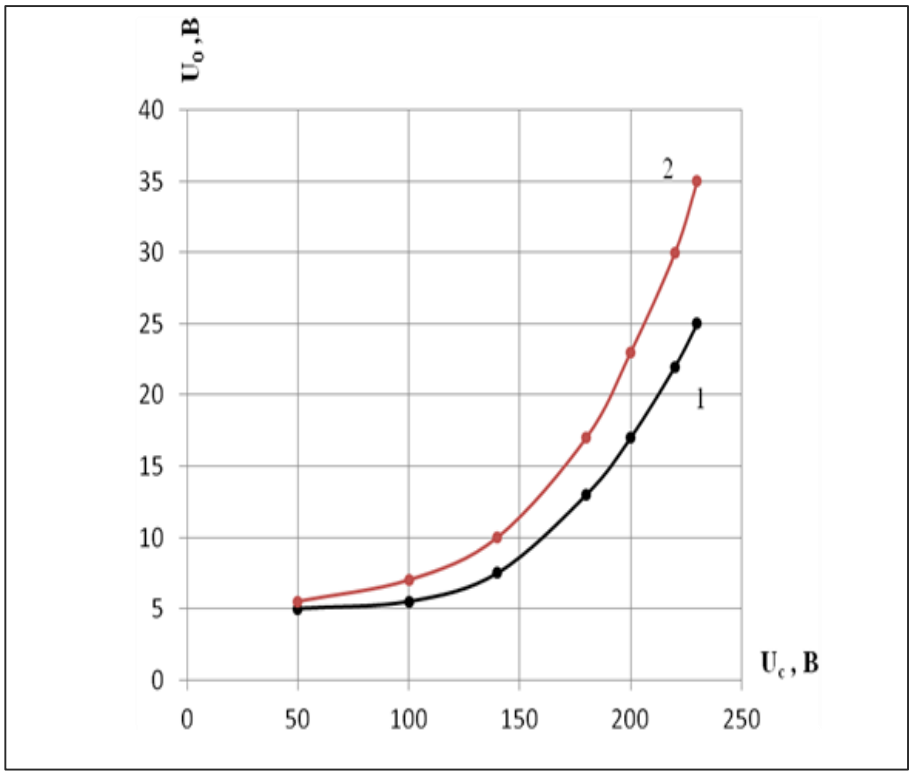


Рис. 2.10. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от напряжения питающей сети (Uc) при различном числе пар полюсов (p).
Линия 1 – (при p=1). Линия 2 – (при p=2).

Таблица 2.10. Зависимость напряжения нейтрали (U_{00}) от напряжения сети (Uc).
Двигатели $P_н$=1,5 кВт.
Режим XX.
Симметричный режим.
U_c (В)-напряжение сети.
U_{00} (В)-напряжение нейтрали (ампл. значение).
p-число полюсов.

	Uc (В)	**50**	**100**	**140**	**180**	**200**	**220**	**230**
U_{00} (В) (ампл.)	**p=1**	5,0	5,5	7,5	13,0	17,0	22,0	25,0
	p=2	5,5	7,0	10,0	17,0	23,0	30,0	35,0

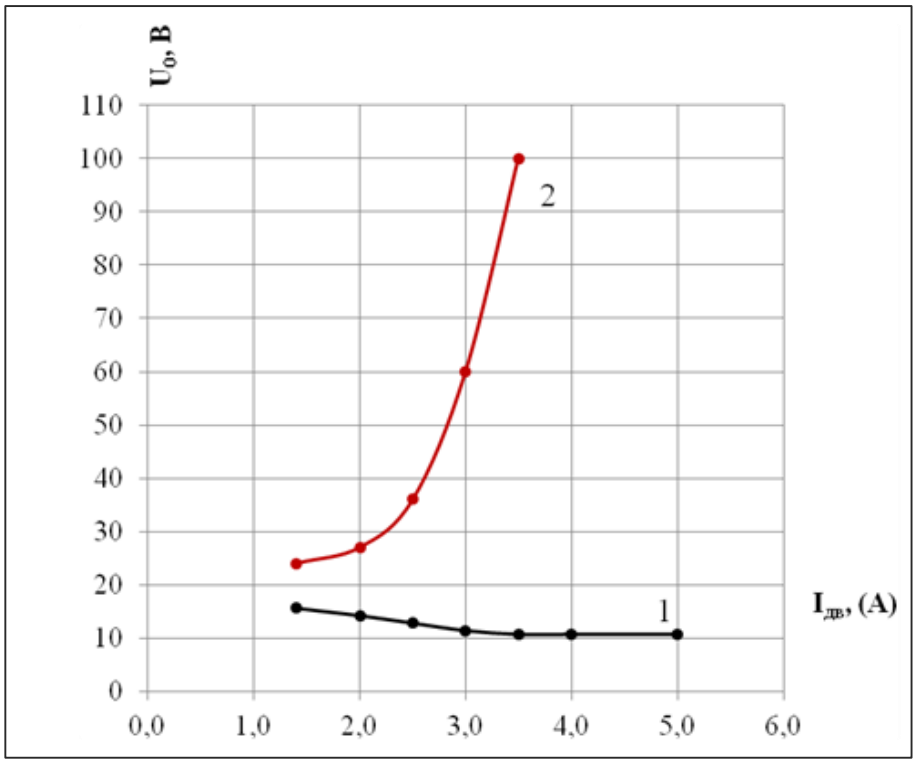


Рис.2.11. Зависимость напряжения (U_{00}) (действующее значение) от степени загрузки двигателя I (А) в симметричном режиме и в режиме обрыва фазы.
Линия 1 - симметричный режим.
Линия 2 - режим обрыва фазы.

Таблица 2.11. Зависимость напряжения (U_{00}) (действующее значение) от степени загрузки двигателя.
Двигатель 4А 80 А2 У3.
$P_н$=1,5 кВт.
Симметричный режим $U_с=U_н$=380В.
S (%) - скольжение.
U_{00} (В) - напряжение нейтрали.

	I (А)		**1,4**	**2,0**	**2,5**	**3,0**	**3,5**	**4,0**	**5,0**
	S (%)		**0,1**	**1,0**	**2,0**	**4,0**	**6,0**	**8,0**	**10,0**
U_{00} (В)	**Симметрич. режим**	**ампл.**	22,0	20,0	18,0	16,0	15,0	15,0	15,0
		дейст.	15,6	14,2	12,8	11,3	10,6	10,6	10,6
	Режим обрыва фаз	**ампл.**	31,0	38,0	50,7	84,6	141,0	-	-
		дейст.	24,0	27,0	36,0	60,0	100,0	-	-

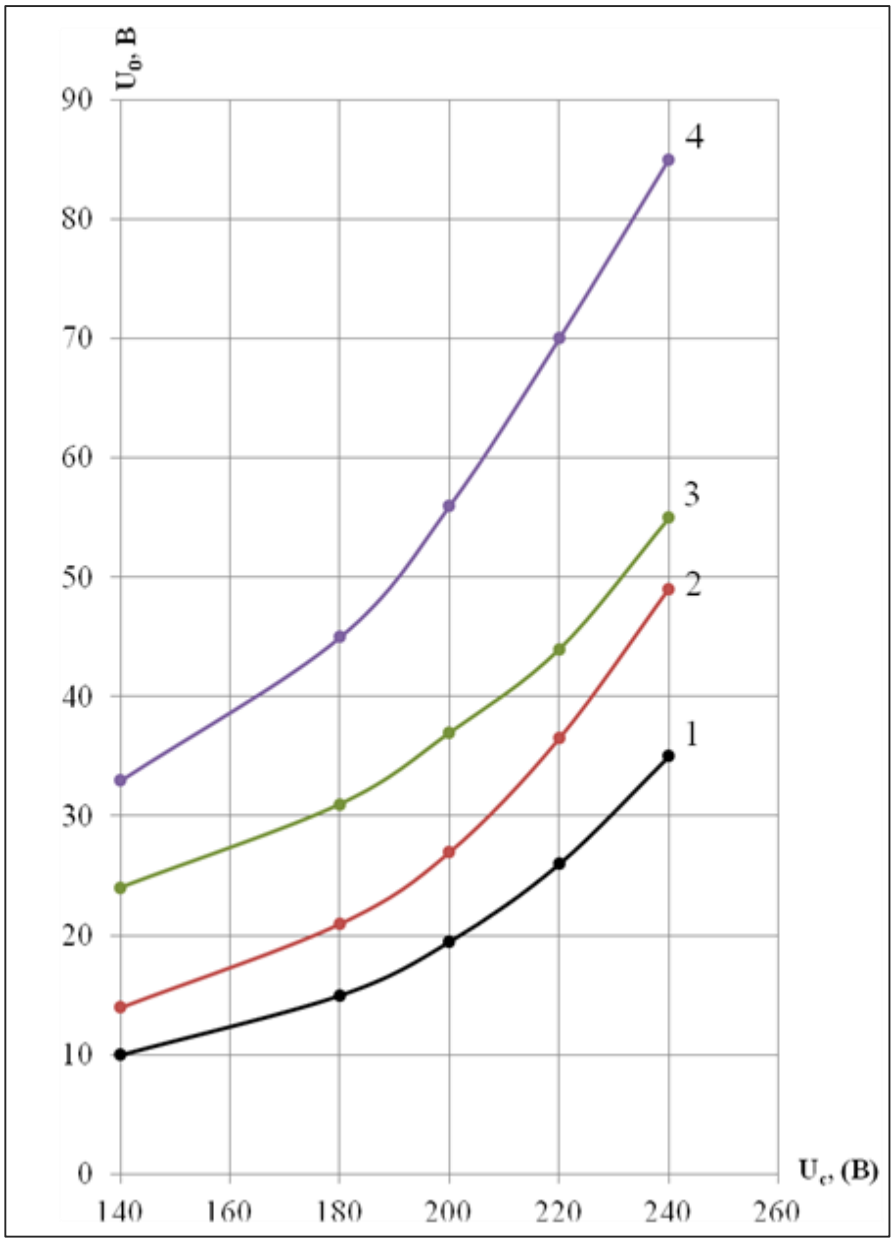


Рис. 2.12 (а,б) Зависимость напряжения (U_{00}) от напряжении питающей сети (U_c) для двигателей 0,55 кВт. при различном числе пар полюсов (р):

(а) Линии 1,2 в режиме холостого хода при симметричном питании. (линия 1при р=1, линия 2 при р=2);

(б) Линии 3,4 в режиме холостого хода и обрыве фаз. (линия 3 при р=1, линия 4 при р=2).

Таблица 2.12 (a). Зависимость напряжения (U_{00}) от напряжения питающей сети (Uc) для двигателей 0,55 кВт при различном числе пар полюсов (p).
Двигатели $P_н$=0,55 кВт.
Симметричный режим питания.
Режим XX
U_c (В)-напряжение сети.
U_{00} (В)-напряжение нейтрали (ампл. значение).
p-число пар полюсов.

	Uc (В)	**140**	**180**	**200**	**220**	**240**
U_{00} (В) (ампл.)	**p=1**	10,0	15,0	19,5	26,0	35,0
	p=2	14,0	21,0	27,0	36,5	49,0

Таблица 2.12 (b). Зависимость напряжения (U_{00}) от напряжения питающей сети (Uc) для двигателей 0,55 кВт. при различном числе пар полюсов (p).
Двигатель $P_н$=0,55 кВт.
Режим обрыва фазы.
U_c (В)-напряжение сети.
U_{00} (В)-напряжение нейтрали (ампл. значение).
p-число пар полюсов.

	Uc (В)	**140**	**180**	**200**	**220**	**240**
U_{00} (В) (ампл.)	**p=1**	24,0	31,0	37,0	43,0	55,0
	p=2	33,0	45,0	56,0	70,0	86,0

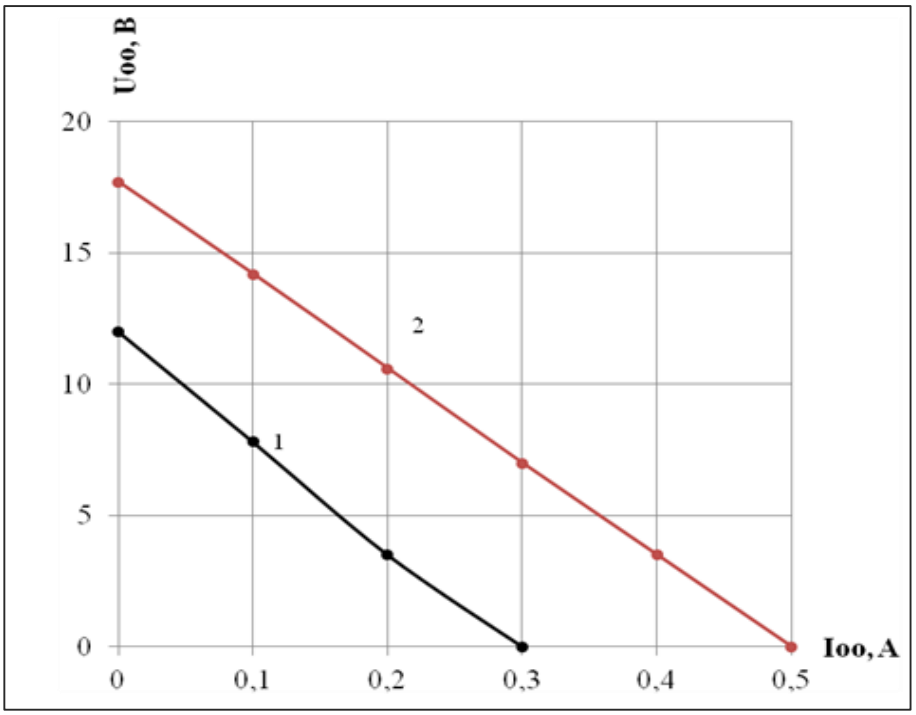


Рис. 2.13. Зависимость напряжения (U_{00}) от тока нагрузки (I_{00}) в цепи нейтрали (00') для двигателя Рн=0,55 кВт, n = 3000 об/мин.
Линия 1 – при номинальной нагрузке, линия 2 – в режиме ХХ.

Таблица 2.13. Зависимость напряжения (U_{00}) от тока нагрузки (I_{00}) в цепи нейтрали.
Двигатель $P_н$=0,55 кВт, n=3000 об./мин.
Симметричный режим.
$U_с=U_н$=380В.
U_{00} (В)-напряжение нейтрали (действующее значение).
I_{00} (А)- ток нагрузки в цепи нейтрали.

	I_{00} (А)	дейст.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
U_{00} (В)	**Режим холостого хода**							
		дейст.	17,7	14,2	10,6	7,0	3,5	0,0
	Режим номинальный							
		дейст.	12,0	7,8	3,5	0,0	0,0	0,0

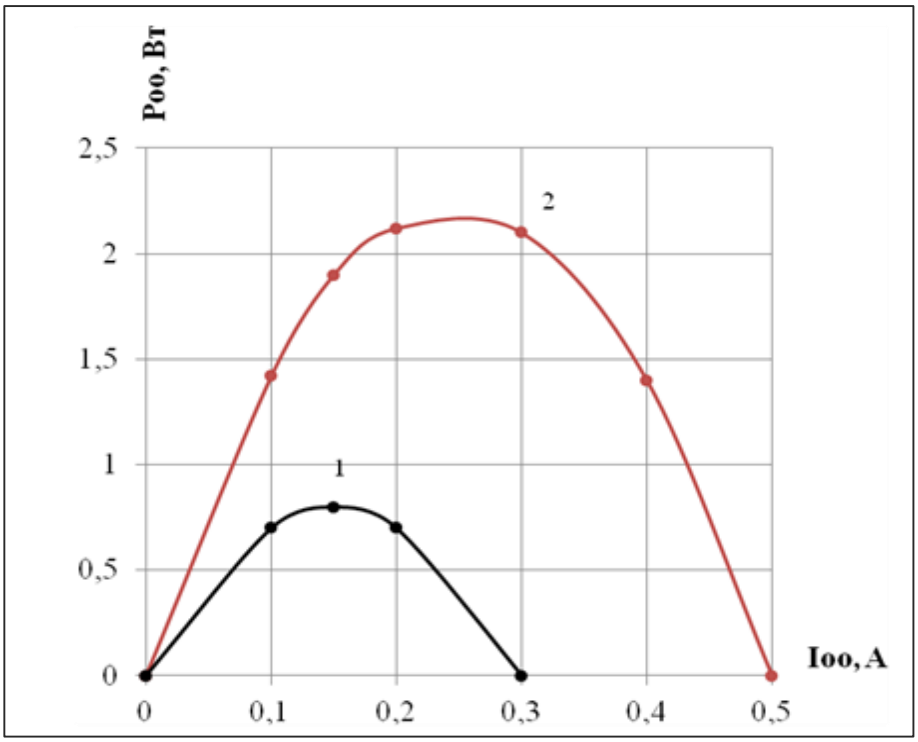


Рис. 2.14 Зависимость мощности (P_{00}) от тока нагрузки в цепи нейтрали (00') для двигателя Рн=0,55 кВт, n = 3000 об/мин.
Линия 1 – при номинальной нагрузке, линия 2 – в режиме ХХ.

Таблица 2.14. Зависимость мощности (P_{00}) от тока нагрузки в цепи нейтрали (00').
Двигатель $P_н$=0,55 кВт, n=3000 об./мин.
Симметричный режим.
$U_с=U_н$=380В.
P_{00} (Вт)-мощность нейтрали в цепи U_{00}.
I_{00} (А) -ток нагрузки в цепи U_{00}.

	I_{00} (А)	**0.0**	**0,1**	**0,15**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**
P_{00} (Вт)	**Режим холостого хода**	0,0	1,4	1,90	2,1	2,1	1,4	0,0
	Режим номинальный	0,0	0,7	0,80	0,7	0,0	0,0	0,0

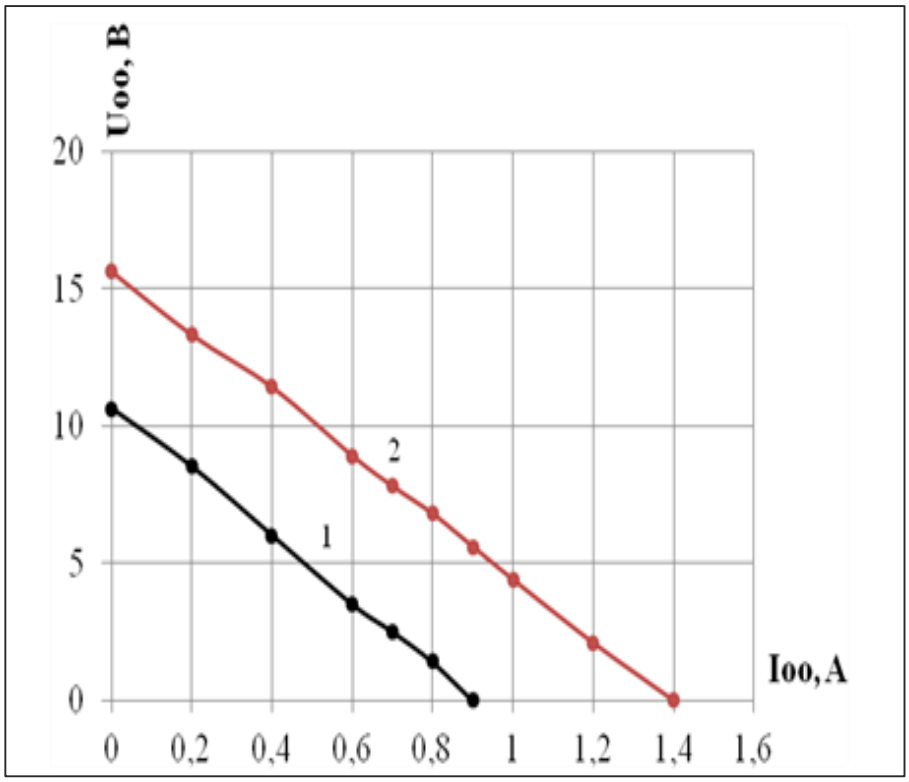


Рис. 2.15. Зависимость напряжения (U_{00}) от тока нагрузки (I_{00}) в цепи нейтрали (00')
для двигателя P=1.5 кВт, n = 3000 об/мин.
Линия 1 – при номинальной нагрузке, линия 2 – в режиме XX.

Таблица 2.15. Зависимость напряжения (U_{00}) от тока нагрузки (I_{00}) в цепи нейтрали (00').
Двигатель $P_н$=1,5 кВт, n=3000 об./мин.
Симметричный режим.
$U_с=U_н$=380В.
U_{00} (В)- напряжение нейтрали.
I_2 (А) -ток нагрузки в цепи нейтрали U_{00}.

	I00 (A)		**0,0**	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1,0**	**1,2**	**1,4**
U_{00} (B)	**Режим XX**	**ампл.**										
		дейст.	15,6	13,3	11,4	8,9	7,8	6,8	5,6	4,4	2,1	0,0
	Режим номинальный	**ампл.**										
		дейст.	10,6	8,5	6,0	3,5	2,5	1,4	0,0	10,6		

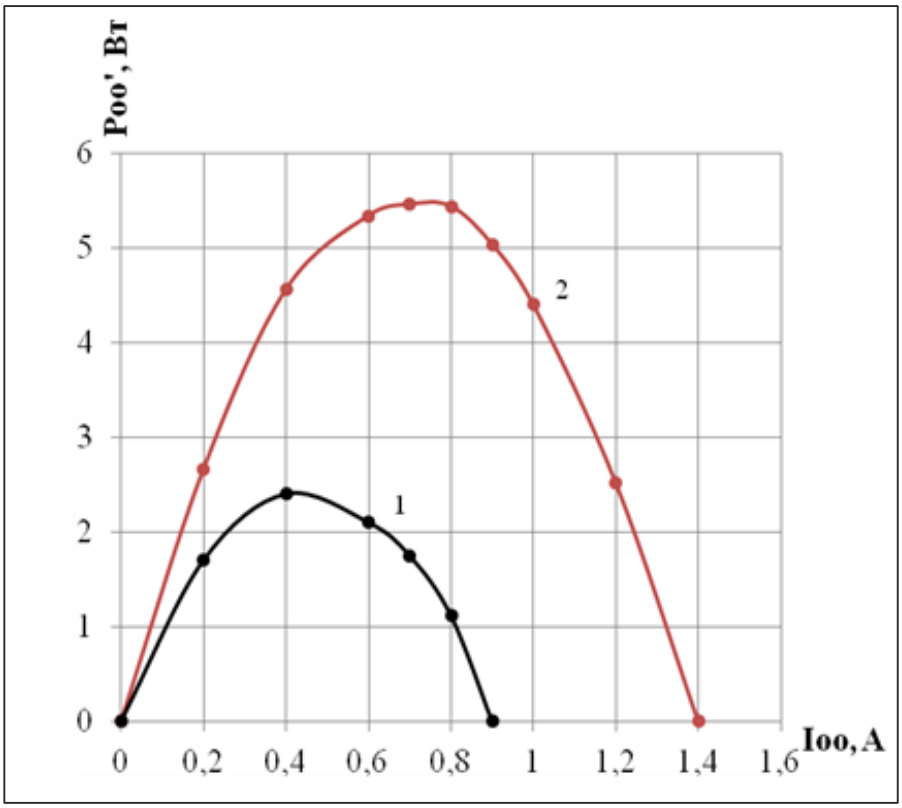


Рис.2.16. Зависимость мощности P_{00} от тока нагрузки в цепи нейтрали (I_{00}) для двигателя P=1,50 кВт, n = 3000 об/мин.
Линия 1 – при номинальной нагрузке, линия 2 – в режиме XX.

Таблица 2.16. Зависимость мощности P_{00} от тока нагрузки в цепи нейтрали (I_{00}).
Двигатель $P_н$=1,5 кВт, n=3000 об./мин.
Симметричный режим.
$U_с=U_н$=380В.
I_{00} (А) -ток нагрузки в цепи нейтрали.

I_{00} (А)		**0,0**	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1,0**	**1,2**	**1,4**
P_{00}` (Вт)	**Режим XX**	0,0	2,7	4,6	5,3	5,5	5,4	5,0	4,4	2,5	0,0
	Режим номинальный	0,0	1,7	2,4	2,1	1,8	1,1	0,0	0,0	0.0	0.0

2.4 Выводы по второй главе.

❖ Выполненные расчёты и проведенные экспериментальные исследования подтвердили гипотезу о том, что в работающем трёхфазном асинхронном короткозамкнутом двигателе последних серий даже при абсолютно симметричном режиме питания в нулевом проводе двигателя генерируется синусоидальное по форме напряжение утроенной частоты (f=150 Гц) природа которого – магнитное насыщение стали двигателя.

❖ Разработана специализированная математическая модель асинхронного двигателя, учитывающая насыщение его магнитной системы. Модель дала возможность получить реальную картину распределения магнитных потоков в статоре двигателя и рассчитать необходимые параметры асинхронного двигателя, в том числе значение напряжения высших гармоник в нулевом проводе, в различных режимах работы. Экспериментальные исследования показали, что расчеты, выполненные с применением предложенной математической модели адекватны с результатами экспериментальных исследований с относительной погрешностью не более 5 -7%.

❖ Анализ результатов, проведённых экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- Абсолютная величина напряжения третьей гармоники в нулевом проводе зависит от ряда факторов: мощности двигателя, числа пар полюсов, скольжения двигателя, величины питающего напряжения и полностью определяется степенью насыщения магнитной системы двигателя.
- Максимальное значение этого напряжения, соответствует режиму холостого хода двигателя (Рис.2.7). При увеличении скольжения от нуля (S_o) до номинального значения ($S_{ном}$) величина указанного напряжения несколько уменьшается из-за размагничивающего действия тока ротора. Дальнейшее увеличение скольжения (величины нагрузки) практически не приводит к изменению напряжения третьей гармоники и при S=1 и оно достигает значения примерно 70% от соответствующего значения в режиме холостого хода.
- С увеличением напряжения питающей сети напряжение третьей гармоники резко возрастает (Рис.2.10), что объясняется резким увеличением магнитного насыщения стали двигателя.
- С ростом мощности и с уменьшением числа пар полюсов напряжение третьей гармоники уменьшается (Рис. 2.8-2.9).

- Система О-О' для двигателей любого типа и мощности (начиная с 0,18 кВт) обладает достаточной мощностью и величиной напряжения ($U_{oo'}$) для обеспечения работы элементов схемы защитного устройства, потребляющих ток до 10 мА (Рис.2.13 - 2.16).
- Сравнительные исследования характеристик электродвигателей предыдущих серий АО и АО2 показали, что общие закономерности изменения параметров системы О-О' для этих двигателей такие же как и для двигателей последних серий, но числееное значение напряжения высших гармоник на 55-60% меньше, чем для двигателей серий 4А или 5А, что объясняется не насыщенностью магнитрой системы двигателей серий АО, АО2 и АО2 СХ.

❖ Результаты проведенных исследования дают возможность выполнить правильную настройку устройств защиты, в которых в качестве диагностического сигнала используется напряжение между нейтральными точками сети и двигателя и, следовательно, добиться их надежного срабатывания. Исключить ложные срабатывания при этом возможно, так как даже в самом неблагоприятном для этого режиме, в режиме холостого хода, имеет место существенная разница по величине между напряжением ($U_{oo'}$) в симметричном режиме и напряжением ($U_{oo'}$) в неполнофазном режиме (Рис.2.11-2.12). Для двигателей с номинальной мощностью от 0,55 кВт до 11,0 кВт эта разница составляет 9 – 24 вольт.

3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТРЁХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ АВАРИЙНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ И ОБРЫВА ФАЗ

3.1 Разработка и исследования измерительного преобразователя тока как источника сигнала аварийной перегрузки асинхронного электродвигателя.

Принцип работы измерительного преобразователя - датчика тока.

В Главе 1, п.1.3 отмечалось, что защита электродвигателя от опасной перегрузки может быть осуществлена путём контроля величины либо тока нагрузки, либо температуры статорной обмотки, либо их сочетания. В предлагаемой схеме защитного устройства выбран токовый способ контроля степени нагрузки двигателя как наиболее простой и вместе с тем достаточно эффективный.

Как следует из теории электрических машин [116] режим перегрузки асинхронного электродвигателя обязательно сопровождается увеличением тока в статорной обмотке, поэтому простейшим датчиком перегрузки может служить измерительный преобразователь тока - датчик тока [15], имеющий первичную (входную) токовую обмотку и вторичную (выходную) обмотку напряжения, намотанные изолированными проводами на общем сердечнике. Увеличение тока в первичной обмотке такого датчика приводит к увеличению напряжения во вторичной обмотке. При этом обязательным условием правильной работы защитного устройства с таким датчиком является наличие прямо пропорциональной зависимости между величинами первичного тока и вторичного напряжения. Учитывая тот факт, что нагрузка трехфазного асинхронного двигателя является одинаковой для каждой фазы двигателя контроль величины токовой перегрузки, может быть осуществлен лишь в одной из них.

Требования к разрабатываемому датчику тока.

Исходя из выше изложенного, датчик тока, как измерительный преобразователь обеспечивающий работу канала контроля перегрузки асинхронного двигателя, должен отвечать ряду определённых требований [26,134]:

1. Наличие прямо пропорциональной зависимости между величинами первичного тока в статорной цепи двигателя (I_1) и величиной выходного напряжения вторичной обмотки (U_2) в заданном диапазоне рабочих токов асинхронного двигателя.
2. Синусоидальность по форме кривой вторичного напряжения.
3. Достаточная жесткость нагрузочной характеристики датчика ($U_2=f(I_2)$), необходимая для обеспечения постоянства вторичного напряжения при фиксированном значении

первичного тока (I_1) и изменении величины нагрузки тока $I_{(2)}$) во вторичной обмотке датчика тока.

4. Небольшие габариты. Простота монтажа.

Учитывая большой ассортимент выпускаемых промышленностью датчиков тока, было высказано предположение о том, что все выпускаемые датчики тока предназначены для конкретных технических устройств с конкретной установленной мощностью. Поэтому для разрабатываемого универсального защитного устройства, рассчитанного на целый диапазон мощностей двигателей, они не подойдут. Необходимы соответствующие проверочные исследования и конструктивные доработки таких датчиков.

С учетом этого было рассмотрено несколько выпускаемых промышленностью датчиков тока для различных устройств и агрегатов, применяемых в различных технологических процессах [32]. Предварительные исследования показали, что наиболее подходящим из них, для разрабатываемого защитного устройства, является датчик тока, используемый в стациях управления погружными электронасосами типа ШЭТ 5801-0362Г-У2.

Экспериментальные исследования датчиков тока.

Объект и цели исследования.

Объект исследования - измерительный преобразователь тока (датчик тока DT) в стациях управления погружными электронасосами типа ШЭТ 5801-0362Г-У2.

Цель исследований - изучение пригодности исследуемых датчиков для использования в предлагаемом защитном устройстве.

Программа исследований.

В ходе исследований определялись внешние и внутренние характеристики указанного заводского датчика, а также внешние и внутренние характеристики датчика после его реконструкции. В программу исследований было включено:

1. Серия внешних характеристик $U_2 = f(I_1)$. (зависимость выходного напряжения (U_2) вторичной обмотки от величины тока I_1 (I_1=1÷20 А) в первичной обмотке при различном числе витков (W_1=1, 5, 10, 15) в первичные обмотки).
2. Серия внутренних характеристик $U_2 = f(I_2)$. (зависимость выходного напряжения (U_2) вторичной обмотки с числом витков W_2=800 от величины нагрузочного тока во вторичной обмотке (I_2=0.0 μА ÷160.0 μА) при различном числе витков (W1) первичной обмотки (W1=1, 5, 10, 15) и различной величине первичного тока I_1 (I_1=1,0 А÷20,0 А) в первичной обмотке).

Методика исследований.

Для выполнения программы исследований была собрана лабораторная установка, представленная на Рис.3.1. Установка состоит из исследуемого датчика тока DT (1), источника однофазного питания типа ЛАТР 250/10 (2) и комплекта подключаемых измерительных приборов.

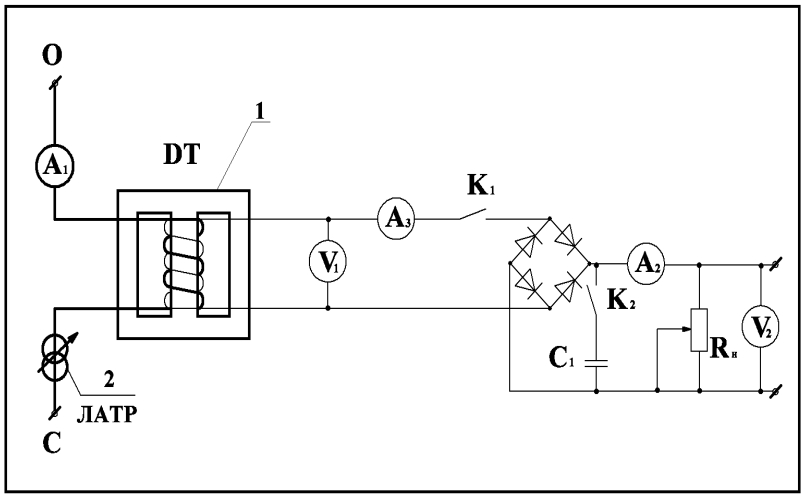


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки для снятия характеристик датчика тока DT.

Список комплекта измерительных приборов, используемых для выполнения программы экспериментальных исследований датчиков тока DT:

1. Однофазный лабораторный автотрансформатор типа ЛАТР 250/10.
2. Реостат ползунковый лабораторный типа РСП4-3.
3. Реостат ползунковый лабораторный типа РСП4-5.
4. Реостат ползунковый лабораторный типа РСП4-21.
5. Вольтметры лабораторные электромагнитной системы типа Э543, Э544.
6. Вольтметры лабораторные электродинамической системы типа Д5102, Д5103.
7. Амперметр лабораторный типа Д533.
8. Мили амперметр лабораторный электромагнитной системы типа Э513/3, Э513/4.
9. Осциллограф аналоговый однолучевой С1-73.

1. Для получения внешних характеристик $U_2 = f(I_1)$ производились изменения напряжение питания датчика с помощью лабораторного автотрансформатора типа ЛАТР 250/10, или с помощью ползункового реостата типа РСП4-21 при этом изменялся ток I_1 в первичной обмотке датчика. Ток в первичной обмотке датчика измерялся лабораторным

амперметром типа Д553. включенным в цепь первичной обмотки датчика. Вторичная обмотка датчика была замкнута на потенциометр типа РСП4-3 с R_2=16кОм, что практически соответствует режиму холостого хода датчика. Измерение напряжения U_2. производилось лабораторными вольтметрами типа Э543, Э544. Опыт повторялся при каждом изменения числа витков первичной обмотки.

2. Для получения внутренних характеристик U_2=f (I_2) вторичная обмотка датчика замыкалась на сопротивление реостатного типа РСП4-5 с сопротивлением R_2=800 Ом. При фиксированном числе витков в первичной обмотке (W1) и фиксированном первичном токе (I1) величина сопротивления РСП4-5 изменялось от максимального значения - (режим ХХ) до минимального - (режим КЗ). Ток во вторичной обмотке измерялся мили амперметрами типа Э513/3, Э513/4. Лабораторным вольтметром типа Э543 или Э544, включенным во вторичную обмотку датчика, производилось измерение напряжения U_2. После каждого изменения числа витков и тока в первичной обмотке опыт повторялся. По каждому эксперименту опыты проводился не менее пяти раз. Полученные опытные данные заносились в таблицы.
3. В соответствии с указанной программой исследований были проведены эксперименты и полученные результаты представлены в таблицах 3.2 – 3.7 и на графиках 3.2– 3.7.

Статистическая обработка экспериментальных данных.

В таблице 3.1 представлены полученные автором экспериментальным путём данные DT (до статистической обработки) зависимости вторичного напряжения U2 от первичного тока I1 при числе витков первичной обмотки W1=1 (внешняя характеристика заводского датчика тока, представленная на графике Рис.3.2). Для построения указанной графической зависимости были сняты девять точек. Опытные данные по каждой точке повторялись не менее пяти раз.

Таблица 3.1. Экспериментальные данные заводского датчика тока DT.

Зависимость вторичного напряжения (U2) от первичного тока (I1) при W=1.

(данные до статистической обработки).

№ опыта	**№ точки I_1, А**	**0 0,0**	**1 2,0**	**2 4,0**	**3 4,0**	**4 6,0**	**5 8,0**	**6 10,0**	**7 12,0**	**8 14,0**	**9 18,0**
1	**U2, В**	0,0	2,5	5,0	7,5	9,6	11,5	13,0	14,1	14,1	14,7
2	**U2, В**	0,0	2,4	4,6	7,4	9,5	11,3	13,2	14,6	14,6	14,9
3	**U2, В**	0,0	2,7	4,9	6,9	9,8	11,4	12,8	13,8	13,8	15,0
4	**U2, В**	0,0	2,3	5,2	7,6	9,3	11,6	12,7	14,3	14,3	15,1
5	**U2, В**	0,0	2,6	5,1	7,6	9,5	11,6	13,3	13,9	13,9	15,3

В соответствии с указанной методикой и алгоритмом, была выполнена статистическая обработка опытных данных. Результаты обработки сведены в таблицы, представленные в Приложении 4 (состоящем из в Таблиц П4.1 – П4.9).

Таблица П4.1 – П4.4 «Отсев грубых ошибок».

Таблица П4.5 – П4.8 «Расчет абсолютной ошибки».

Таблица П4.9 «Итоговая таблица статистической обработки».

В Таблице П4.9 «Итоговая таблица статистической обработки» приведен расчёт доверительного интервала и представлен окончательный результат, записанный в стандартной форме. По полученным результатам была составлена Таблица 3.2 и построен график на Рис. 3.2.

Аналогичным образом была выполнена статистическая обработка остальных экспериментальных данных по исследованию датчика тока. По результатам статистической обработки этих данных были построены графические зависимости, представленные в разделе «Результаты экспериментальных исследований первичных преобразователей – датчиков тока».

Результаты экспериментальных исследований первичных преобразователей - датчиков тока.

Исследования проводились для типового заводского датчика тока применяемого в стациях управления погружными электронасосами типа ШЭТ 5801-0362Г-У2, и такого же, но реконструированного датчика тока. Для этого в заводском датчике в среднем сердечнике Ш–образного магнитопровода был выполнен воздушный зазор δ=0,1мм.

После статистической обработки результаты экспериментальных исследований представлены в Таблицах (3.2-3.7) и в виде графиков на Рис. (3.2-3.7).

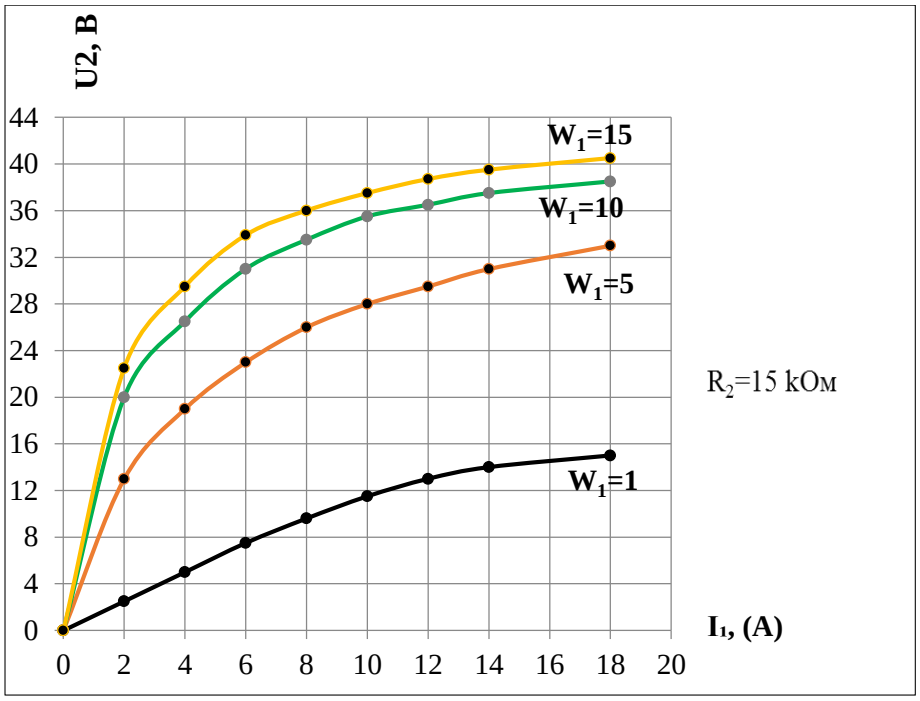


Рис. 3.2 Внешняя характеристика заводского датчика №1. Зависимость U_2 от тока I_1 при различном числе витков W1 в первичной обмотке (данные из таблицы №3.2).

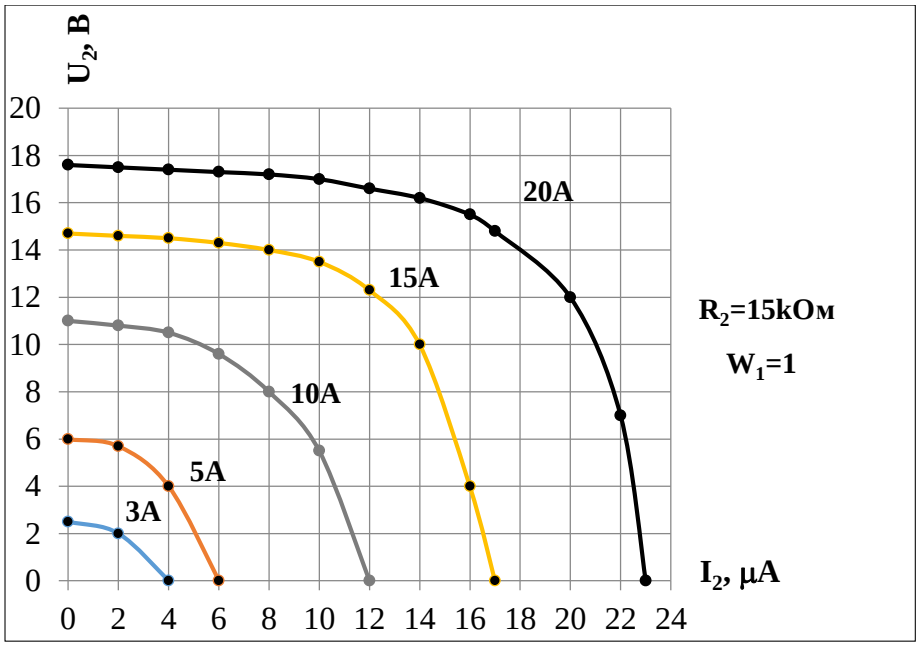


Рис. 3.3 Внутренняя характеристика заводского датчика №1. Зависимость U_2 от тока I_2 при различном значении тока I_1 в первичной обмотке и при W1=1 (данные из таблицы №3.3).

Таблица 3.2. Внешняя характеристика датчика №1.

Зависимость U_2 от тока I1 при различном числе витков W1 в первичной обмотке.

W - число витков первичной обмотки датчика,

I1 - ток в первичной обмотке датчика,

R_2 = 15,0 кОм.

I_1 (A)		0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0
U_2, (B) (действ.)	W1=1	2,5	5,0	7,5	9,6	11,5	13,0	14,0		15,0	15.5	
	W1=5	13,0	19,0	23,0	26,0	28,0	29,5	31,0		33,0	33.6	
	W1=10	20,0	26,5	31,0	33,5	35,5	36,5	37,5		38,5	39.0	
	W1=15	22,5	29,5	33,9	36,0	37,5	38,7	39,5		40,5	41.0	

Таблица 3.3 Внутренняя характеристика датчика №1.

Зависимость U_2 от тока I2 при различном значении тока I_1 в первичной обмотке при W1=1.

W=1 - число витков первичной обмотки датчика,

I1 - ток в первичной обмотке датчика,

R_2 = 15,0 кОм.

I_2 (□A)		0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	17,0	20,0	22,0	23,0
U_2, (B) (действ.)	I_1=3,0 (A)	2,5	2,0	0,0										
	I_1=5,0 (A)	6,0	5,7	4,0	0,0									
	I_1=10 (A)	11,0	10,8	10,5	9,6	8,0	5,5	0,0						
	I_1=15 (A)	14,7	14,6	14,5	14,3	14,0	13,5	12,3	10,0	4,0	0,0			
	I_1=20 (A)	17,6	17,5	17,4	17,3	17,2	17,0	16,6	16,2	15,5	14,8	12,0	7,0	0,0

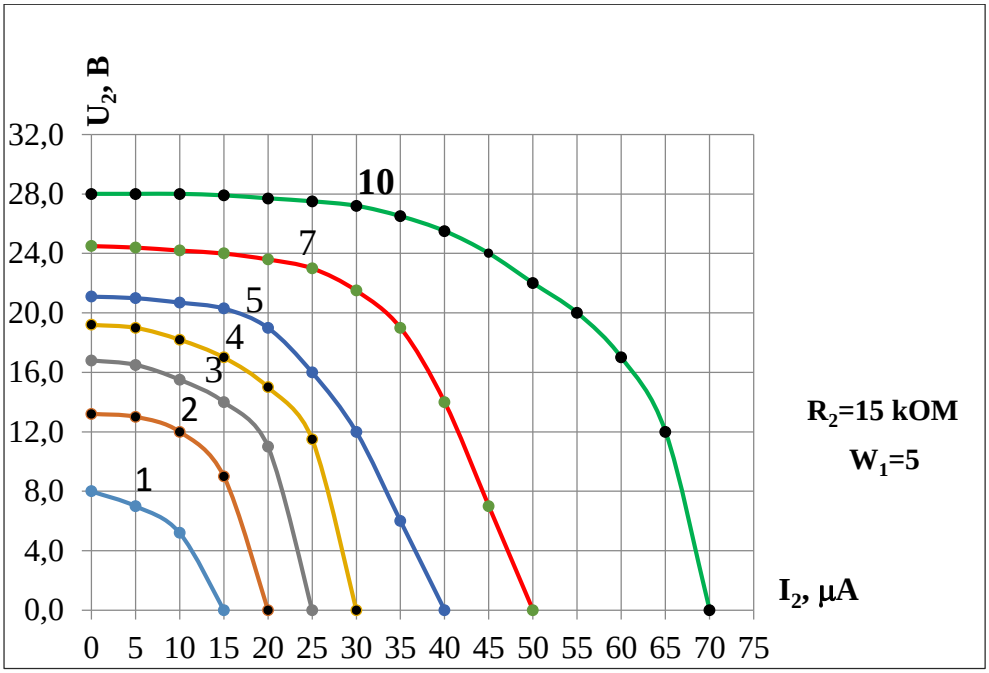


Рис. 3.4 Внутренняя характеристика заводского датчика №1. Зависимость U_2 от тока I2 при различном значении тока I_1 в первичной обмотке и при W1=5. (данные из таблицы №3.4)

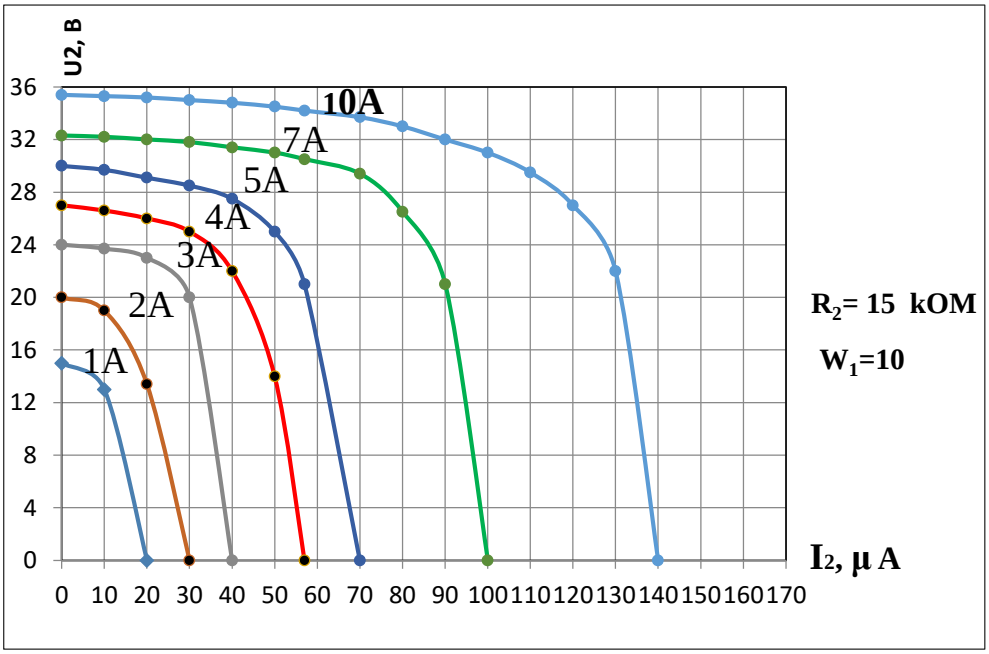


Рис. 3.5 Внутренняя характеристика заводского датчика №1. Зависимость U_2 от тока I2 при различном значении тока I_1 в первичной обмотке и при W1=10 (данные из таблицы №3.5).

Таблица 3.4. Внутренняя характеристика датчика №1.

W=5 - число витков первичной обмотки датчика,

I1 - ток в первичной обмотке датчика,

R_2 = 15,0 кОм.

I_2 (□A)		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U_2, (В) (действ.)	**I_1=1 (А)**	8,0	7,0	5,2	0,0											
	I_1=2 (А)	13,2	13,0	12,0	9,0	0,0										
	I_1=3 (А)	16,8	16,5	15,5	14,0	11,0	0,0									
	I_1=4 (А)	19,2	19,0	18,2	17,0	15,0	11,5	0,0								
	I_1=5 (А)	21,1	21,0	20,7	20,3	19,0	16,0	12,0	6,0	0,0						
	I_1=7 (А)	24,5	24,4	24,2	24,0	23,6	23,0	21,5	19,0	14,0	7,0	0,0				
	I_1=10 (А)	28,0	28,0	28,0	27,9	27,7	27,5	27,2	26,5	25,5	24,0	22,0	20,0	17,0	12,0	0,0

Таблица 3.5. Внутренняя характеристика датчика №1.

W=10 - витки первичной обмотки датчика,

I1 - ток в первичной обмотке датчика,

R_2 = 15,0 кОм.

I_2 (□A)		0	10	20	30	40	50	57	70	80	90	100	110	120	130	140
U_2, (В) (действ.)	**I_1=1 (А)**	15,0	13,0	0,0												
	I_1=2 (А)	20,0	19,0	13,4	0,0											
	I_1=3 (А)	24,0	23,7	23,0	20,0	0,0										
	I_1=4 (А)	27,0	26,6	26,0	25,0	22,0	14,0	0,0								
	I_1=5 (А)	30,0	29,7	29,1	28,5	27,5	25,0	21,0	0,0							
	I_1=7 (А)	32,3	32,2	32,0	31,8	31,4	31,0	30,5	29,4	26,5	21,0	0,0				
	I_1=10 (А)	35,4	35,3	35,2	35,0	34,8	34,5	34,2	33,7	33,0	32,0	31,0	29,5	27,0	22,0	0,0

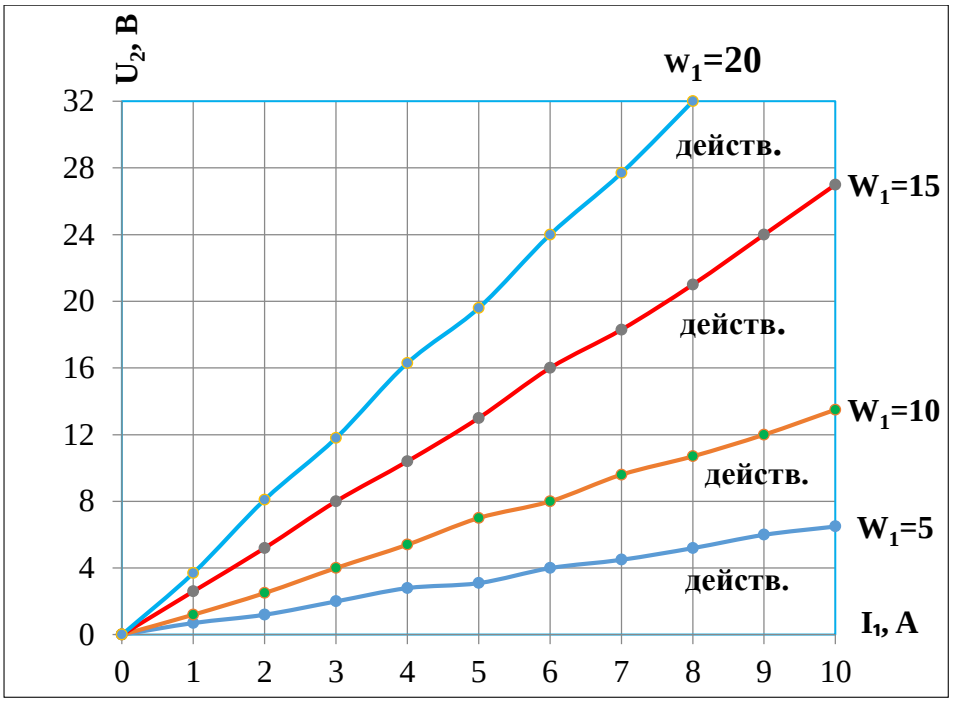


Рис. 3.6 Внешняя характеристика реконструированного датчика №2. Зависимость U_2 от тока I1 при различном числе витков W1 в первичной обмотке (данные из таблицы №3.6).

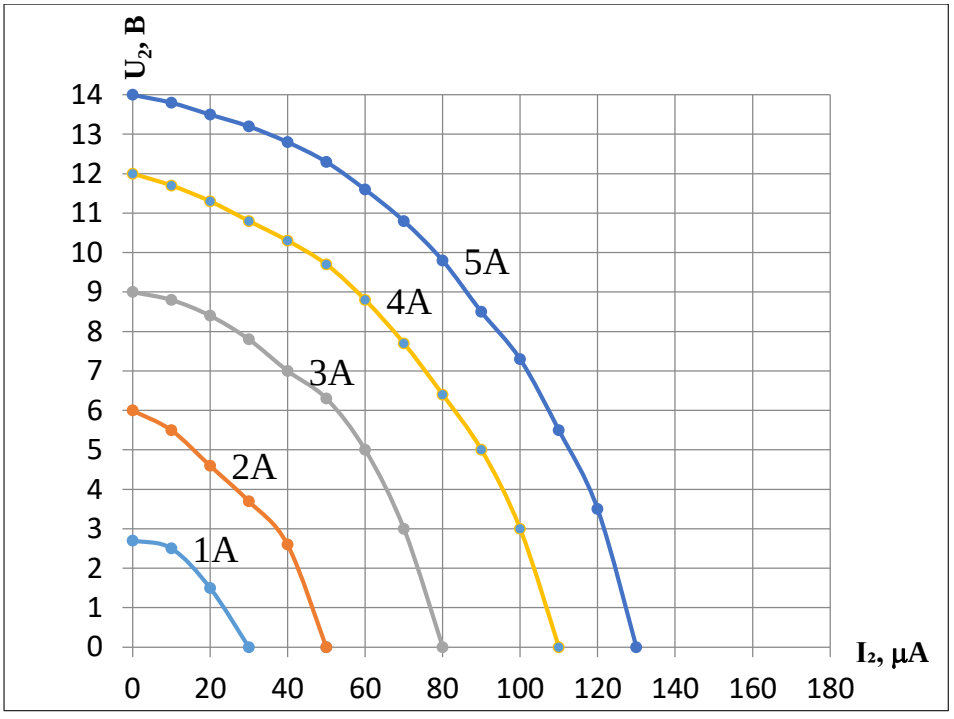


Рис. 3.7 Внутренняя характеристика реконструированного датчика №2. Зависимость U_2 от тока I2 при различном значении тока I_1 в первичной обмотке при W=15 (данные из таблицы №3.7).

Таблица 3.6. Внешняя характеристика датчика №2 (после реконструкции).

W1 - число витков первичной обмотки датчика,

W2=800 - число витков вторичной обмотки датчика,

I_1 - ток в первичной обмотке датчика,

R_2 = 15,0 кОм.

I_1 (А)		0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
U_2, (В) (действ.)	**W1=5**	0,0	0,7	1,2	2,0	2,6	3,1	4,0	4,5	5,2	6,0	6,5
	W1=10	0,0	1,2	2,5	4,0	5,4	7,0	8,0	9,6	10,7	12,0	13,5
	W1=15	0,0	2,6	5,2	8,0	10,7	13,8	16,5	19,0	21,5	24,6	27,6
	W1=20	0,0	4,1	8,2	11,9	16,2	19,8	24,3	27,7	31,8		

Таблица 3.7. Внутренняя характеристика датчика №2 (после реконструкции).

W1=15 - число витков первичной обмотки датчика,

W2=800 - число витков вторичной обмотки датчика,

I_1 - ток в первичной обмотке датчика,

R_2 = 5,7 кОм.

I_2 (μА)		0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0	120,0	130,0
U_2,(В) (действ.)	**I1=1(А)**	2,7	2,5	1,5	25/0										
	I1=2(А)	6,0	5,5	4,7	3,8	2,5	0,0								
	I1=3(А)	9,0	8,8	8,4	7,8	7,2	6,3	5,0	3,0	0,0					
	I1=4(А)	12,0	11,7	11,3	10,8	10,3	9,7	8,8	7,7	6,4	5,0	3,0	0,0		
	I1=5(А)	14,0	13,8	13,5	13,2	12,8	12,3	11,6	10,8	9,8	8,7	7,3	5,5	3,5	0,0

Выводы по исследуемым датчикам тока.

По исследуемому заводскому датчику №1 можно сделать следующие выводы:

1. Кривая вторичного напряжения заводского датчика №1 из-за быстрого насыщения его магнитной системы резко несинусоидальная в требуемом диапазоне значений первичного тока (1,0 А ÷ 20,0 А).
2. Пропорциональная зависимость между значениями первичного тока I_1 и вторичного напряжения U_2 сохраняется лишь до не больших значений первичного тока $I_1 < 2А$, тогда как требуемый диапазон изменения первичного тока значительно больше (I_1=1,0 А÷20,0 А). Рис.3.2.
3. Датчик тока в том виде как он используется в станции ШЭТ 5801-0362Г-У2 применить в предлагаемом защитном устройстве невозможно. Для обеспечения необходимых параметров датчик тока следует конструктивно доработать.

С целью получения требуемых характеристик в среднем стержне датчика тока станции ШЭТ 5801-0362Г-У2 был выполнен конструктивный воздушный зазор δ =0,1мм, без изменения вторичной обмотки и размеров сердечника. Наличие воздушного зазора, как дополнительного магнитного сопротивления R_M не зависящего от величины магнитного потока, привело к значительному снижению магнитного потока в магнитопроводе, а это в свою очередь, к работе всей магнитной системы в насыщенном режиме.

По результатам исследований конструктивно измененного датчика №2 тока можно сделать следующие выводы:

1. Внешняя $U_2=f(I_1)$ и внутренняя $U_2=f(I_2)$ характеристики конструктивно измененного датчика тока №2, имея синусоидальную форму кривой напряжения, отвечают предъявляемым требованиям.
2. Вторичное напряжение датчика №2 (U_2) обеспечивает прямо пропорциональную зависимость между первичным током и вторичным напряжением на всём диапазоне изменения вторичного тока (I_1=1,0А ÷ 20,0 А). (Рис.3.6).
3. Конструктивно измененный датчик тока обеспечивает требуемую минимальную величину вторичного напряжения ($U_2 \geq 3,5В$) датчика даже для самого маломощного двигателя ($P_н$=0,55 кВт). (Рис.3.7).
4. Максимальная токовая нагрузка (в пределах I_2=10 мА) во вторичной цепи конструктивно измененного датчика не влияет на величину его вторичного напряжения и, следовательно, на работу защитного устройства в целом (Рис.3.7). Т.е. мощность конструктивно измененного датчика достаточна для

обеспечения устойчивого сигнала, подаваемого на схему во всех режимах работы исследуемых асинхронных электродвигателей.

5. Разработан и исследован датчик тока как источник диагностического сигнала аварийной перегрузки асинхронных электрических двигателей с необходимыми параметрами. Определены оптимальные конструктивные параметры этого датчика:

- число витков первичной обмотки W_1 =16,
- число витков вторичной обмотки W_2 = 800,
- величина воздушного зазора (δ) в магнитной цепи датчика δ =0,1мм,
- оптимальное нагрузочное сопротивление вторичной обмотки $R_2 \geq 10,0$ кОм.

3. 2 Разработка структурной и принципиальной электрической схемы универсального защитного устройства.

Основные требования, предъявляемые к разрабатываемому устройству защиты.

Как уже отмечалось, в Главе 1, п.1.3, около 70-80% всех отказов в работе низковольтных асинхронных электродвигателей можно предотвратить, используя надежную защиту и 30-20% - повышением качества обслуживания. Следовательно, в настоящее время единственный способ значительно уменьшить процент аварийности электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве – разработка и внедрение простой надежной и высокоэффективной защиты [30,71,131,135]. Анализ наиболее возможных причин отказов электродвигателей в реальных условиях их эксплуатации позволяет обосновать требования, которым должны соответствовать такие защиты:

1. Устройство защиты должно соответствовать общим требованиям Государственного стандарта на электротехнические изделия сельскохозяйственного назначения [45,44] и требованиям Правил устройства электроустановок ПУЭ [118]. Они должны изготавливаться со степенью защиты IP-54 для индивидуальной установки и IP-00, для устройств, встраиваемых в комплектные устройства управления электродвигателями сельскохозяйственного производства.
2. Работать при температуре окружающего воздуха от минус 40 до плюс 40°С; среднее значение влажности не более 98% при 25°С.
3. Окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных газов в концентрациях, снижающих работоспособность изделия.

4. Транспортирование в части воздействия механических нагрузок - по условиям 1(С) ГОСТ 23216-78.
5. Хранение в части воздействия механических нагрузок - 2(С) по ГОСТ 15150-77. Требования техники безопасности соответствуют ГОСТ 12.2.007.7-83.
6. Устройство защиты должно соответствовать техническим условиям эксплуатации ТУ 16-95 ИЖТП.648300.001.
7. Обслуживание устройства защиты должно проводиться в соответствии с действующими "Правилами устройства электроустановок" и "Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителями"

Кроме того, рабочие характеристики защитного устройства не должны зависеть от изменения параметров окружающей среды. Устройство защиты должно безотказно работать в условиях изменения величины питающего напряжения и возможностей асимметрии питающей сети. Надежность защитного устройства должна быть не ниже надежности защищаемого электродвигателя и приводного агрегата. Устройство должно быть по возможности простым в монтаже и эксплуатации.

Разработка структурной схемы защитного устройства.

В соответствии с выводами, представленными в Главе 3, п.3.1 разрабатываемое защитное устройство должно выполнять функции защиты электродвигателя от наиболее распространенных аварийных режимов, таких как перегрузка, заклинивание ротора, обрыв фазы. Исходя из этого, структурная схема устройства должна содержать ряд необходимых структурных блоков. В их числе:

- Первичные преобразователи (датчики аварийного сигнала).
- Пороговые элементы (необходимые для отстройки от сигналов датчиков не являющихся аварийными).
- Элементы выдержки времени (необходимые для отстройки от пусковых токов и небольших или кратковременных перегрузок).
- Элементы сравнения сигналов от первичных преобразователей и опорных сигналов для получения логического вывода о том, что сигнал является аварийным.
- Блока питания электронных элементов схемы защиты.
- Исполнительного механизма для коммутации силовой цепи электродвигателя.

На Рис.3.8 приведена структурная схема предлагаемого защитного устройства, (УЗУ-1) состоящая их указанных структурных элементов. Структурная схема состоит из двух каналов: канал контроля токовой перегрузки и канал контроля обрыва фазы [87,132,158].

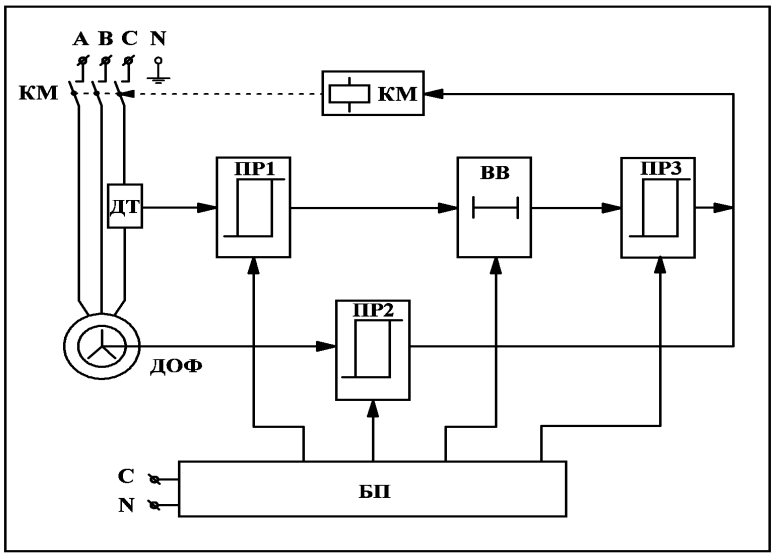


Рис 3.8. Структурная схема устройства зашиты УЗУ-1.

Разработана автором.

В состав канала контроля токовой перегрузки электродвигателя входят: датчик тока (ДТ), первый пороговый элемент (ПР1), элемент выдержки времени (ВВ), второй пороговый элемент (ПР3) и исполнительный механизм силовой цепи (КМ). В состав канала контроля обрыва фаз электродвигателя входят: датчик обрыва фаз (ДОФ), пороговый элемент (ПР2) и исполнительный механизм силовой цепи (КМ). Общим для обоих каналов является блок питания электронных элементов схемы (БП).

Работа структурной схемы в режиме контроля токовой перегрузки.

Контроль перегрузки электродвигателя осуществляется первичным преобразователем тока. В качестве первичного преобразователя используется реконструированный датчик тока от станции управления погружными насосами типа ШЭТ 5801-0362Г-У2. (Результаты исследования указанного датчика приведены в Главе 3, п. 3.2.). Первичный преобразователь включен последовательно в статорную цепь фазы электродвигателя и обеспечивает на выходе напряжение, величина которого пропорциональна величине тока нагрузки электродвигателя. Напряжение с ДТ подаётся на выпрямительный элемент и далее на пороговый элемент ПР1. При появлении на одном из входов ПР1 напряжения больше или равного заданному (опорному напряжению) ПР1 открывается и пропускает сигнал на элемент выдержки времени ВВ. Элемент ВВ обеспечивает выдержку времени, величина которой обратно пропорциональна величине сигнала. При достижении на элементе ВВ величины сигнала равного напряжения открытия порогового элемента ПР3 последний открывается и пропускает сигнал на исполнительный механизм силовой цепи КМ который отключает двигатель от сети. При кратковременной перегрузке подача сигнала от ПР1 к ВВ

прекращается раньше, чем его величина возрастёт до уровня напряжения при котором открывается третий пороговый элемент ПР3 и отключения электродвигателя не происходит.

Работа структурной схемы в режиме контроля обрыва фаз.

Контроль обрыва фаз электродвигателя осуществляется первичным преобразователем ДОФ в качестве которого используется система «нуль двигателя - нуль сети» (00') (характеристики указанной системы приведены в Глава 3 п.3.2). Работа схемы происходит аналогично работе схемы при контроле перегрузки с тем лишь отличием, что сигнал аварийного режима приходит на пороговый элемент ПР2 не от датчика тока ДТ, а от датчика обрыва фаз ДОФ и далее без использования элемента выдержки времени (ВВ) на исполнительный механизм силовой цепи КМ.

Разработка принципиальной электрической схемы универсального защитного устройства.

В соответствии со структурной схемой была разработана принципиальная электрическая схема защитного устройства УЗУ-1, представленная на Рис.3.9 [72,60,61,88].

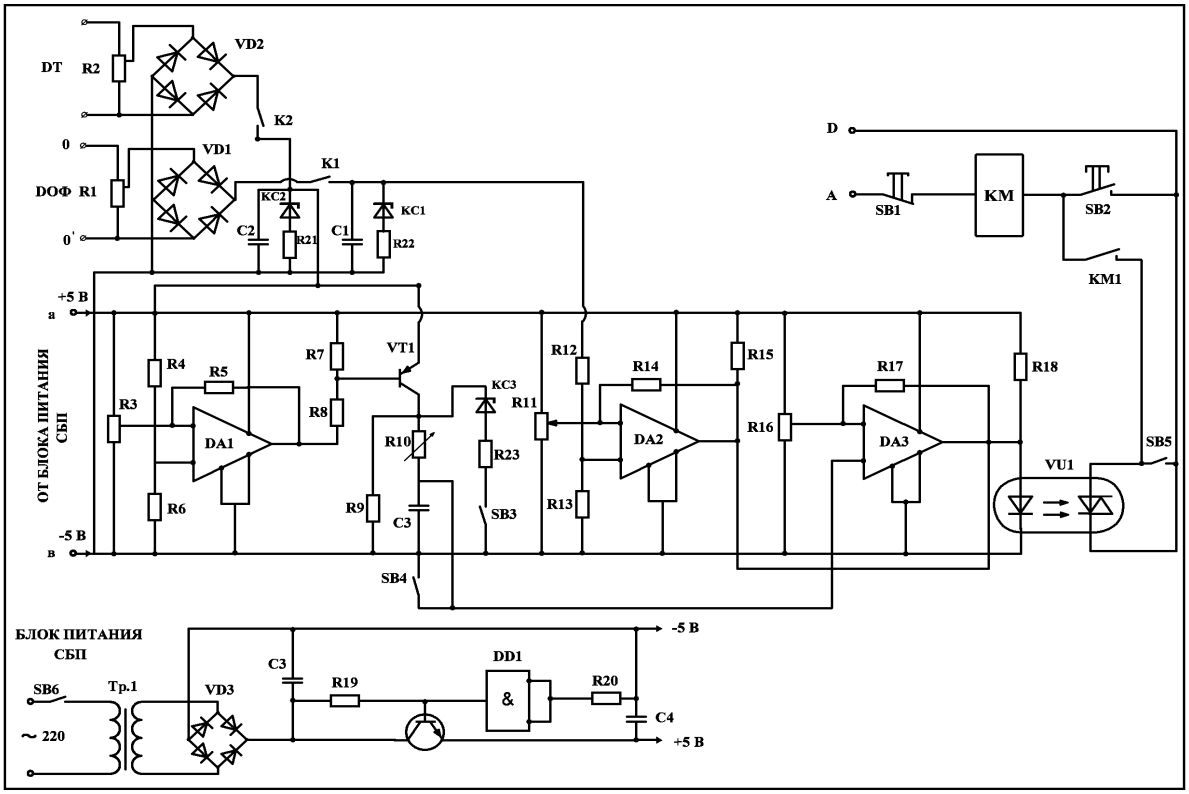


Рис. 3.9 Принципиальная электрическая схема защитного устройства УЗУ-1. Разработана автором

Выбор и расчет элементов принципиальной электрической схемы.

При выполнении расчётов использованы рекомендации [29].

Выбор и расчет порогового элемента.

При выборе порогового элемента применено оригинальное техническое решение. В качестве порогового элемента в устройстве защиты выбрана микросхема-компаратор типа К554 СА3 (операционный усилитель). Указанный элемент обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими аналогами пороговых элементов. Например, с использованием аналога динистора или пороговый элемент на базе однопереходного транзистора. Компаратор представляет собой микросхему, реализующую логическую функцию сравнения двух напряжений, подаваемых на два входа: прямой и инвертирующий. Имея большой коэффициент усиления, микросхема обладает очень высокой чувствительностью, что обеспечивает срабатывание микросхемы при разнице в уровне напряжений на обоих входах всего несколько десятков милливольт. Для питания компаратора можно использовать общий для всего устройства стандартный блок питания постоянного тока с напряжением от 5 до 12 вольт.

Кроме того, компаратор обладает значительным, быстродействием, что позволяет применять его для совместной работы с любыми цифровыми интегральными микросхемами (в частности логическими элементами серии К155). В этом случае, обязательным элементом схемы компаратора является резистор обратной связи (Roc.). Резистор служит для создания цепи обратной связи с целью получения более крутых фронтов подъёма и спада напряжения входных импульсов. Компаратор может быть использован по двум схемам работы.

В первом варианте на прямой вход №3 подаётся опорное напряжение Uоп, которое определяет порог срабатывания компаратора и которое регулируется потенциометром Rрег. На инвертирующий вход №4 подается напряжение входного сигнала Uс. Это напряжение сравнивается с опорным напряжением Uоп на входе №3. Если Uс<Uоп то компаратор заперт и напряжение на его выходе №9 максимально (т.е. равно напряжению питания). Указанный случай соответствует появлению на выходе компаратора логической единице. Если Uс≥Uоп то компаратор открыт и напряжение на его выходе №9 минимально (всего несколько милливольт). Указанный случай соответствует появлению на выходе компаратора логического нуля. При снижении напряжения сигнала Uс<Uоп компаратор опять закрывается.

Во втором варианте опорное напряжение Uоп, подаётся на инвертирующий вход №4, а напряжение входного сигнала Uс подается на прямой вход №3. В этом случае работа компаратора обратная его работе по схеме №1.

Таким образом, пороговый элемент на базе компаратора может реализовывать работу схемы, когда на выходе порогового элемента может быть, как логический 0, так и логическая 1, что позволяет строить различные варианты схемы.

Пороговый элемент на базе компаратора обеспечивает связь с другими логическими элементами (например, микросхемами серии К155) без дополнительных устройств для согласования, что значительно упрощает схему. Кроме того, входной ток компаратора не превышает 2 мкА. Это в пять тысяч раз ниже входного тока порогового элемента построенного с использованием тиристора и стабилитрона (такая схема применена в устройстве защиты типа ФУЗ-М). Следует так же иметь в виду, что компаратор имеет значительную температурную стабилизацию составных элементов микросхемы. Таких преимуществ лишена схема порогового элемента, на однопереходном транзисторе применённая в устройстве защиты ФУЗ-У.

При расчете параметров порогового элемента была учтена рекомендация о том, что значения сопротивлений, включаемых в цепь компаратора, должны находиться в пределах значений 20,0кОм ±100,0 кОм. В качестве сопротивлений R3, R11 и R16, для настройки порогового напряжения, подаваемого на первый вход компараторов выбран прецессионный резистор типа СП-5-114 с сопротивлением 33,0 кОм±5%. При этом сумма сопротивлений в цепи второго входа должна быть примерно равна этому значению. Для второго входа выбран резистор R6 = 30.0 кОм, тогда R4 = 33.0 - 30.0 = 3.0 кОм.

Мощность рассеивания этих резисторов определена из значения максимального напряжения, поступающего от входного сигнала от первичных преобразователей и ограниченного стабилитроном КС1 до величины 30,0 В.

Максимальный ток по этим элементам определиться по формуле:

$$\text{Imax} = \frac{Umax}{R4+R6} = \frac{30}{(30.0+3.0)*10^3} = 9.1*(0.0001)\ \text{А} \qquad (3.1)$$

Мощность рассеивания этих резисторов:

$$\text{Ppac}=I^2*R4 = (9.1*0.0001)^2*3.0*10^3=2.4*(0,001)\ \text{Вт} \qquad (3.2)$$

$$\text{Ppac}=I^2*R4 = (9.1*0.0001)^2*30.0*10^3=2.4*(0,001)\ \text{Вт} \qquad (3.3)$$

Выбраны резисторы R4, R6, R12, R13 типа МЛТ-0,125-3,0 кОм±5% и МЛТ-0,125-30,0кОм±5%

Величина сопротивления резисторов обратной связи R5, R14 и R17 для всех трёх компараторах определена согласно рекомендациям. Выбран резистор типа МЛТ-0,125-1,1 МОм±5%.

Выбор и расчет элементов выдержки (ВВ).

Применение в качестве порогового элемента компаратора позволяет построить элемент выдержки времени на самых простых элементах с использованием накопительного конденсатора и RC цепочки. Малая величина входного тока, потребляемого компаратором, даёт возможность значительно увеличить сопротивление зарядного резистора и тем самым получить значительные интервалы выдержки времени (от единиц до сотен секунд).

В соответствии с ГОСТ 183-94 «Машины электрические вращающиеся» длительность работы трехфазных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей в режиме перегрузки разрешена со следующей продолжительностью:

10% - 30 мин

25% - 20 мин

50% - 2 мин

100%- 30 сек

При 6-8 кратной перегрузке (остановка ротора) 8-10 сек.

Для согласования времени задержки устройства защиты с указанными данными в предлагаемом устройстве защиты использован элемент вдержки времени, построенный с использованием RC цепочки (R10 и C3), дающей обратно зависимую характеристику времени заряда от величины приложенного напряжения. Кривая зависимости допустимой продолжительности работы электродвигателя от величины перегрузки по ГОСТ 183-74 представлена на графике Рис. 3.10 (кривая 1).

Из курса ТОЭ [57] известно, что напряжение на конденсаторе изменяется согласно формуле:

$$Uc = Um*(1-e^{-t/\tau}) \qquad (3.4)$$

Где Uc - напряжение на конденсаторе

Um - поданное напряжение

t - время заряда конденсатора

τ= R*C постоянная времени заряда

Предварительно принимаем значение параметров R_{10}=100 кОм (МЛТ-0,125-100 кОм) и C_2=2000 мкФ (К-50-16-2000х5,0 В).

Из формулы 3.4 определим Uc.

$$Uc = Um - Um * e^{-t/\tau} . \quad (3.5)$$

Далее выразим e

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{Um-Uc}{Um} \quad (3.6)$$

Логарифмируем выражение (3.6)

$$-\frac{t}{\tau} = (\ln \frac{Um-Uc}{Um}) \text{ откуда} \quad (3.7)$$

$$t = -\tau(\ln \frac{Um-Uc}{Um}) \quad (3.8)$$

По полученной формуле (3.8) строим семейство графических зависимостей (кривые 2 и 3 на Рис.3.10).

Из выражения 3.8 следует, что при заданных значениях C и R время заряда будет зависеть от величины Um и Uc, т.е. определяется напряжением срабатывания порогового элемента. Таким образом, меняя значения емкости, сопротивления и Uc можно настроить нужное время срабатывания защиты.

По данным ГОСТ 183-74 и расчетов по формуле (3.8) получены результаты, представленные на графике Рис. 3.10. Из графика следует, что при перегрузках свыше 50% время заряда конденсатора и, следовательно, время срабатывания защиты больше, чем разрешено по ГОСТ 183-74. С целью сокращения времени заряда конденсатора предусмотрена ускорительная цепочка, состоящая их стабилитрона и токоограничивающего сопротивления. При расчете параметров ускорительной цепочки исходим из необходимости ускорения при возникновении 50% и более перегрузки. Такая перегрузка соответствует величине сигнала с датчика тока ДТ (3,4*1,5) = 5,1 В.

В качестве ускорительного элемента выбран стабилитрон типа КС407-Г. Напряжение стабилизации Uст=5,1В, ток стабилизации Iст=1,0 ÷ 59,0 μА, мощность 0,5 Вт.

Величина токоограничивающего сопротивления R22 при токе стабилизации 5,0 μА определится по формуле:

$$R_{11} = \frac{Uст}{Iст} = \frac{5.1}{5{,}0*10^{-3}} = 1{,}12 \text{ кОм} \quad (3.9)$$

При этом максимально возможный ток через стабилитрон определиться по формуле

$$Iст = \frac{Umax}{R11} = \frac{30 \text{ В}}{1{,}12 \text{ кОм}} = 26{,}8 \text{ μА} \quad (3.10)$$

Это значение находится в допустимых пределах изменения тока стабилизации.

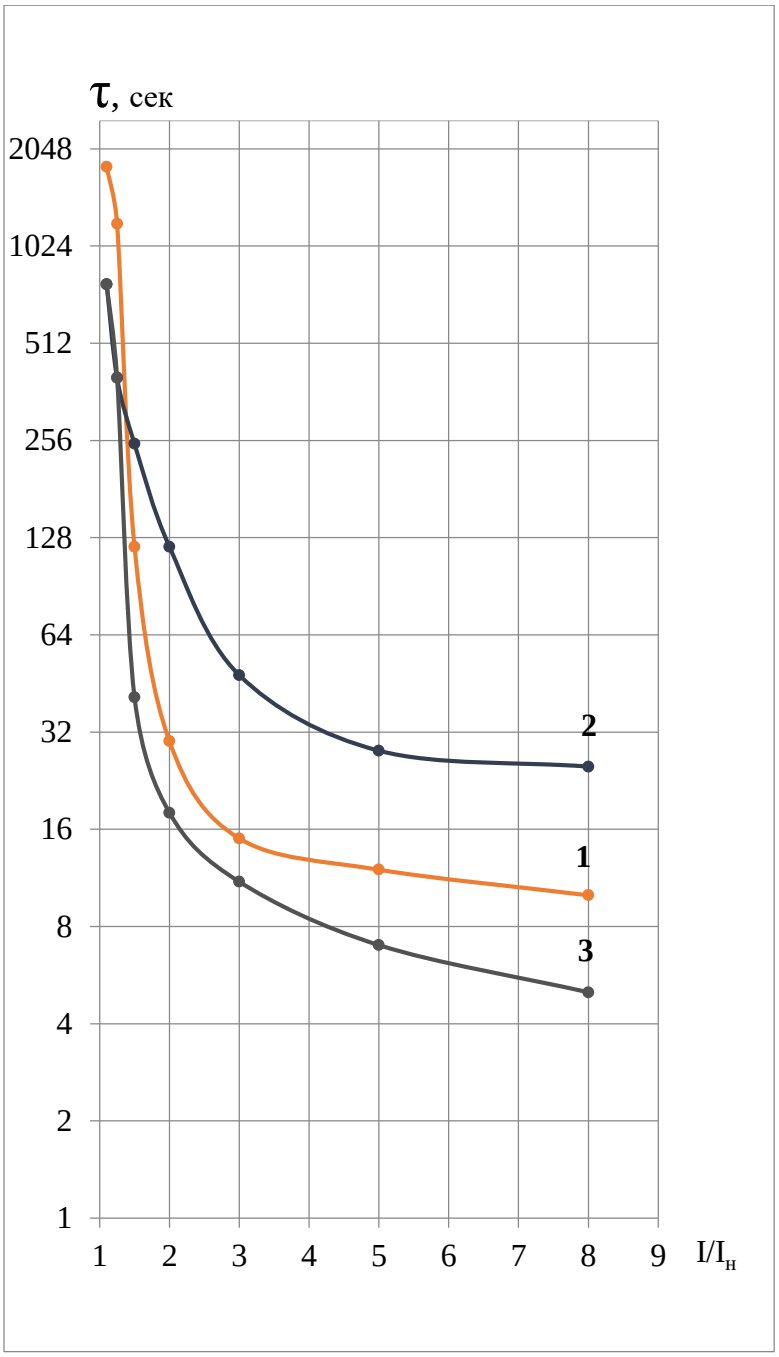


Рис. 3.10. Линия 1 - допустимое время работы электродвигателя с перегрузкой в зависимости от величины токовой перегрузки по ГОСТ 183-74.

Линия 2 - выдержка времени срабатывания защитного устройства без ускорения в зависимости от величины токовой перегрузки.

Линия 3 - выдержка времени срабатывания защитного устройства с ускорением в зависимости от величины токовой перегрузки.

Мощность рассеивания R_{11} определена по формуле

$$Ppac= I^2ст*R_{11}= (26,8*0.001)^2* 1120.0= (30,0*0.001)Вт \quad (3.11)$$

Выбран резистор R_{11} типа МЛТ-0,125-1,2кОм ∓5%.

Ключом для открывания элемента выдержки времени является транзистор.

Выбран транзистор типа КТ 361В с рабочим напряжением 30,0В. Максимальный рабочий ток 100,0 μА.

При расчете резисторов R7 и R8 предполагаем, что максимальное напряжение на этих элементах не превысит выбранное напряжение питания схемы, т.е. 5,0 В. Согласно рекомендациям, максимальный ток в выходной цепи компаратора не должен превышать 0,71μА. Тогда сумма сопротивлений R7 и R8 определиться по формуле:

$$R7+ R8 = \frac{Uп}{Imax} = \frac{5,0}{0,71*10^3}= 7043.0 \text{ Ом} \quad (3.12)$$

Значение сопротивления R7 определиться по формуле:

$$R7 = \frac{Uэб}{Imax} = \frac{1,05}{0,71*10^3} = 1479.0 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

Тогда R8 = 7043.0-1479.0=5564.0 Ом.

Мощность рассеивания на R7 и R8

$$Pp=I^2 max*R7=(0.71*0.001)^2*1.5*1000=7.6*0.0001Вт \quad (3.14)$$

$$Pp=I^2 max*R8=(0.71*0.001)^2*5.7*1000=2.9*0.001Вт \quad (3.15)$$

Выбраны резисторы типа МЛТ-0,125 -1,5кОм±5% и МЛТ-0,125 -5,5кОм ±5%.

Ближайшие стандартные значения сопротивлений:

R7 типа МЛТ-0,125 -1.5 кОм±5%

R8 типа МЛТ-0,125 -5.5 кОм±5%.

Выбор элементов блока питания.

Выбран стандартный блок питания типа БП2-3 для питания карманного калькулятора МК-61.

Напряжение на входе U1= 242-187 В

Выпрямленное напряжение U2 =9.0 В

Выпрямленное стабилизированное U2ст=5,0 В

Максимальный ток нагрузки Iн=0,2 А

Коэффициент пульсация = 0,014.

Выбор и расчет элементов первичных преобразователей входных сигналов (ДТ и ДОФ).

В связи с необходимостью настройки сигналов с первичных преобразователей под каждый электродвигатель конкретно, выходы первичных преобразователей замкнуты на регулировочные резисторы R1 и R2. Величина сопротивления этих резисторов определяется минимальным (Umin) и максимально возможным (Umax) напряжением, снимаемым с датчиков.

По результатам проведенных исследований (Глава 2, п.2.4 и Глава 3, п.3.2) получены следующие значения напряжений снимаемых с первичных преобразователей:

- в режиме контроля токовой перегрузки сигналы с ДТ - Umin=3.80В, Umax=64.0 В
- в режиме контроля обрыва фаз сигналы с ДОФ - Umin=14.50В, Umax=140+25=165,0 В

Выбран регулировочный резистор типа ППЗ-3У с сопротивлением 10,0 кОм.

Мощность рассеивания Ррас определена по формуле:

$$Ррас = \frac{Umax^2}{R} = \frac{165*165}{10000} = 2.72 \text{ Вт} \qquad (3.16)$$

Выбраны R1 и R2 - регулировочный резистор типа ППЗ-3У с мощностью 3,0 Вт.

Для согласования выходных сигналов первичных преобразователей с работой остальных элементов схемы напряжения сигналов на выходе датчиков выпрямляются. Для выпрямления напряжения с первичных датчиков выбрана двух полупериодная схема выпрямления.

Выбран выпрямительный мост типа КЦ 407 А.

Рабочее напряжение Up=250,0 В.

Максимальная токовая нагрузка 2,0 А.

С целью ограничения величины входных сигналов в схеме после первичных датчиков и выпрямителей предусмотрены стабилитроны КС1 и КС2 со своими ограничительными сопротивлениям R21 и R22.

Для ограничения напряжения в цепи датчика тока DT до величины в 30,0 В выбран стабилитрон КС2 типа КС 531 В.

Напряжение стабилизации Uст = 31,0 В

Ток стабилизации Iст = 10,0 μА.

(КС 515 А, Uс=15,0 В, Iст = 1,0±53,0 μА, мощность рассеивания 1,0 Вт)

Токоограничивающее сопротивление R21 определено по формуле:

$$R12 = \frac{Uст}{Iст} = \frac{31*10^3}{10} = 3{,}1 \text{ кОм} \qquad (3.17)$$

Мощность рассеивания R12 определена по формуле:

$$Pp=I^2ст*R12=(10*0.001)^2*3,1*1000=3.1*0.001Вт \quad (3.18)$$

Выбран резистор R12 типа МЛТ-0,125-3,0 кОм±5%.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного входного сигнала в схеме выпрямления предусмотрен конденсатор.

Выбран конденсатор типа К50-6.

Рабочее напряжение Uраб= 50,0 В

Ёмкость С=50.0 мкФ

С целью ограничения величины входного сигнала до величины в 30,0 В в схеме после первичного датчика обрыва фаз ДОФ и выпрямителей предусмотрен стабилитрон КС1 с ограничительным сопротивлением R22.

Выбран стабилитрон типа КС 531 В.

Напряжение стабилизации Uст = 31,0 В

Ток стабилизации Iст = 10,0 μA.

Токоограничивающее сопротивление R12 определится по формуле:

$$R12=\frac{Uст}{Iст}=\frac{31*10^3}{10}=3,1 кОм \quad (3.19)$$

Мощность рассеивания R12 определится по формуле:

$$Pp=I^2ст*R12=(10*0.001)^2*3,1*1000=3.1*0.001Вт \quad (3.20)$$

Выбран резистор R12 типа МЛТ-0,125-3,0 кОм±5%.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного входного сигнала в схеме выпрямления предусмотрен конденсатор.

Выбираем конденсатор типа К50-6.

Рабочее напряжение Uраб= 50,0 В

Ёмкость С=50.0 мкФ.

Выбор и расчет элементов силовой цепи.

Электродвигатель включается в сеть по типовой схеме с использованием магнитного пускателя КМ и кнопок «Пуск» и «Стоп». В цепь катушки магнитного пускателя последовательно с блок контактами магнитного пускателя КМ включаются контакты выхода оптронной пары U1 (фотосимистора). Благодаря развязке по питанию — (применению оптоэлектронного прибора), цепи управления нагрузкой в сети 220 В и управляющей схемы полностью развязаны. При протекании тока в первичной цепи через

светодиод оптрона последний открывается, т.е. замыкается цепь катушки магнитного пускателя и двигатель включается в силовую цепь.

Выбран оптрон - фотосимистор типа «Sitac» фирмы “Simens”.

Рабочее напряжение 600,0 В

Рабочий ток 0,3 А.

Ток в цепи светодиода 5,0 μА.

С целью ограничения величины тока в первичной цепи фотосимистора через светодиод в схеме предусмотрен резистор R18.

Ток отпирания фотосимистора «Sitac» 5,0 μА.

При расчете сопротивлении резисторов R18 учтено, что максимальное напряжение на этом элементе не может превысить напряжение питания схемы, т.е. 5,0 В. Согласно рекомендациям, максимальный ток в выходной цепи компаратора не должен превышать 0,71μА. Следовательно ток через R18 должен находиться в этих пределах. Тогда сопротивление R18 определится по формуле

$$R18 = \frac{U_{п}}{I_{от}} = 5.0/5*10^{3} = 1000.0 \text{ Ом} = 1{,}0 \text{ кОм} \quad (3.21)$$

Мощность рассеивания на R18

$$P_{рас} = I^{2}*R18 = (5.0*0{,}001)^{2}*1.0*10^{3} = 0{,}025 \text{ Вт} \quad (3.22)$$

Выбран резисторы типа МЛТ-0,125-1,0 кОм±5%

Работа схемы защитного устройства в различных режимах.

Работа устройства защиты в нормальном режиме.

В нормальном режиме при нагрузке с номинальными токами, протекающими по силовому кабелю, питающему электродвигатель, по первичной обмотке датчика тока ДТ (Рис. 3.9) протекает ток, создающий во вторичной обмотке ДТ напряжение, подаваемое на регулировочный потенциометр R2, на выпрямительный мост VD2 и сглаживающий конденсатор С2. Далее выпрямленное и сглаженное напряжение подаётся на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R4 и R6 и одновременно на транзистор VT1. Регулятором потенциометра R2 на прямом входе (№3) компаратора DA1 устанавливается напряжение ниже порогового значения выставляемого на инверсном входе (№4) того же компаратора. Предварительно, регулировочными потенциометрами R3, R11 и R16 устанавливаются опорные (пороговые) напряжение, подаваемые на инверсные входа (№4) компараторов DA1, DA2, DA3. Величина этих напряжений задана в таблице настроечных параметров защитного устройства (Таблица 3.5). Таким образом, к прямому входу DA1

будет приложено напряжение ниже напряжения порогового значения, поданного на инвертирующий вход DA1. В этом состоянии DA1 заперт и ток, протекающий через его выход (№9) и сопротивления R7 и R8 будет равен нулю. При отсутствии тока в делителе напряжения R7 и R8 будет заперт и транзистор VT1, так как напряжение отпирания, снимаемое с R7 так же равно нулю. При запертом VT1 напряжение на конденсаторе C3 равно нулю, так как он разряжен через резисторы R9 и R10. Равно нулю и напряжение, подаваемое с C3 на прямой вход (№3) компаратора DA3. В этом состоянии DA3 заперт и ток, протекающий через его выход (№9) будет равен нулю. При подаче напряжения на блок питания защитного устройства через резистор R18 и светодиод оптопары VU1 будет протекать ток достаточный для открытия фотосимистора VU1. Открытый фотосимистор VU1 замыкает цепь питания катушки магнитного пускателя KM и двигатель запускается.

Работа устройства защиты в режиме токовой перегрузки.

При возникновении перегрузки напряжение от первичного преобразователя DT через выпрямитель VD2 будет приложено к прямому входу (№3) порогового элемента DA1. При этом приложенное напряжение будет выше напряжения порогового значения, поданного на инвертирующий вход (№4) компаратора DA1. В этом состоянии DA1 открыт и через его выход (№9) и сопротивления R7 и R8 будет протекать ток. В случае появлении на делителе R4, R6 напряжения выше 30,0 В стабилитрон КС2 пробивается и на делитель будет подаваться напряжение не выше этого значения, что защитит схему от опасного перенапряжения. При наличии тока в делителе напряжения R7 и R8 на базу транзистора VT1 будет подано напряжение отпирания, снимаемое с R7 которое выше необходимого для открытия транзистора. При отпирании VT1 через транзистор и резистор R10 потечет ток заряда конденсатора C3. При достижении на конденсаторе величины напряжения равного или больше порогового напряжения, выставленного на инверсном входе (№4) DA3, последний откроется и зашунтирует светодиод оптропары VU1. В этом случае ток через светодиод будет равен нулю, фотосимистор закроется и разорвет цепь катушки магнитного пускателя МП. При этом двигатель отключается от питающей сети. При возникновении токовой перегрузки на 50% и более на конденсаторе C3 появится напряжение выше напряжения пробоя стабилитрона КС3. Стабилитрон пробивается и конденсатор C3 будет заряжаться дополнительно через сопротивление R22, что значительно ускорит время заряда и сократит выдержку времени Рис.3.10, кривая 3).

Работа устройства защиты в режиме обрыва фаз питающей линии.

В режиме номинальной нагрузки с номинальными токами, при возникновении обрыва фазы, повышенное напряжение от первичного преобразователя ДОФ через выпрямительVD1 будет приложено к делителю напряжения R12, R13. В этом случае к прямому входу (№3) компаратора DA2 будет приложено напряжение, снимаемое с R13 выше порогового значения, установленного на инвертирующий вход (№4) DA2. Компаратор DA2 открывается и открытым выходом (№9) шунтирует светодиод оптопары VU1. Ток через светодиод прекращается, фотосимистор VU1 запирается и разрывает цепь катушки магнитного пускателя КМ. При этом двигатель отключается от питающей сети. Отключение двигателя будет происходит без выдержки времени так как такой режим очень опасным и требуется мгновенное отключение двигателя от питающей сети. Если при обрыве фазы на делителе R12, R13 появится напряжения выше 30,0(В) стабилитрон КС1 пробивается и на делитель будет подаваться напряжение не выше этого значения, что защитит схему от опасного перенапряжения.

Настройка параметров пороговых элементов защитного устройства.

При изготовлении защитного устройства технологией предусмотрено выполнение ряда операций по настройке некоторых параметров. К этим параметрам относятся значения пороговых напряжений, выставляемых на прямых и инверсных вводах компараторов. Для определения значений этих напряжений были составлены соответствующие установочные Таблицы П8.1 – П8.7, приведенные в Приложении 8.

Настройка элементов в цепи контроля токовой перегрузки.

В Приложении 8, Таблице П8.1. приведены данные по ГОСТ 183-74. «Допустимое время работы асинхронного электродвигателя в зависимости от величины токовой перегрузки». В Таблицах П8.2 - П8.5 приведены экспериментальные данные из Главы 2, «Результаты экспериментальных исследований». В таблицах указаны напряжения в (В) создаваемые датчиком тока после выпрямления и сглаживания в зависимости от величины токовой перегрузки в различных точках схемы защитного устройства и время заряда конденсатора С3 цепочки выдержки времени.

Анализ этих табличных данных позволяет определить необходимые параметры пороговых элементов.

- Минимальное напряжение, снимаемое с датчика тока, для двигателя с минимальной номинальной мощностью работающего с номинальной нагрузкой составляет 3,4В.

Следовательно пороговое напряжение на прямом входе первого порогового элемента DA1 устанавливаем равным 3,4 В (Приложение 8, Таблица П8.4..

- Учитывая минимальный порог чувствительности компаратора, равный 50μВ, устанавливаем на инверсном входе первого порогового элемента DA1 опорное (пороговое) напряжение равное 3,5 В. (Приложение 8, Таблица П8.4). Разница с входным напряжением 100,0 μВ.
- Минимальное напряжение на конденсаторе С3 при возникновении 10% перегрузки электродвигателя составляет 3,98 В. Следовательно, учитывая минимальный порог чувствительности компаратора пороговое напряжение на прямом входе (№3) третьего порогового элемента DA3 устанавливаем равным 3,9 В (Приложение 8, Таблица П8.5). Разница с входным напряжением 80,0 μВ.

Настройка элементов в цепи контроля обрыва фаз.

В Приложении №8, Таблица П8.6 приведены экспериментальные данные из Гл.2, п. 2.4 «Результаты экспериментальных исследований сети нуль двигателя – нуль сети». В таблице указаны напряжения (В) создаваемые системой нуль двигателя – нуль сети для различных двигателей в режимах холостого хода, номинальной нагрузки в симметричном режиме и в режиме обрыва фаз. Устанавливаем, предварительно на прямом входе (№3) порогового элемента DA2 опорное напряжение равное половине напряжения питания схемы т.е. 2,5В (Приложение 8, Таблица П8.7). Это напряжение выставляется регулировочным потенциометром R1 при работающем двигателе с номинальной нагрузкой.

Учитывая тот факт, что при работе на холостом ходу напряжение системы нуль двигателя – нуль сети несколько увеличивается, а защита при этом срабатывать не должна, определим значение этого напряжения (Uоп) на прямом входе второго порогового элемента DA2. Так, например, для двигателя (P=0.55 кВт, n= 3000, об/мин.) из пропорции:

18,5 - 2,5

26,5 - Uоп, откуда Uоп = 3,58 (В)

При обрыве фазы напряжение U00` возрастает до 43,0 В (Рис.2.12). С учетом передаточного коэффициента К=7,4 (18.5/2.5=7.4) регулировочного потенциометра R1 на прямом входе (№3) компаратора DA2 в этом случае напряжение будет 5,95В (43,0/7,4=5,95).

Аналогичным образом определены значения напряжений на прямом входе DA2 для других двигателей. Результаты расчетов приведены в Приложении 8, Таблице П8.6.

Анализ табличных данных Таблице П8.6. позволяет определить пороговые значения DA2.

1. Так как при работе в симметричном режиме на холостом ходу двигатель не должен отключатся от сети значение порогового напряжения на инверсном входе DA2 не должно быть ниже максимально 3,66 (В).
2. Двигатель должен отключиться при обрыве фазы, следовательно, в этом случае значение порогового напряжения на инверсном входе должно быть ниже минимально возможного 5,09 (В)
3. Устанавливаем среднее значение порогового напряжения на инверсном входе (№4) порогового элемента DA2 Uпор = 4,0 В. (Приложение 8, Таблица П8.7).

В Таблице 3.5 приведены итоговые данные по установке опорных и пороговых напряжений для всех компараторов DA1, DA2 и DA3.

Таблица 3.5. Итоговая настроечная таблица пороговых напряжений компараторов DA1, DA2 и DA3.

№ п/п	Пороговый элемент	Вход №3	Вход №4
1	DA1	3,4	3,5
2	DA2	2,5	4,0
3	DA3	variabl	3.9

3.3 Экономический эффект от внедрения разработанного универсального защитного устройства.

Расчет экономической эффективности предлагаемого устройства защиты определился по ожидаемому годовому экономическому эффекту [4,16,67] в результате замены устройств защиты типа ФУЗ, УВТЗ-1М и РТЛ1021 (базовые варианты) на разработанное устройство УЗУ-1 (предлагаемый вариант).

Определение затрат на изготовление устройства защиты УЗУ-1.

Расчет выполнен по формуле годовых приведенных затрат Зпр. [74]:

$$Зпр=Сг+Ен*Кг \quad (3.4)$$

где: Сг– годовые эксплуатационные затраты.

Кг - капитальные затраты.

Ен - нормативный коэффициент капитальных вложений в электротехнической промышленности.

При определении капитальных затрат (Кг) учтены следующие составляющие затрат:

$$Кг= Им + Ипм – Иотх + Изп + Идзп + Ис + Иизн + Иц + Изав + Ивнз \quad (3.5)$$

где: Им - стоимость основных материалов.

Ипм - стоимость покупных материалов.

Иотх - стоимость возвратных отходов.

Изп - основная зарплата производственных рабочих.

Идзп - дополнительная зарплата производственных рабочих.

Ис - отчисления на социальное страхование.

Иизн - износ производственной оснастки.

Иц - цеховые расходы.

Изав - общезаводские расходы.

Ивнз - внепроизводственные расходы.

Стоимость основных материалов (Им).

К стоимости основных материалов отнесены стоимость первичного преобразователя тока, корпуса защитного устройства и блока питания.

$$Им = Ипп + Икор + Ибп \quad (3.6)$$

где: Ипп - стоимость датчика тока (0,90 $).

Икор - стоимость корпуса (0,60 $).

Ибп - стоимость блока питания (1,60 $).

Тогда стоимость основных материалов составит (Им) = 0,90$ + 0,60$ + 1,60$ =3,10$

Таблица 3.6. Стоимость покупных материалов.

№ п/п	Наименование материала	Еден.изм.	Кол-во	Цена ($)	Сумма ($)
1	Резистор МЛТ-0,125	шт.	14	0,015	0,21
2	Резистор МЛТ-1, МЛТ-2	шт.	2	0,04	0,08
3	Резистор ПЭВ -10	шт.	1	0,37	0,37
4	Резистор ППЗ -У3	шт.	2	0,08	0,16
5	Резистор СП5-14	шт.	3	0,09	0,27
6	Конденсатор К50 -35	шт.	1	0,35	0,35
7	Конденсатор К50 – 6,0	шт.	2	0,14	0,28
8	Мост выпрямительный КЦ407А	шт.	2	0,47	0,94
9	Стабилитрон КС- 407Г	шт.	1	0,11	0,11
10	Стабилитрон КС – 531В	шт.	2	0,15	0,30
11	Стабилитрон КС - 447А	шт.	1	0,12	0,12
12	Оптрон АОУ - 103Б	шт.	1	0,48	0,48
13	Тиристор КУ - 208 Г	шт.	1	0,60	0,60
14	Транзистор КТ - 361Вγ	шт.	1	0,15	0,15
15	Микросхема К554 СА3	шт.	3	0,23	0,69
16	Кнопка КМ	шт.	1	0,26	0,26
17	Тумблер П-17	шт.	2	0,24	0,48
18	Разъём ГРПМ1 – 61 ШО2	шт.	2	0,27	0,54
		Итого:	42	Итого:	6,39

Стоимость покупных материалов.

Стоимость покупных материалов определена по прейскуранту цен №36-07, №36-08, №36-09, №36-10 [16]. Результат представлен в Таблице 3.6.

Стоимость работ по изготовлению УЗУ-1 (Ииз) определена согласно прейскуранта №15-17 [74], где дана стоимость работ по изготовлению комплектных устройств, в состав которых входят печатные платы с полупроводниковыми элементами и выпрямительные устройства. Результат представлен в Таблице 3.7.

Таблица 3.7. Стоимость работ по изготовлению предлагаемого защитного устройства

№ п/п	Наименование работ	Еден. изм.	Кол-во	Цена еден. изм. ($)	Сумма ($)
1	Изготовл. печатной платы	дм²	0,45	3,50	1.57
2	Монтаж п/п элементов	шт.	42	0,10	4,20
				Итого:	5,80

Учитывая тот факт, что разработанное защитное устройство было изготовлено не в заводских, а в лабораторных условиях остальные составляющие капитальных затрат могут быть учтены ведением коэффициента дополнительных расходов Кдоп =1,5.
Общие капитальные затраты по сравниваемым вариантам представлены в Таблице 3.8.

Таблица 3.8. Общие капитальные затраты.

Тип защит. устройства. № варианта	Наименование затрат	Базовые варианты	Предлагаемый вариант
УЗУ-1 №4	Основные материалы ($)	-	3,10
	Покупные материалы ($)	-	6,39
	Стоимость работ ($)	-	5,80
	Суммарные затраты: ($) Суммарные затраты: (лей)	-	13,54 ($) 265,47 (лей)
УВТЗ №1	Суммарные затраты: ($) Суммарные затраты: (лей)	17,40 ($) 341,00 (лей)	-
ФУЗ №2	Суммарные затраты: ($) Суммарные затраты: (лей)	9,72 ($) 194,6 (лей)	-
РТЛ1021 №3	Суммарные затраты: ($) Суммарные затраты: (лей)	2,43 ($) 47,62 (лей)	-

Эксплуатационные, технические и технологические затраты.

Эксплуатационные затраты (Сг) по обоим вариантам определены с учетом эффективности использования рассматриваемых устройств. Так как предлагаемое устройство обеспечивает защиту от обрыва фаз, приравняем эффективность его работы к эффективности аналогичного промышленного устройства типа ФУЗ-М (так как число аварийных режимов для этих защит одинаково). Из литературных источников [51] известно, что разность эффективностей $\Delta\varepsilon$ устройства ФУЗ-М и УВТЗ-1М составляет $\Delta\varepsilon = 0{,}188$. Учитывая, что предлагаемое устройство выполняет ту же функцию, что и ФУЗ-М принимаем этот коэфициент и для предлагаемого устройства.

Увеличение эксплуатационных затрат (ΔC), связанных с выходом электродвигателей из строя (технические затраты) определены из выражения (3.26):

$$\Delta C = Уср * \gamma ст * \Delta\varepsilon \qquad (3.7)$$

где: Уср - среднестатистический ущерб от выхода из строя электродвигателя

γст - среднестатистическая вероятность выхода электродвигателя из строя в сельском хозяйственно производстве = 0,2 (1/год)

$\Delta\varepsilon$ - разность эффективностей работы защитных устройств (предлагаемого УЗУ-1 и заводского УВТЗ-1М) = 0,188.

Отказ в работе электродвигателя в сельском хозяйстве приносит ущерб (технологические затраты), в среднем 700,0 лей [50,95]. В животноводстве, со сложными многочисленными технологическими процессами, отказ одного электродвигателя может увеличить технологтческий ущерб до 1200,0 лей [110]. Откуда среднее значение:

$$Уср = \frac{700+1200}{2} = 950{,}0 \text{ лей} \qquad (3.8)$$

$\Delta C = Уср * \gamma ст * \Delta\varepsilon = 950{,}0 * 0{,}2 * 0{,}188 = 35{,}72$ лей

Итоговые эксплуатационные затраты по всем вариантам представлены в Таблице 3.9. При определении эксплуатационных расходов считаем, что техническое обслуживание предлагаемого защитного устройства не требует дополнительных затрат на повышение квалификации персонала и поэтому заработная плата обслуживающего персонала в обоих вариантах одинакова. Кроме того, считаем, что расход электроэнергии в обоих вариантах так же примерно одинаков.

Таблица 3.9. Эксплуатационные затраты по вариантам (в леях).

№ п/п	Наименование затрат (лей)	**Вариант №1 (базовый) УВТЗ**	**Вариант №2 (базовый) ФУЗ-М**	**Вариант №3 (базовый) РТЛ 1021**	**Вариант №4 (предлагаем.) УЗУ-1**
1	Техническое обслуживание (12% от кап.затрат)	40,92	29,20	5,71	31,86
2	Амортизационные отчисления (8% от кап.затрат)	27,28	15,57	3,8	21,24
3	Затраты, связанные с выходом электродвигателя из строя	35,72	35,72	35,72	-
4	Суммарные эксплуатационные затраты	103,92	80,49	44,69	53,10
5	Прочие затраты (3% от эксплуат.)	3,12	2,42	1,34	1,6
	ИТОГО:	Сг1=107,04	Сг2=82,9	Сг3=46,03	Сг4=54,7

Ожидаемый годовой экономический эффект (Эг):

$$Эг = ((Сг1+Ен*Кг1) + (Сг2+Ен*Кг2)) - (Сг4+Ен*Кг4) \quad (3.9)$$

где: Сг1 – эксплуатационные расходы по базовому варианту (№1)

Сг2 – эксплуатационные расходы по базовому варианту (№2)

Сг4 – эксплуатационные расходы по предлагаемому варианту (№4)

Кг1 – капитальные затраты по базовому варианту (№1)

Кг2 – капитальные затраты по базовому варианту (№2)

Кг4 – капитальные затраты по предлагаемому варианту (№4)

Ен – нормативный коэффициент капитальных вложений в электротехнике.

Эг = (107,04 + 0,15*341,62) + (82,90 + 0,15*194,6) - (54,7+ 0,15*265,47) = 175,51лей

Срок окупаемости дополнительных затрат (Тз)

Определён из условия сравнимости технически сопоставимых вариантов. А именно: одновременного применения тепловых реле РТЛ1021 и защиты ФУЗ (по базовым вариантам №3и №2) и устройства УЗУ-1 (предлагаемый вариант №4) по формуле:

$$Тз = \frac{Кгп - Кгб}{Сгб - Сгп} = \frac{265,47 - 242,22}{82,9, - 54,70} = 0,82 \text{ года.} \quad (3.10)$$

где: Кгп - капитальные затраты предлагаемого варианта;

Кгб - капитальные затраты базового варианта;

Сгп - текущие затраты предлагаемого варианта;

Сгб - текущие затраты базового варианта.

3.4 Выводы по третьей главе.

Как уже отмечалось, в п.3.1, защита электродвигателя от опасной перегрузки может быть осуществлена путём контроля величины либо тока нагрузки, либо температуры статорной обмотки, либо их сочетания. В предлагаемой схеме защитного устройства выбран токовый способ контроля степени нагрузки двигателя с помощью датчика тока как наиболее простой и вместе с тем достаточно эффективный. Учитывая тот факт, что нагрузка трехфазного асинхронного двигателя является одинаковой для каждой фазы двигателя, контроль величины токовой перегрузки может быть осуществлен лишь по одной фазе, т.е. одним датчиком тока.

По результатам исследований конструктивно измененного датчика тока №2 можно сделать следующие выводы:

1. Внешняя $U_2=f(I_1)$ и внутренняя $U_2=f(I_2)$ характеристики конструктивно измененного датчика тока №2, имея синусоидальную форму кривой напряжения, полностью отвечают предъявляемым требованиям.
2. Кривая вторичного напряжения датчика №2 сохраняет прямо пропорциональную зависимость между первичным током и вторичным напряжением на всём диапазоне изменения вторичного тока (1,0-20,0 А).
3. Конструктивно измененный датчик тока обеспечивает требуемую минимальную величину вторичного напряжения ($U_2 \geq 3{,}5$В) датчика даже для самого маломощного двигателя ($P_н=0{,}55$ кВт).
4. Максимальная токовая нагрузка (в пределах $I_2=10$ мА) во вторичной цепи конструктивно измененного датчика не влияет на величину его вторичного напряжения и, следовательно, на работу защитного устройства в целом (Рис. 3.7). Т.е. мощность конструктивно измененного датчика достаточна для обеспечения устойчивого сигнала, подаваемого на схему во всех режимах работы исследуемых асинхронных электродвигателей.
5. Проведенные исследования позволили определить оптимальные конструктивные параметры реконструированного датчика тока:

- число витков первичной обмотки W_1 =16,
- число витков вторичной обмотки W_2 =800,
- величина воздушного зазора в магнитной цепи датчика δ =0,1мм,
- нагрузочное сопротивление вторичной обмотки R_2 ≥10,0 кОм.

❖ Разработано универсальное защитное устройство УЗУ-1 (по А.С.№1410175, А.С.№807435 и А.С.№877691). Устройство обеспечивает защиту двигателя от основных аварийных режимов для трёхфазных асинхронных электрических двигателей мощности от 0,55 кВт до 11,0 кВт. Разработанное устройство по своим габаритным размерам выполнено так, что может быть установлено внутрь заводских магнитных пускателей вместо тепловых реле.

❖ Расчет ожидаемого годового экономического эффекта и срока окупаемости затрат показывает экономическую целесообразность применения разработанного защитного устройства по сравнению с серийно выпускаемыми устройствами защиты типа ФУЗ, УВТЗ-1М и тепловым реле РТТ и РТЛ 1021.

❖ Разработанное защитное устройство является универсальным, т.е. может быть установлено на любой двигатель указанного диапазона мощности. Кроме того, предлагаемое устройство защищает двигатель сразу от трёх наиболее вероятных аварийных режимов: перегрузки (с обратнозависимой выдержкой времени), обрыва фазы и заклинивания ротора.

❖ Защитное устройство прошло производственные испытания в ряде хозяйств Республики Молдова и внедрено на ряде оборонных предприятий РФ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Установлено что даже при абсолютно симметричном режиме питания при работе трёхфазных асинхронных двигателей последних серий между нулевой точкой обмотки статора и нулевой точкой питающей сети генерируется напряжение высших гармоник кратных трём. Наиболее сильно выражена третья гармоника с частотой f=150 Гц. [102**Error! Reference source not found.**].

В работе определена природа возникновения напряжения высших гармоник в нулевом проводе трёхфазного асинхронного двигателя, это - магнитное насыщение магнитопровода двигателя [89]. Предложена специализированная математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая определить величину напряжения этих гармоник в рабочих и аварийных режимах работы двигателя [160,101,102].

Экспериментальные исследования показали, что расчеты, выполненные с применением разработанной математической модели, учитывающей насыщение магнитной системы современных асинхронных двигателей, адекватны с результатами экспериментальных исследований с относительной погрешностью не более 5 -7% [163].

Проведенные исследования позволяют сделать рад выводов:

1. Установлено, что парк трёхфазных асинхронных электрических двигателей, применяемых в сельском хозяйстве РМ (на примере животноводства), составляют двигатели серий АО, АО2, 4А в основном малой и средней мощности (0,18–11,0 кВт), работающие в производственной зоне с тяжелыми условиями среды [157].
2. Обзор парка асинхронных электрических двигателей показал, что около 70 % выходов их из строя составляют такие аварийные режимы как перегрузка, заклинивание ротора и обрыв фазы питающей линии [100].
3. Теоретически доказано, что асинхронные двигатели последних серий 4А и 5А следует рассматривать как нелинейные системы, генерирующие в фазных напряжениях двигателя высшие гармоники.
4. Экспериментально установлено, что абсолютная величина напряжения высших гармоники полностью определяется степенью насыщения магнитной системы асинхронного электрического двигателя и зависит от следующих факторов: напряжения сети, скольжения двигателя, мощности двигателя и числа пар полюсов двигателя. Максимальное значение этого напряжения соответствует режиму холостого хода асинхронных электрических двигателей. С увеличением скольжения от режима холостого хода до полной остановки ротора величина указанного напряжения уменьшается примерно на 30-35%. С увеличением напряжения сети указанное напряжение растет, а с увеличением

мощности асинхронных электрических двигателей и уменьшением числа пар полюсов напряжение уменьшается [162].

5. Был исследован и реконструирован датчик тока как источник диагностического сигнала аварийной перегрузки асинхронных электрических двигателей. Определены оптимальные параметры реконструированного датчика:

- число витков первичной обмотки W_1 =16,
- число витков вторичной обмотки W_2 =800,
- воздушный зазор магнитной системы δ =0,1мм,
- оптимальное нагрузочное сопротивление вторичной обмотки $R_2 \geq$10,0 кОм [32].

6. Разработано универсальное защитное устройство УЗУ-1 обеспечивающее комплексную защиту от аварийной перегрузки, обрыва фазы и заклинивания ротора для трехфазных асинхронных электрических двигателей мощностью от 0,55кВт до 11,0 кВт. Устройство прошло производственные испытания в ряде хозяйств Республики Молдова и было внедрено на ряде оборонных предприятий России (г. Москва, оборонные предприятия №107078 и №125833) [158, 176].

7. Ожидаемый экономический эффект от внедрения данного защитного устройства рассчитан на основании рекомендаций по определению экономической эффективности от внедрения новой техники и составляет 175,51 лей/дв, а срок окупаемости затрат составляет 0,82 года.

По результатам выполненной работы можно сделать ряд практических рекомендаций и предложений:

1) Предложено напряжение высших гармоник, генерируемое в нулевом проводе современных асинхронных двигателей учитывать и использовать при разработке устройств защиты, в которых в качестве сигнала обрыва фаз используется напряжение между нулевыми точками двигателя и сети [33,161].

2) Рекомендовано разработанное защитное устройство использовать вместо применяемых в настоящее время тепловых реле. С этой целью устройство по своим габаритным размерам выполнено так, что монтируется внутрь стандартных магнитных пускателей вместо тепловых реле. При этом устройство защищает двигатель не только от перегрузки, но и от обрыва фаз, заклинивания ротора и к тому же является универсальным т.к. может настраиваться на любой двигатель мощностью от 0,5 кВт до 11,0 кВт.

БИБЛИОГРАФИЯ

a) на румынском языке

1. BERZAN, V. *Modelul matematic al elementului rezistiv din microfire a divizorului de tensiune înaltă.* AȘM, Institutul de Energanica, "Problemele energeticii regionale" Revista electronica № 3(8), 2008. ISSN 1857-0070.
2. ERHAN, F., POPESCU, V. *Problema optimizării fiabilităţii sistemelor de distribuţie a energiei electrice.* Revista “Problemele Energeticii Regionale”, AŞM, nr.1 (15), 2011, p. 34-38 (Impact Factors-1.07). ISSN 1857-0070.
3. POSTOLATI, V., *Eficienţa utilizării reglajului de fază cu regimurile liniilor de transport a energiei electrice cu capacitate de trafic sporită*. "Problemele energeticii regionale", Revista electronică № 3(14) 2010. ISSN 1857-0070.
4. VOLCONOVICI, L., et.al. *Metode de imitare pentru determinarea eficienței sistemelor biotehnice.* Conferința Internațională «ENERGETICA MOLDOVE - 2016», Aspecte regionale de dezvoltare Ediția III. Chișinău, Republica Moldova: AȘM 29 septembrie – 1 octombrie 2016. 3. ISBN 978-9975-56-625-4.

b) на русском языке

5. А.с. 928513 (СССР). *Устройство для защиты погружного электродвигателя от повреждения.* ГРУНДУЛИС, А.О., ШНИДЕРС, А.А. Опубл. в Б.И. №18, 1982.
6. А.с. 936183 (СССР). *Устройство для защиты трехфазного электродвигателя.* ГРУНДУЛИС, А.О. Опубл. в Б.И. № 22, 1982.
7. А.с. 936184 (СССР). *Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от работы на двух фазах и перегрузок.* ГРУНДУЛИС, А.О., ШНИДЕРС, А.А. Опубл. в Б.И. № 22, 1982.
8. А.с. I0357I7 (СССР). *Устройство для защиты электропривода от аварийного режима.* ГРУНДУЛИС, А.О., ШНИДЕРС, А.А., ЛЕЩЕВИЦ, П. Э. Опубл. в Б.И. №30, 1983.
   ISSN 0131-7105.
9. MAK-KRACEN, D. DORN, Y. *Численные методы программирования на языке “FORTRAN”.* (Перевод с английского). М.: «Мир», 1977, 584 с.
10. АЛЕКСЕЕВ, А. А. Создание цифровых защит. *«Новости электротехники»,* 2005, №6.
11. АЛЕКСЕЕВИЧ, В.А. О работе асинхронного двигателя при несимметричном напряжении. *«Промышленная энергетика»*. 1992, №6, с.36-39.

12. Анализ причин повреждений электродвигателей в США. *«Промышленная энергетика»*. 1976, №3, с. 16-18.
13. АНГЕЛИ, А.И. 0 защите электродвигателей от работы на двух фазах. *«Промышленная энергетика».* 1972, № 7, с.14-16.
14. *Асинхронные двигатели общего назначения.* Под ред. ПЕТРОВА, В., КРАВЧИКА, А. М: Энергия, 1980. 488 с.
15. БАГЛЕЙБЕТЕР, О. М. Трансформаторы тока как элемент токовой защиты. *«Новости электротехники».* 2008, № 5.
16. БАЕВ, В.И. Экономическая эффективность защиты электродвигателей в сельскохозяйственном производстве. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 2004, №9. с.30-33. ISSN 0206-572X.
17. БАКШАЕВА, Н.С. КАЛИНИНА, Е.А. Исследование колебания напряжений в сельских электросетях. *«Техника в сельском хозяйстве».* 2013, №5, стр. 24-25. ISSN 0131-7105.
18. БЕЛЯЕВ, Е.Ф., ЦЫЛЁВ, П.Н., ЩАПОВА, И.Н. Математическое моделирование трёхфазного двигателя с внутренней компенсацией реактивной мощности. «Электротехника». 2013, №9. ISSN 0013-5860.
19. БЕСПАЛОВ, В.Я., КОБЕЛЕВ, А.С., МАКАРОВ, Л.Н. Разработка и освоение производства асинхронных двигателей новых серий 7А VE. *«Электротехника»,* 2017, №4. ISSN 0013-5860.
20. БОГДАНОВ, А.Н., МИКАНОВ, В.Ф. *Полупроводниковая защита трехфазных асинхронных электродвигателей сельскохозяйственного производства от не полнофазных режимов работы.* Тр./Ставропольский с.-х. институт, 1980. т.6, выпуск 43, с. 39-42.
21. БОЛЬШАКОВ, А.А. *Исследование влияния среды животноводческих ферм на основные характеристики изоляции электродвигателей.* Челябинск: 1978, 186 с.
22. БОЛЬШАКОВ, А.А., БОДИН, А.П., ДЕРГАЧ, В.И., и др. *Влияние качества напряжения на нагревание асинхронных двигателей.* Тр./Саратовский с.-х. институт, 1978, выпуск 119, с.64-68.
23. БОЛЬШАКОВ, А.А., ДЕРГАЧ, В.И. *Условия работы электродвигателей в животноводстве. Вопросы эксплуатации и повышения эксплуатационной надежности электрооборудования*. Челябинск: 1976. с.17-19.

24. БОРИСОВ, Ю.С. Анализ рентабельности капитального ремонта асинхронных электродвигателей. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства»,* 2012, №1, с.19-20. ISSN 0206-572X.
25. БОРОДИН, Д. А. Устройство защиты от провалов напряжения. *«Новости электротехники».* 2012, №1.
26. БУЛЫЧЁВ, А.В., НАВОЛОЧНЫЙ, А.А. Требования к первичным преобразователям сигналов для токовой защиты нового поколения. *«Электротехника»,* 2012, №2. ISSN 0013-5860.
27. ВАЛОБУЕВ, С.В. Анализ изменения постоянных времени нагрева тепловых реле. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства»,* 2016, №3, с.18-20. ISSN 0206-572X.
28. ВАЛОБУЕВ, С.В. Эффективность защиты асинхронных электродвигателей тепловыми реле. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства»,* 2012, №6, с.24-25. ISSN 0206-572X
29. ВОДЯНИЦКИЙ, Ю.Г. *Методы расчета технических параметров аппаратов защитного отключения*. Научные труды ВНИИ Электрификации с/х , 1984, т. 62.
30. ВОДЯНИЦКИЙ, Ю.Г. Усовершенствование устройств защитного отключения. *«Промышленная энергетика»,* 2011, №8. ISSN 0033-1155.
31. ВОЛКОНОВИЧ, Л. Ф., и др. *Автоматизация ресурсосберегающих технологических процессов в сельском хозяйстве.* Кишинев: Издательство A.Ș.M., 2007. ISBN: 978-9975-62-177-9.
32. ВОЛКОНОВИЧ, Л.Ф., ШАПОВАЛОВ, В.И. *Исследования измерительного преобразователя тока как источника сигнала аварийной перегрузки асинхронного электродвигателя.* Сборник научных трудов Академии Наук Молдовы. Институт энергетики. Международная конференция. «Энергетика Молдовы-2016». Часть III, 7с. ISSN 1857-0070.
33. ВОЛКОНОВИЧ,Л.Ф.,ШАПОВАЛОВ,В.И. *Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал обрыва фазы асинхронного электродвигателя.* М: ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5-й международной НТК “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, Часть 1. Москва: 2006. 2с. ISSN 2304-5868.
34. ВОЛЬДЕК, А.М. *Электрические машины*. Л: 1974. 374 с.
35. ГАИНЦЕВ, Ю.В. О повышении надежности при работе электродвигателей на двух фазах. *«Промышленная энергетика».* 1972, № 7.

36. ГАЙДУКЕВИЧ, Н.М., Зимченко, В.А. *Эксплуатация сельскохозяйственных электроустановок.* Минск: «Урожай», 1980. 25с.
37. ГАЛКИН, В.Д. Устройство защиты трехфазных электродвигателей от работы в неполнофазном режиме. *«Электротехническая промышленность».* Серия: Аппараты низкого напряжения. 1975. Выпуск 5(45), с. 21-27.
38. ГАЛКИН, В.Д., ПРУДНИКОВ, В.С. Фазо-импульсные устройства защиты электродвигателей от несимметричных режимов работы. *«Электротехническая промышленность».* Аппараты низкого напряжения. 1981. Выпуск 3(94), с. 26-34.
39. ГАЛКИН, В.Д., ШУЛЬЦ, Н.И. Устройство защиты трехфазных электродвигателей от работы в неполнофазном режиме. *«Промышленная энергетика».* 1975, № 10, с. 14-15.
40. ГАЛЮК,А.С.*Исследования не полнофазных режимов работы сельскохозяйственных электроустановок и защиты от них.* Киев: 1970.
41. ГЛУШКОВ, А.М. *Анализ основных причин отказов электродвигателей в условиях сельского хозяйства*. *Приморского края.* Тр./ Приморский с.-х. институт, 1974, выпуск 29, с.162-167.
42. ГЛУШКОВ, А.М. *Исследование закономерностей отказов, в работе электродвигателей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве*. Научные труды. Приморский с.-х. институт, 1975, выпуск 38, с.100-102.
43. ГОСТ 15150-74. Двигатели серии 4А. Климатические условия.
44. ГОСТ 19348-74. Изделия электротехнические сельскохозяйственного назначения. Общие технические условия.
45. ГОСТ 19377-78. Надежность в технике. Термины.
46. ГОСТ 19523-74. Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые серии 4А мощностью 0,06 до 400 кВт. М.: Изд-во стандартов, 1974.
47. ГРАМАТОВИЧ, Э.К. *Исследование влияния режимов работы электродвигателей животноводческих ферм на срок их службы.* Челябинск: 1975. 222 с.
48. ГРУНДУЛИС, А.О., БАТАНОВ, В.С., КУРБАТОВА, Г.С., и др. *Влияние условий эксплуатации на надежность электродвигателей.* В кн. Асинхронные двигатели. Тр./НИПТИЭМ, Владимир: 1974, выпуск 3, с. 261-267.
49. ГРУНДУЛИС, А.О., ЗЕЙБОТ, В.В. Использование напряжения нулевой последовательности для защиты электродвигателей. Рига: «Падомью Латвияс лауксаймниеба». 1973, № 8, с. 43-44.
50. ГРУНДУЛИС, А.О., ЗЕЙБОТ, В.В. *Методика расчета технологического ущерба при аварии электродвигателей.* Тр./ЛСХА, 1976, выпуск 110, с. 3-7.

51. ГРУНДУЛИС, А.О., ЗЕЙБОТ, В.В. *Сравнительный анализ и классификация защит электродвигателей сельскохозяйственного назначения.* Тр./ЛСХА, 1976, выпуск 92, с. 55-59
52. ГРУНДУЛИС, А.О., КАЗИМИР, А.П. Проблемы защиты электродвигателей в сельском хозяйстве. *«Электротехника».* 1980, № 9, с. 49-51.
53. ГУРЕВИЧ, В. Р. Микропроцессорные реле защиты. Новые перспективы или новое проблемы. *«Новости электротехники».* 2005, №6.
54. ДАНИЛОВ, В.Д. Классификация устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 1987, №6. С.34-36.
55. ДАНИЛОВ, В.Д. Тиристорная схема защиты электродвигателя от перегрева. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 1978, № 2, с. 43.
56. ДАНИЛОВ, В.Н. *Зашита электродвигателей.* Челябинск: 1995. 156 с.
57. ДАНИЛОВ, И.А. *Общая электротехника с основами электроники*. М.: «Высшая школа», 2000. с 265.
58. ДЕМИРЧЯН, К.С. *Теоретические Основы Электротехники*. М: «Высшая Школа», 2007. ISBN 978-5-388-00410-9.
59. ДОЙНИКОВ ,А.С. *Краткий справочник метролога.* М: Стандарт, 1991.107 с.
60. ЖИТАРЬ, Н.Д., МИШИН, В.И. ШАПОВАЛОВ, В.И., и др. *Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы*. А.С. №807435, Б.И. №7 от 23.02.81.
61. ЖИТАРЬ, Н.Д., МИШИН, В.И., ШАПОВАЛОВ, В.И., и др. *Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы.* А.С. №877691, Б.И. № 40 от 30.10.81.1
62. ЗАВЬЯЛОВА, М.П. *Методы научного исследования.* Учебное пособие. ББК 87я 73-1 Томск: ТПУ, 2007. 160 с. УДК 165(075.8).
63. ЗАЙЦЕВ, Ю.М., ИВАНОВ, И.П., НИКОЛАЕВ, Н.Н. Исследование стабильности времени срабатывания устройств на основе термобиметалических элементов. *«Электротехника»*, 2014, №4. ISSN 0013-5860.
64. ЗЕЙЛИДЗОН, Е.Д. 0 защите электродвигателя от работы на двух фазах. *«Электричество».* 1963, № 8, с.16-18.
65. ЗОРИЧЕВ, А. К. Устройство защиты от импульсных перенапряжений. *«Новости электротехники».* 2014, №2.
66. ИВАНОВ, А. И., КУЛИКОВ, А.А. *Контрольно-измерительные приборы в сельском хозяйстве.* М: «Колос», 1984. с. 351.

67. ИТКИН, Б.А. *Инструкция по определению экономической эффективности новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в электротехнической промышленности.* М: 1979. 71 с.
68. ИТКИН, Б.А. *Исследование влияния аварийных режимов и защиты на надежность асинхронных электродвигателей.* Томск: 1987.
69. КАЗИМИР, А.П., КЕРПЕЛЕВА, И.Е. Загрузка электродвигателей на животноводческих фермах. *«Техника в сельском хозяйстве».* 1976, №3, с. 16-20.
70. КАЗИМИР, А.П., КЕРПЕЛЕВА, И.Е. *Исследование надежности электроприводов на животноводческих фермах.* В кн. Эксплуатация электроустановок и техника безопасности в сельском хозяйстве. М: ВИЭСХ, 1982. с. 31-32.
71. КАЛИНИН, А.Ф. Выбор средств защиты электрических машин. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства»,* 2018, №2, с.14-16. ISSN 0206-572X.
72. КАМНЕВ, В.Н. *Чтение схем и чертежей в электроустановках.* М: Издательство «Высшая школа», 1989. 74 с.
73. КАЦМАН, М.М. *Электрические машины.* М.: «Высшая школа», 2003, 463с.
74. КИНАКИН, Н.С., КОГАН, Ю.М. Технико-экономические вопросы электрификации с/х. *«Техника в сельском хозяйстве»,* 1982, №, с. 12-17.
75. КНЯЗЕВ, Б.А., ЧЕРКАССКИЙ, В.С. *Обработка экспериментальных данных.* Новосибирск: НГУ, 1990. 208 с.
76. КОЛОМОЙЦЕВ, К.В. *Устройство для защиты трехфазных электродвигателей от работы на двух фазах.* М: «Электрика», 2009, №1-2. С.30-32. ISSN 1684-2472.
77. КОПЫЛОВ, И.П. *Проектирование электрических машин*. М: Энергия, 1980. 496с.
78. КОПЫЛОВ, И.П., МАМЕДОВ, Ф.А. *Математическое моделирование асинхронных машин.* М: «Энергия», 1973. 208с.
79. КОРН, Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М: «Наука», 1968. 720 с.
80. КОСТРУБА С.И. Проверка выравнивания электрических потенциалов на животноводческих фермах. *«Техника в сельском хозяйстве».* 1978, № 2, с. 30-33.
81. КОСТЮК, В.Н. *Сравнение проектных и действительных характеристик парка электродвигателей хозяйств.* Сб. научных работ. Саратовский с.-х. институт, 1978. Выпуск 119. с. 34-36.
82. КРАВЧИК, А.Э. *Справочное пособие. Асинхронные двигатели серии 4А*. «Энергия»: 1974. 147 с.

83. КУЙБЫШЕВ, А.Б. *Надежность асинхронных двигателей общепромышленного применения.* М: Изд-во Стандартов, 1972. 104 с.
84. КУЛИКОВ, А.Л., КОЛОБИНОВ, П.А. Цифровые измерительные органы элементов дистанционной защиты. *«Промышленная энергетика»,* 2013, №12. ISSN 0033-1155.
85. КУНЦ, Х.И. *Методы физических измерений*. М: Изд-во «Мир», 1989. 323 с.
86. ЛАСКИН, Д. К. Диагностика обрыва фазы. *«Новости электротехники».*2011, № 2.
87. ЛЕВКО, А.Н., СОБОР, И.В. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Электронное устройство защиты асинхронных электродвигателей*. Тезисы доклада, НТК КТУ, Кишинев:1989. 2 с.
88. ЛЕВКО, А.Н., СОБОР, И.В., ШАПОВАЛОВ, В.И. и др. *Устройство для защиты погружного электродвигателя от перегрузок, обрыва фазы и сухого хода*» А.С. № 1410175, 1987.
89. ЛЕВКО, А.Н., СОБОР, И.В., ШАПОВАЛОВ, В.И. *Гармоники насыщения асинхронных двигателей в динамических и аварийных режимах.* Тезисы доклада У ВНТК «Динамические режимы работы асинхронной машины», Каунас: 1988. 1 с.
90. ЛИППЕ, Р. *Измерения в энергетической электронике.* М: «Энергоатомиздат», 1986. 164 с.
91. МАЗУХА, Н.А. КАРТАВЦЕВ, В.В. Обеспечение работоспособности однофазных и трехфазных потребителей при режиме обрыва фазы питающей сети. *«Техника в сельском хозяйстве»,* 2012, №4, стр. 19-22. ISSN 0131-7105.
92. МАРТЫНЕНКО, И.И., КОРЧЕМНЫЙ, Н.А., МАШЕВСКИЙ, В.П. Влияние режимов работы на эксплуатационную надежность электроприводов. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 1981, №2. с.29-33.
93. МАРТЫНОВ, А.В., ЭЙДИС, А.А., ЛЕБЕДЕВ, С.Ф. *Коэффициент нагрузки электродвигателей приводов сельскохозяйственных машин.* НТБ по электрификации с/х. ВНИИ электрификации сельского хозяйства, М: 1976, выпуск 28, стр. 18-25.
94. Материалы Национального Бюро статистики РМ. Кишинев: 1995-2017 г.
95. *Методические рекомендации по определению ущерба сельскохозяйственному производству от перерывов в подаче электроэнергии.* М: ВИЭСХ, 1974. 26 с.
96. МИХАЛЬЧУК, А.Н., КСЕНЗ, Н.В. *Исследование нагрузочных диаграмм электроприводов сельскохозяйственных машин,* Тр./ВНИИМЭСХ. Вопросы механизации и электрификации сельскохозяйственного производства, Зерноград: 1972. с. 246-254.

97. МИХАЛЬЧУК, А.Н., КСЕНЗ, Н.В. *Режимы работы и мощность электропривода сельскохозяйственных машин.* В кн. «Электропривод сельскохозяйственных машин и оборудования». М: ВИЭСХ, 1972. с. 33-35.
98. МИШИН, В. И, СОБОР, И. В., ЗАБУДСКИЙ, Е. И. *Математическое моделирование статических ферромагнитных устройств.* Кишинев: «Штиинца», 1981, 130с.
99. МИШИН, В.И. *Статические нелинейные цепи с вращающимся магнитным полем.* Кишинёв: «Штиинца», 1973, 128 с.
100. МИШИН, В.И. ШАПОВАЛОВ, В.И., *Исследование эффективности работы электродвигателей в условиях сельского хозяйства Молдавии*. Отчет НИР. КПИ им. Лазо. Инв. №868508 № ГР 800059075. МолдНИИНТИ. Кишинев: 1980, 55с.
101. МИШИН, В.И., СОБОР, И.В., ШАПОВАЛОВ, В.И. *Математическая модель асинхронного двигателя для исследования аварийных режимов.* Тезисы доклада ВНТК «Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов» Днепродзержинск: 1985, 2 с.
102. МИШИН, В.И., СОБОР, И.В., ШАПОВАЛОВ, В.И. *Математическая модель асинхронной машины.* Библиотечный указатель депонированных рукописей. Кишинев: МолдНИИНТИ, 1986. № I, 21с.
103. МИШИН, И.С. *Оценка надежности электродвигателей на свинофермах и комплексах.* Труды ВСХИЗО, М: 1976, выпуск 126, с. 27-34.
104. МИШИН, И.С. *Оценка надёжности электродвигателей на свинофермах и комплексах.* Труды ВСХИЗО, М: 1977, выпуск №128, с. 36-41.
105. МИШИН, И.С. *Условия эксплуатации электрических двигателей на свинофермах и животноводческих комплексах.* Труды ВСХИЗО, М: 1975. Выпуск 101. с.9-16.
106. МИШИН,В.И.,СОБОР, И. В. *Моделирование аварийных режимов электродвигателей* в с/х. Кишинев: «Штиинца», 1991. 106 с.
107. МУСИН, А.М. *Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты*. М: Колос, 1979. 112 с.
108. МУСИН, А.М. Повысить надежность электродвигателей в сельском хозяйстве. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 1981, № 9, с. 1-3.
109. МУСИН, А.М. Пути повышения надежности электропривода в сельском хозяйстве. *«Электротехника».* 1978, №11, с.10-12.
110. МУСИН, А.М., КОРОЛЕВ, Ю.П., ВОРОНИН, Е.А. и др. Определение ущерба из-за отказов электропривода линий кормоцеха. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 1981, № 8, с. 33-35.

111. МУСИН, А.М., ПАНЬКИН, В.В. Области применения тепловой и встроенной температурной защит. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 1977, № 5, с. 40-42.
112. МУСИН, А.М., ПАНЬКИН, В.В. Области применения тепловой и встроенной температурной защит. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 1977, № 5, с. 40-42.
113. ОВЧАРОВ, В.В. *Исследование перегрузочных характеристик асинхронных электродвигателей и защитных характеристик тепловых реле.* Тр./МЭИ, 1972, выпуск 103, с.140-145.
114. ПАНКИН, В.В., БОРИСОВ, Ю.С. *Определение срока службы электродвигателей и пускозащитной аппаратуры на животноводческих фермах.* Научные труды /ВИЭСХ, 1979, том 48, с.58-63.
115. ПАШКОВ, Н.И. Перспективные направления развития асинхронных двигателей малой мощности. *«Электротехника»,* 2014, №2. ISSN 0013-5860.
116. ПЕТРОВ, Г.Н. *Электрические машины.* М-Л: «Госэнергоиздат», 1973. 326 с.
117. ПИЭТС,Т.Я., ЛЕППА, Я.И. *Аварийность асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве Эстонской ССР.* Тр./Эстонский с.-х. Академии, 1977, с. 114-120.
118. *Правила устройства электроустановок.* Изд. 5-ое. М: «Атомиздат», 1977. 374 с.
119. ПРИЩЕП, Л.Г., ЩИЧКОВ, Л.П. *Влияние качества напряжения на работу электропривода.* В кн. Электропривод сельскохозяйственных машин и оборудования. М: ВИЭСХ, 1972, с. 35-37.
120. ПРЫГУНОВ, Ю.М., НОВАК, В.А., Сырых Г.П. *Микроклимат животноводческих и птицеводческих зданий.* Киев: «Будевильник», 1986.
121. ПЯСТОЛОВ, А.А., БОЛЬШАКОВ, А.А., ГРАМАТОВИЧ, Э.К., и др. *Методика определения срока службы изоляции электродвигателей, работающих на животноводческих фермах в кратковременном режиме.* Тр./ЧИМЭСХ/, вып. 83, ч.2, Челябинск: 1973, с. 17-23.
122. РАДИН, В.И., КУРБАТОВА, Г.С., СТЕПАНОВ, М.Н. Электродвигатели для сельского хозяйства. *«Электротехника»,* 1978, №11, с.12-16.
123. РАЙКИН, В.Е., КОБЗЕВ, А.С., СЕРЕДА, А.Т. Построение новых защит с применением микропроцессорной техники на основе анализа характера изменения мгновенной мощности. *«Электротехника»,* 2015, №4. ISSN 0013-5860.
124. РОСЛЯКОВ, Г.В., КНЯЗЕВ, Б.А. *Методы обработки экспериментальных данных.* Новосибирск: изд-во НГУ, 1985. 216 с.

125. РУМШИНСКИЙ, Л.З. *Математическая обработка результатов экспериментов*. М: изд-во «Наука», 1971. 192 с.
126. РУСАНОВ, В.И., ГОРЕЛИК, Е.З., МОИСЕЙЧУК, В.А. Режимы работы и эксплуатационная надежность электродвигателей серии 4А в сельском хозяйстве. *«Электротехническая промышленность»,* серия/Электрические машины/. 1980, №12(118), с. 14-16.
127. РЫЖКОВ, Ю.И. *Работа над диссертацией по техническим наукам.* С-Петербург: 2007. 511 с. ISBN 5-94157-804-0
128. СИБИТОВ, Р.А. *Основы научных исследований.* Учебное пособие. Челябинск: 2002. 138 с.
129. СИЛАЕВ, М.А., ТУЛЬСКИЙ, В.Н., КАРТАШОВ, И.И. Влияние не симметрии напряжений на характеристики асинхронных двигателей. *«Электротехника»,* 2014, №5. ISSN 0013-5860.
130. СИРАЯ, Т.Н., ГРАНОВСКИЙ, В.А. *Методы обработки экспериментальных данных при измерениях*. Л: «Энергоатомиздат», 1990. 265 с.
131. СЛОБОДКИН, А.Х. Совершенствование технических средств защиты в сетях напряжением ло 1000 В. *«Промышленная энергетика»,* 2011, №1. ISSN 0033-1155.
132. СОБОР, И.В., ЖИТАРЬ, Н.Д., ШАПОВАЛОВ, В.И. *Устройство для защиты асинхронных электродвигателей от аварийных перегрузок и обрыва фазы.* В кн. Ученые высшего учебного заведения Молдавии народному хозяйству. РИО МолдНИИНТИ, Кишинев: 1985. 2 с.
133. СОЛОВЬЁВ, Д.Б., КУВШИНОВ, Г. Е. Защита электротехнических комплексов от токов обратной последовательности. *«Промышленная энергетика»,* 2011, №3. ISSN 0033-1155.
134. СОЛОВЬЁВ, Н.И. Измерительный преобразователь тока. *«Промышленная энергетика»,* 2016, №1. ISSN 0033-1155.
135. СОМОВ, И.Я., ВАЛОБУЕВ, С.В. Защита асинхронных двигателей от не нормальных режимов работы. *«Техника в сельском хозяйстве»,* 2012, №2, стр. 20-21. ISSN 01-31-7105.
136. СОРКИНД,, М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы *«Новости электротехники».* 2005, №2. (2010, №11)
137. СУДНИК, Ю.А., КАБДИН, Н.Е. *Повышение эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве*. Аграрная энергетика в XXI-м веке. Минск: УП «Технопринт», 2001. с. 313-315.

138. СУДНОВА, В.Н. Допустимые отклонения напряжения. («Нормы качества электроэнергии» ГОСТ Р 54149-2016) *«Новости электротехники».* 2018, №3.
139. СУШКО, В.Р. Микропроцессорные устройства в аппаратах защиты. *«Новости электротехники».* 2015, №1.
140. СЫРЫХ, Н.Н. НЕКРАСОВ, А.И. Анализ не полнофазного режима работы асинхронного двигателя. «Техника в сельском хозяйстве», 2002, №2, с. 8-13.
141. СЫРЫХ, Н.Н., НЕКРАСОВ, А.И. Определение параметров электродвигателя при обрыве фазы. *«Техника в сельском хозяйстве»,* 2001, №2, с. 20-23. ISSN 0131-7105.
142. Типовой проект 801-01-114.91. Ферма на 800 голов КРС.
143. Типовой проект 801-01-57.85. Молочная ферма на 400 голов КРС.
144. Типовой проект 801-02-116.90. Ферма на 200 голов КРС.
145. Типовой проект 801-06-9.84. Кормоприготовительный цех для КРС
146. Типовой проект 802-01-49.91. Ферма на 6000 голов свиней.
147. Типовой проект 819-98. Ферма на 24000 голов свиней.
148. Тищенко А.К. *Влияние не симметрии подведенных напряжений на энергетические показатели асинхронного двигателя.* Электрооборудование с.-х. комплексов. Сб. научных трудов МИИСП, М: 1979. С. 3-8.
149. ТУБИС, Я.Б. Асинхронные двигатели со встроенной температурной защитой. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства».* 1973, № 10, с. 28-30.
150. ТУБИС, Я.Б., БЕЛОВ, Г.К. К вопросу о защите асинхронных двигателей в условиях сельскохозяйственного производства. *«Электротехника».* 1974, № 12.
151. ТУБИС, Я.Б., БЕЛОВ, Г.К. *Температурная защита асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве.* М: «Энергия», 1977. 104 с.
152. ФИЛЬЦ, Р.В. *Преобразовательные устройства в тиристорном электроприводе. Общий метод режимных расчетов нелинейных электромеханических устройств*. Кишинев: «Штиинца» , 1977. 128 с.
153. ФИЛЬЦ, Р.В. *Математические основы теории электрических преобразователей*. Киев: «Наукова думка», 1979. 203с.
154. ХРЕННИКОВ, А.В. Оценка технического состояния силового электрооборудования с использованием программных средств и информационных технологий. *«Промышленная энергетика»,* 2015, №3. ISSN 0033-1155.
155. ХРЕННИКОВ, А.С. Техническое состояние электрооборудования (оценка погрешности измерений). *«Новости электротехники».* 2015, №1.

156. ШАЛИН, А.И. Микропроцессорные реле защиты. Анализ эффективности и надежности. *«Новости электротехники».* 2006, №2.
157. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Краткий анализ парка асинхронных электродвигателей, применяемых в сельском хозяйстве РМ*. Сборник научных трудов 6-й международной НТК, часть 1. Кишинев: ГАУРМ, 2015, 2с. ISSN 1857-0004.
158. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Универсальное защитное устройство.* Сборник научных трудов ГАУРМ, 46-й выпуск, часть 1. Кишинев: 2018, 5с. ISSN 1857-0004.
159. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Асинхронные двигатели современных серий как не линейные системы - источники напряжения высших гармоник в нулевом проводе.* Кишинэу: ГАУРМ, "Ştiinţa agricolă", 2019. Выпуск 2, с.125-130. ISSN 1857-0003.
160. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Математическая модель асинхронного трехфазного электродвигателя в условиях насыщения магнитной системы.* Сборник трудов 6-й международной НТК, часть1. Кишинев: ГАУРМ, 2015, 4с. ISSN 1857-0004.
161. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал в устройствах защиты электрических двигателей.* Сборник научных трудов ГАУРМ, Кишинев: 2000. 1с.
162. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Некоторые результаты исследований параметров системы «нуль сети 220/380 – нуль электродвигателя».* М: ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5 международной НТК, "Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве",. Часть 1. 2006, 4 с. ISSN 2304-5868
163. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Некоторые результаты расчета магнитного состояния асинхронных электродвигателей.* Тез. доклада XX НТК КПИ, Кишинев: 1986, с.5.
164. ШАПОВАЛОВ, К.А. *Защита электродвигателей от тепловых перегрузок.* НТБ по механизации и электрификации животноводства. Запорожье: 1977, выпуск 8, с.86-91.
165. ЮНДИН, М.А. Устройство защиты электродвигателей от несимметричных и не полнофазных режимов работа. *«Информационный листок»* №2. Ростов: 2000, с.2.
166. ЮСУПОВА, А.М. Повышение эффективности защиты электродвигателей погружных насосов. *«Механизация и электрификация сельского хозяйства»,* 2013, №3. с.19-20. ISSN 0206-572X.
167. ЯНЧЕНКО, С.А. Анализ гармонической эмиссии основных видов низковольтных электроприёмников. *«Промышленная энергетика»,* 2014, №8. ISSN 0033-1155.

c) на английском языке

168. BEATY, H. Wayne. *Motors require voltage limits.* Elec. World, 2008, v.189, №5, p. 52

169. BERZAN, V. *Multilevel Converters and Drives with Space-Vector Modulation and Voltage Waveform Symmetries.* Abstract Proceedings of the IEEE International Conf. on Applied and Theoretical Electricity (ICATE'2014) p. 45. ISBN 978-985-6456-92-6.
170. ERHAN, F. *Influence of asymmetrical modes on indexes of the functional reliability of distributive systems.* Journal of Sustainable Energy. Volume X - Nr. 1 from 2019. ISSN 2284-6999.
171. ERHAN, F. *Use of methods Godunov for valuation of transients process in electric power devices.* International Conference, Oxford: 1999, p. 37-40.
172. NOURS, D. *Transient Surges and Motor Protection*. IEEE. Transaction on Industry Applications, 2001, Vol. 1A-15, №6, p. 606-610.
173. PARKASH, G. Elektrical India, 2003, v. 19, №16, p. 9-14.
174. POSTOLATY, V., BERZAN V. *Mode of Operation of the Republic of Moldova Power System with Back-to-Back Installation at the Substation Vulcanesti*. "Problemele energeticii regionale". Revisit electronica № 3(8), 2008. ISSN 1857-0070.
175. VOLCONOVICI, L., et. al. *Mathematical Model of the ecological system with the electricity consumption for milk cooling in the Republic of Moldova.* Proceedings of the 8-th International Conference on electro mechanical and power systems. Sielmen: s.n., 2011. ISBN 978-9975-56-625-4.
176. SHAPOVALOV, V. *Universal protection device as an efficient way to increase the operational reliability of asynchronous engines.* "Journal of Engineering Science", 2019, volume 26 (2), p58-65. ISSN 2587-3474.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1.

Количество установленных и вышедших из строя асинхронных двигателей на объектах сельскохозяйственного назначения

Таблица П1.1. Общее количество асинхронных двигателей, установленных в хозяйствах агрокомплекса Молдовы (в том числе количество электродвигателей, вышедших из строя)
Выполнено автором по данным [158]

№ п/п	Районы	Наличие электродвигателей				Поврежденные электродвигатели			
		Всего		В том числе в животнов.		Всего		В том числе в животнов.	
		шт.	кВт.	шт.	кВт.	шт.	кВт.	шт.	кВт.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Бричанский	5597	29006	3708	20636	282	1129	202	832
2	Вулканешский	4794	35109	1352	7760	248	1589	124	361
3	Глодянский	4450	36190	2430	22411	367	1863	205	905
4	Гриориопольский	4732	39211	2895	20503	595	4223	435	2649
5	Дондюшанский	8134	40518	5244	22275	319	1413	196	904
6	Дрокиевский	6201	27858	3006	13126	223	1250	125	510
7	Дуббосарский	4685	23168	2322	7510	258	1292	143	440
8	Единецкий	5654	26280	4101	17610	168	1217	132	809
9	Кагульский	4208	15282	2939	9193	471	1362	196	898
10	Каменский	3564	18674	1825	8260	318	2003	218	1211
11	Каушанский	6053	46916	2212	15055	482	2821	288	1269
12	Кантемирский	1215	6609	409	2201	71	187	42	188
13	Комратский	4571	18694	2947	7579	270	1511	162	575
14	Хынческий	5657	24951	808	8678	332	1464	209	570
15	Криулянский	4307	23120	1983	8266	335	1437	197	606
	ИТОГО:	73822	411586	38181	191063	4739	24761	2874	12727

Продолжение Таблицы П1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	Яловенский	2148	12597	550	2964	111	979	58	284
17	Лазовский	5233	28483	2831	12562	252	728	199	497
18	Леовский	3466	18255	2746	14780	280	0	158	0
19	Ниспоренский	3897	17229	1887	7935	45	217,9	26	118,35
20	Новоаненский	3110	15815	1245	5082	150	858	102	442
21	Оргеевский	8190	0	4819	0	503	0	298	0
22	Резинский	6745	39943	4356	19138	547	3162	0	0
23	Рыбницкий	8133	35440	5223	18353	358	2151	227	926
24	Рышканский	7551	43560	3316	16790	222	1391	150	1255
25	Слободзейский	9575	65460	3242	24322	471	2194	226	1116
26	Сорокский	5277	21214	1955	7066	78	567	59	414
27	Штефан Водэ	6423	30918	3676	13758	691	2801	455	1529
28	Теленешский	4535	23899	3433	12138	357	2991	176	945
29	Фалешский	7022	39232	3773	16775	353	1935	242	1074
30	Флорешский	8145	48015	3646	25977	0	0	0	0
31	Чадыр-Лунский	7450	40300	3744	15320	268	3270	213	2941
32	Чимишлийский	4048	22264	0	0	0	0	0	0
33	Унгенский	5432	28000	3009	14540	267	1259	180	512
	ИТОГО:	106380	530624	53451	227500	4953	24503,9	2769	12053,35

ВСЕГО:	180202	942210	91632	418563	9692	49264,9	5643	24780,35

Таблица П1.2. Сравнительный анализ причин выхода из строя электродвигателей в ряде животноводческих хозяйствах Молдовы

Выполнено автором по данным [158]

№	Наименование хозяйства	Двигателей всего	Двигателей вышло из строя		Двигателей вышло из строя (причина повреждения)							
					Перегрузка		Обрыв фазы		Механическое заклинивание		Прочие	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		шт.	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1	Кагульская СОФ (зона откорма)	86,0	18,0	20,9	5,0	27,8	3,0	16,6	6,0	33,3	4,0	22,3
2	Сорокская СОФ (зона откорма)	96,0	16,0	16,7	5,0	31,3	3,0	18,7	4,0	25,0	4,0	25,0
3	Бульбокская СОФ (зона откорма)	91,0	14,0	15,4	4,0	28,6	2,0	14,3	3,0	21,4	5,0	35,7
4	Единецкая СОФ (зона откорма)	94,0	21,0	22,3	7,0	33,3	4,0	19,0	1,0	4,8	9,0	42,8
5	Карпиненская СОФ (зона откорма)	31,0	5,0	16,1	2,0	40,0	1,0	20,0	0,0	0,0	2,0	40,0

Приложение 2.

Программа расчетов параметров асинхронных двигателей с применением математической модели.

(Выполнено автором).

```
//JOB       EBM51151 PBTDEMS
//DLBL      IJSYSRL
//EXTENT          SYSRLB, OBEM 11…3200,500
//ASSCN     SYSRLB, X"132"
//OPTION    LINK
//EXEC      FFORTRAN
DOS/ES      FORTRAN  IV  V.M 2.2
OPTIONS IN EFFECT
LOAD        =4
DESK        NO
LIST        YES
LISTX       NO
DOS/ES      FORTRAN  IV  V.M 2.2                                    PAGE 1

      РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ  АССИНХРОННОГО   ДВИГАТЕЛЯ
0001                EXTERNAL   FCT, OUTP
0002                DIMENSION          Y (25), DERY (25), PRINT (5), AUX(200)
0003                DIMENSION          A12 (6,13)
0004                REAL          KC
0005                REAL          IK
0006                REAL          ME1(12), MC1(12), MK1(12), MR1(12)
0007                REAL          LE, LC,LK, LR
0008                REAL          NAB, NBC
0009                COMMON        XT, LE, LC ,LK, LR, SE, SC, SK, SR, P, IK (6), K(6), F(13),
                    ZA,  ZB,  ZC,  R2,  OMG,  SF(13,6),  RD,B12(13,13)  A21  (13,6),A11  (6,6),
                    BE2(12),BK2(12),BC2(12),BR2(12),SS(6,6),
0010                READ (1,1000)      (F(I),  I=1,13)
0011        1000    FORMAT             (E10.3)
0012                READ (1,1002)      LE,LC,LK,LR
0013        1002    FORMAT             (4F10.4)
0014                READ (1,1001)      SE,SC,SK,SR
0015        1001    FORMAT             (4F10.7)
0016                READ (1,1020)      W1,W2,RD
0017        1020    FORMAT             (3F10.2)
0018                READ (1,1030)      XDA1, XDB1, XDC1, XDA2  XDB2  XDC2
0019        1030    FORMAT             (6F10.4)
0020                READ (1,700) IK(1),  IK(2),  IK(3),  IK(4),  IK(5),  IK(6)
0021        700     FORMAT              (F10.4)
0022                READ (1,700) KC(1), KC(2), KC(3), KC(4), KC(5), KC(6)
0023                READ (1,701) ZA,     ZB,     ZC,     RD
0024        701     FORMAT              (F10.2)
0025                READ (1,111) B
0026        111     FORMAT             (F3.1)
0027                WRIT               (3,1003) ( F(I),  I=1,13)
```

```
0028        1003   FORMAT      (2X,13E9.3)
0029               WRITE (3,1004)  LE, LC, LK, LR
0030        1004   FORMAT      (2X,4F 10.4)
0031               WRITE       (3,1005) SE, SC, SK, SR
0032        1005   FORMAT      (2X,4F 10.7)
0033               WRITE       (3,1006) W1/ W2, RD
0034        1006   FORMAT      (2X,4F 10.2)
0035               WRITE       (3,1007) XDA1, XDB1, XDC1, XDA2, XDB2, XDC
0036        1007   FORMAT      (2X,6F 10.4)
0037               WRITE       (3,1012) ( IK(I),  I=1,6)
0038        1012   FORMAT      (2X,4E 10.4)
0039               WRITE       (3,1009) ( KC(I),  I=1,6)
0040        1009   FORMAT      (2X,E 10.4)
0041               WRITE       (3,1011) ZA, ZB, ZC, R2
0042        1011   FORMAT      (2X,4F 10.2)
0043               PI=3,1415926
0044               P=PI*100
0045               DO 3   I=1,6
0046               DO 3   J=1,13
0047        3      A12(I,J)=0
0048               A12(I,1)=P*W1
0049               A12(I,2)=P*W1
0050               A12(I,7)=-P*W1
0051               A12(I,8)=-P*W1
0052               A12(2,5)=P*W1
0053               A12(2,6)=P*W1
0054               A12(2,11)=-P*W1
0055               A12(2,12)=-P*W1
0056               A12(3,3)=-P*W1
0057               A12(3,4)=-P*W1
0088               A12(3,9)=P*W1
0059               A12(3,10)=P*W1
0060               A12(4,1)=P*W2
0061               A12(4,2)=P*W2
0062               A12(4,7)=-P*W2
0063               A12(4,8)=-P*W2
0064               A12(5,5)=P*W2
0065               A12(5,6)=P*W2
0066               A12(5,11)=-P*W2
0067               A12(5,12)=-P*W2
0068               A12(6,3)=-P*W2
0069               A12(6,4)=-P*W2
0070               A12(6,9)=P*W2
0071               A12(6,10)=P*W2
0072               DO 6   I=1,6
0073               DO 6   J=1,6
0074        6      A11(I,J)=0
0075               A11(1,1)=XDA1
0076               A11(2,2)=XDB1
0077               A11(3,3)=XDC1
```

```
0078            A11(4,4)=XDA2
0079            A11(5,5)=XDB2
0080            A11(6,6)=XDC2
0081            DO 5   I=1,13
0082            DO 5   J=1,6
0083      5     A21(I,J)=0
0084            A21(1,1)=W1
0085            A21(1,4)=W2
0086            A21(2,1)=W1
0087            A21(2,4)=W2

DOS/ES          FORTRAN  IV  V.M 2.2                                  PAGE 2
0088            A21(3,3)=-W1
0089            A21(3,6)=-W2
0090            A21(4,3)=-W1
0091            A21(4,6)=-W2
0092            A21(5,2)=W1
0093            A21(5,5)=W2
0094            A21(6,2)=W1
0095            A21(6,5)=W2
0096            A21(7,1)=-W1
0097            A21(7,4)=-W2
0098            A21(8,1)=-W1
0099            A21(8,4)=-W2
0100            A21(9,3)=W1
0101            A21(9,6)=W2
0102            A21(10,3)=W1
0133            A21(10,6)=W2
0104            A21(11,2)=-W1
0105            A21(11,5)=-W2
0106            A21(12,2)=-W1
0107            A21(12,5)=-W2
0108            DO 203 I=1,6
0109            DO 203 J=1,13
0110      203   B12(I,J)=A12(I,J)*B
0111            PRINT 91
0112      91    FORMAT (20X "ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ")
0113            PRMT (1)=1.8
0114            PRMT (2)=8,0*PI
0115            PRMT (3)=0,2
0116            PRMT (4)=0,1E-01
0117            XT=1.8
0118            DO 92 I=1,6
0119      92    Y(I)=IK(I)
0120            DO 93 I=1,13
0121      93    Y(I÷6)=F(I)
0122            DO 94 I=1,6
0123      94    Y(I÷19)=KC (I),
0124            DO 96 I=1,25
0125      96    DERY(I)=1.0/25.0
```

```
0126            NDIM=25
0127            CALL  RKCS(PRMT,Y,DERY.NDIM,IHLF,FCT,DUTP,AUX)
0128            IF(IHLF-1.) 81,82,82
0129      82    PRINT 84
0130      84    FORMAT (///40X,"ПРЕРЫВАНИЕ СЧЕТА")
0131            WRITE  (3, 85)IHLF,(Y(I).I=1,6)
0132      85    FORMAT (///2X,"IHLF=", 3,4X,6("IK=",F10.4))
0133      81    CONTINUE
0134            STOP
0135            END
                                                                    PAGE 3
DOS/ES          FORTRAN  IV  V.M 2.2
0001            SUBROUTINE      FCT (X,Y, DERY)
0002            DIMENSION       BE1(12),  BC1(12),  BK1(12), BR1(12),
0003            DIMENSION       A(13,13), SPR(6,6), T(4,4), C(6), RE1(12), RK1(12),
                                RC1(12), RR1(12)
0004            DIMENSION       DKS(6,1), DI(6,1), DF(6,1)
0005            DIMENSION       Y(25),  DERY(25)
0006            REAL            ME1(12), MC1(12), MK1(12), MR1(12)
0007            REAL            LE, LC, LK, LR
0008            REAL            NAB, NBC
0009            COMMON          XT,  LE,  LC,  LK,  LR,  SE,  SC,  SK  ,SR  ,  P,  IK(6),
                KC(6), F(13),   ZA, ZB, ZC ,R2, OMG, SF(13,6),  RD, B12(13,13), A21 (13,6),
                 A11 (6,6), BE2(12),   BK2(12), BC2(12), BR2(12), SS(6,6),
0010            DO  43I=1,6
0011      43    IK (I) = Y(I)
0012            DO  44I=1,13
0013      44    F(I) = Y(1÷6)
0014            DO  42I=1,6
0015      42    KC(I)=Y(1÷19)
0016            DO  100   I=1,12
0017            BE2(I)=F (1) /SE
0018            BE1(I)=ABS (F (I)/SE)
0019            ME1(I)=CHDB (BE1 (I))
0020            RE1(I)=LE*ME1(I)/SE
0021      100   CONTINUE
0022            BC2(1)=(F(1)-F(2)/SC
0023            BC1(I)=ABS((F(1)-F(12))/SC)
0024            MC1(I)=CHDB (BC1 (I))
0025            RC1(I)=LC*MC1(I)/SE
0026            DO  102  I=2,12
0027            BC2(I)=(F(I)-F(I-1))/SC
0028            BC1(I)=ABS((F(I)-F(I-1))/SC)
0029            MC1(I)=CHDB (BC1 (I))
0030            RC1(I)=LC*MC1(I)/SC
0031      102   CONTINUE
0032            BK2(1)=(F(1)-F(2)/SK
0033            BK1(I)=ABS((F(1)-F(12))/SK)
0034            MK1(I)=CHDB (BK1 (I))
0035            RK1(I)=LK*MK1(I)/SK
```

```
0036            DO  103  I=2,12
0037            BK2(I)=(F(I)-F(I-1))/SK
0038            BK1(I)=ABS((F(I)-F(I-1))/SK)
0039            MK1(I)=CHDB (BK1 (I))
0040            RK1(I)=LK*MK1(I)/SK
0041      103   CONTINUE
0042            DO  104  I=1,11
0043            BR2(I)=(F(13)-F(12)-F(I)/SR
0044            BR1(I)=ABS((F(13)-F(12)-F(I))/SR)
0045            MR1(I)=CHDB (BR1 (I))
0046            RR1(I)=LR/SR*MR1(I)
0047      104   CONTINUE
0048            BR2(12)=F(13)/SR
0049            BR1(12)=ABS(F(13)/SR)
0050            MR1(12)=CHDB (BR1 (12))
0051            RR1(12)=LR/SR*MR1(12)
0052            DO  1  I=1,13
0053            DO  1  J=1,13
0054      1     A(I,J)=0.0
0055            A(1,1)=RC1(1)+-RK1(1)+RC1(2)+RK1(2)+RE1(1)+RR1(1)+2*RD
0056            A(1,2)=-RC1(2)-RK1(2)-RD
0057            A(1,12)=-RR1(1)-RC1(1)-RK1(1)-RD
0058            A(1,13)=-RR1(1)
0059            A(2,1)=A(1,2)
0060            A(2,2)=RC1(2)+RC1(3)+RK1(2)+RK1(3)+RE1(2)+RR1(2)+2*RD
0061            A(2,3)=-RC1(3)-RK1(3)-RD
0062            A(2,12)=-RR1(2)
0063            A(2,13)=- RC1(13.2)
0064            A(3,2)=A(2,3)
0065            A(3,3)=RC1(3)+RC1(4)+RK1(3)+RK1(4)+RE1(3)+RR1(3)+2*RD
0066            A(3,4)=-RC1(4)-RK1(4)-RD
0067            A(3,12)=-RR1(3)

DOS/ES          FORTRAN  IV  V.M 2.2                                  PAGE 4
0068            A(3,13)=-RR1(3)
0069            A(4,3)=A(3,4)
0070            A(4,4)=RC1(4)+RC1(5)+RK1(4)+RK1(5)+RE1(4)+RR1(4)+2*RD
0071            A(4,5)=-RC1(5)-RK1(5)-RD
0072            A(4,12)=-RR1(4)
0073            A(4,13)=-RR1(4)
0074            A(5,3)=A(4,5)
0075            A(5,5)=RC1(5)+RC1(6)+RK1(5)+RK1(6)+RE1(5)+RR1(5)+2*RD
0076            A(5,6)=-RC1(6)-RK1(6)-RD
0077            A(5,12)=-RR1(5)
0078            A(5,13)=-RR1(5)
0079            A(6,5)=A(5,6)
0080            A(6,6)=RC1(6)+RC1(7)+RK1(6)+RK1(7)+RE1(6)+RR1(6)+2*RD
0081            A(6,7)=-RC1(7)-RK1(7)-RD
0082            A(6,12)=-RR1(6)
0083            A(6,13)=-RR1(6)
```

```
0084        A(7,6)=A(6,7)
0085        A(7,7)=RC1(7)+RC1(8)+RK1(7)+RK1(8)+RE1(7)+RR1(7)+2*RD
0086        A(7,8)=-RC1(8)-RK1(8)-RD
0087        A(7,12)=-RR1(7)
0088        A(7,13)=-RR1(7)
0089        A(8,7)=A(7,8)
0090        A(8,8)=RC1(8)+RC1(9)+RK1(8)+RK1(9)+RE1(8)+RR1(8)+2*RD
0091        A(8,9)=-RC1(9)-RK1(9)-RD
0092        A(8,12)=-RR1(8)
0093        A(8,13)=-RR1(8)
0094        A(9,8)=A(8,9)
0095        A(9,9)=RC1(9)+RC1(10)+RK1(9)+RK1(10)+RE1(9)+RR1(9)+2*RD
0096        A(9,10)=-RC1(10)-RK1(10)-RD
0097        A(9,12)=-RR1(9)
0098        A(9,13)=-RR1(9)
0099        A(10,9)=A(9,10)
0100        A(10,10)=RC1(10)+RC1(11)+RK1(10)+RK1(11)+RE1(10)+RR1(10)+2*RD
0101        A(10,11)=-RC1(11)-RK1(11)-RD
0102        A(10,12)=-RR1(10)
0103        A(10,13)=-RR1(10)
0104        A(11,10)=A(10,11)
0105        A(11,11)=RC1(11)+RC1(12)+RK1(11)+RK1(12)+RE1(11)+RR1(11)+2*RD
0106        A(11,12)=-RC1(12)-RK1(12)-RD-RR1(1)
0107        A(11,13)=-RR1(11)
0108        A(12,1)=A(1,12)
0109        A(12,2)=A(2,12)
0110        A(12,3)=A(3,12)
0111        A(12,4)=A(4,12)
0112        A(12,5)=A(5,12)
0113        A(12,6)=A(6,12)
0114        A(12,7)=A(7,12)
0115        A(12,8)=A(8,12)
0116        A(12,9)=A(9,12)
0117        A(12,10)=A(10,12)
0118        A(12,11)=A(11,12)
0119        A(12,12)=RC1(1)+RC1(12)+RK1(1)+RK1(12)+RE1(1)+RR1(1)+2*RD+
            RR1(2)+RR1(3)+RR1(4)+RR1(5)+RR1(6)+RR1(7)+RR1(8)+RR1(9)+
            RR1(10)+RR1(11)
0120        A(12,13)=RR1(2)+RR1(3)+RR1(4)+
            RR1(5)+RR1(6)+RR1(7)+RR1(8)+RR1(9)+RR1(10)+RR1(11)
0121        A(13,1)=A(1,13)
0122        A(13,2)=A(2,13)
0123        A(13,3)=A(3,13)
0124        A(13,4)=A(4,13)
0125        A(13,5)=A(5,13)
0126        A(13,6)=A(6,13)
0127        A(13,7)=A(7,13)
0128        A(13,8)=A(8,13)
0219        A(13,9)=A(9,13)
0130        A(13,10)=A(10,13)
```

```
0131            A(13,11)=A(11,13)
0132            A(13,12)=A(12,13)
0133            A(13,13)=RR1(2)+RR1(3)+RR1(4)+RR1(5)+RR1(6)+RR1(7)+
                RR1(8)+RR1(9)+ RR1(10)+RR1(11)+RR1(12)

DOS/ES          FORTRAN  IV  V.M 2.2                                  PAGE 5
0134            DO    401      J=1,6
0135            DO    401      I=1,13
0136      401   SF( I, j ) = A21 (I, j)
0137            CALL   GELG (SF, A, 13, 6, 0.01,IER)
0138            DO  14I=1 ,16
0139            DO  12J=1 ,16
0140            SPR (I , J ) = 0.0
0141            DO  9  L=1 , 13
0142            SPR (I , J ) =   SPR (I , J ) *B 12(I , L)*SF(L , J)
0143      9     CONTINUE
0144      12    CONTINUE
0145      14    CONTINUE
0146            DO  204       I=1,16
0147            DO  204       J=1,16
0148      204   SS ( I , J ) = A 11 ( I , J ) + SPR ( I , J )
0149            T (1 , 1) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0150            T (1 , 2) = SS (1 , 3) - SS ( 2 , 3) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0151            T (1 , 3) = SS (1 , 4) - SS ( 2 , 4) - SS ( 1, 25)  + SS ( 2 , 5)
0152            T (1 , 4) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0153            T (2 , 1) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0154            T (2 , 2) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0155            T (2 , 3) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0156            T (2 , 4) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0157            T (3 , 1) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0158            T (3 , 2) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0159            T (3 , 3) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0160            T (3 , 4) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0161            T (4 , 1) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0162            T (4 , 2) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0163            T (4 , 3) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0164            T (4 , 4) = SS (1 , 1) - SS ( 2 , 1) - SS ( 1, 2 )  + SS ( 2 , 2 )
0165            OMG = 314.15
0166            PI = 3.1415926
0167            P =  PI *100.
0168            AMP1 =382.
0169            AMP2 = 382.
0170            NAB = SQRT (2. ) *AMP1 *SIN ( K )
0171            NBC = SQRT (2. ) *AMP2 *SIN ( K -2.*PI/3.
0172            C (1) = NAB - ZB * IK (1) -ZB * IK (3) - ZA *IK (1)
0173            C (2) = NBC - ZC * IK (3) -ZB * IK (1) - ZA *IK (3)
0174            C (3) =OMG*SQRT (3.)*KC (6)-R2*( 2.0*IK (4)+ IK (6))
0175            C (4) = - OMG*SQRT (3.)*KC (4)-R2*( 2.0*IK (6)+ IK (4
```

```
0176                CALL  SIMQ (T, C, 4, KC )
0177                C (5) = - C (1) - C (2)
0178                C (6) = - C (3) - C (4)
0179                DI ( 1 , 1 ) = C ( 1 )
0180                DI ( 2 , 1 ) = C ( 5 )
0181                DI ( 3 , 1 ) = C ( 2 )
0182                DI ( 4 , 1 ) = C ( 3 )
0183                DI ( 5 , 1 ) = C ( 6 )
0184                DI ( 6 , 1 ) = C ( 4 )
0185                DO  19  I = 1 , 13
0186                DO  18  J = 1 , 1
0187                DF ( I , J ) = 0.0
0188                DO 17  L =  1 , 6
0189                DF (I , J ) = DF ( I , J ) + SF (I , L )* DI (L , J )
0190          17    CONTINUE
0191          18    CONTINUE
0192          19    CONTINUE
0193                DO    23       I=1,6
0194                DO    22       J=1,1
0195                DKS ( I , J ) = 0.0
0196                DO    21       L = 1 , 6
0197                DKS ( I , J ) = DKS ( I , J ) * SS (I , L ) * DI  (L , J)
0198          21    CONTINUE
0199          22    CONTINUE
0200          23    CONTINUE
0201                GO TO  I = 1 , 6
0202          70    DERY ( I ) = DI ( I , 1 )
0203                DO    71       I = 1 , 13

DOS/ES    FORTRAN  IV  V.M 2.2                                          PAGE 6
0204          71    DERY (1 ÷ 6) = DF ( I , 1)
0205                DO    72       I = 1 , 6
0206          72    DERY (1 ÷ 19) = DKS  (I , 1 )
0207                RETURN
0208                END
0001                SUBROUTINE  OUTP  ( X , Y , DERY , IHLF , NDIM , PRMT )
0002                DIMENSION PRMT( S ),  Y (25 ), DERY (25),AUX (200)
0003                COMMON A , LE, LC, LK, LR, SE, SC, SK, SR,P,
                    IK (6), KC (6), F (13), ZA, ZB, ZC, R2, OMG, SF (13 , 6 ,) RD,
                    B 12 (13, 13),
                    A 21 (13 , 6 ) A 11 (6, 6 ), BE2 (12), BK2 (12), BC2  (12), BR2 (12),  SS (6 ,
0004                PI = 3.1415926
0005                IF (X , LT , A )  GO TO  34
0006          36    WRITE ( 3, 61 ) ( X , (Y ( I ) , I = 1 , 19 ))
0007          61    FORMAT (2X , " X = ", F 9.5  , 4X , 6 ( 2X , "I = ", F10.4)/2X 13 (E9.3))
0008                WRITE ( 3, 31 ) ( X ,  (Y ( 1 ÷ 19) , I = 1 ,6))
0009          51    FORMAT //2X , " X = ", F 7.3 , 4X , 6 ( 2X , "KC= ", F10.2))
0010                WRITE ( 3, 39 ) ( X ,  (DERY ( 1 ÷ 19) , I = 1 ,6))
0011          39    FORMAT //2X , " X = ", F 7.3 , 4X , 6 ( 2X , "DKS= ", F10.2))
```

```
0012            PRINT 27
0013      27    FORMAT (20X , " ИНДУКЦИЯ НА УЧАСТКАХ")
0014            DO      45      I = 1 , 12
0015      45    WRITE (3 ,35 )  I , BE2 ( I ) , BK2 ( I ) , BC2 ( I ) , BR2 ( I )
0016      35    FORMAT (2X , " I = ", 12 , 2X , "BE = ", F10.6 , 2X 1"BK = " F 10.6 ,
                2X , "BC = ", F10.6 , 2X 1"BR = " F 10.6 ,
0017            PRINT 11
0018            FORMAT (40X , " МАТРИЦА  SS")
0019            DO      95      I = 1 , 6
0020      95    WRITE (3 ,10)  SS (I , J ), J  = 1 , 6
0021      10    FORMAT ( 10X , 2X , 6 (F 15.6) ),
0022            A = A +0,3
0023            RETUNN
0024            END
1DOS/ES         FORTRAN  IV  V.M 2.2                                    PAGE 7
0001            FUNCTION    DMDB (H)
0002            A =376,
0003            B = 418.
0004            IF (H ,LE , (1.E - 0.5 0))  GO  TO  88
0005            IF (H ,GT , (1.E - 0.5 0)) GO  TO  89
0006      89    DHDB = A + B * H **10
0007            GO TO   77
0008      88    DHDB = A
0009      77    RETURN
0010            END
```

Приложение 3

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований системы «нуль двигателя – нуль сети»

Таблица П3.1.

					Отсев грубых ошибок								
					(по критерию Граббса-Романовского (β))								
Точка 1													
число измер. N=	5	21,70	Xi =	20,200	21,700	22,000	22,400	22,500					
коэфф. βт=	1,87	20,20											
		22,00	ΔXi =	1,560	0,060	-0,240	-0,640	-0,740		ΔXmax	1,560		
		22,40											
		22,50	ΔX²i =	2,434	0,004	0,058	0,410	0,548					
	∑Xi=	108,80	S=√S²=	0,831					∑ΔX² =	3,452	S² =	∑Δx²/N	0,690
	Среднее (Xср.)=	21,76	ΔXрас =βт*S=	1,554		1,560	≥	1,554					
	арифметич.					грубая ошибка							
повторные расчеты без второго замера													
число измер. N=	4	21,70	Xi =	0,000	21,700	22,000	22,400	22,500					
коэфф. βт=	1,69	0,00											
		22,00	ΔXi =	0,000	0,450	0,150	-0,250	-0,350		ΔXmax	0,450		
		22,40											
		22,50	ΔX²i =	0,000	0,202	0,022	0,063	0,123					
	∑Xi=	88,60	S=√S²=	0,320					∑ΔX² =	0,410	S² =	∑Δx²/N	0,103
	Среднее (Xср.)=	22,15	ΔXрас =βт*S=	0,541		0,450	≥	0,541					
	арифметич.					достоверно							
Точка 2													
число измер. N=	5	19,70	Xi =	19,700	19,600	20,100	20,500	20,700					
коэфф. βт=	1,87	19,60											
		20,10	ΔXi =	0,420	0,520	0,020	-0,380	-0,580		ΔXmax	0,580		
		20,50											
		20,70	ΔX²i =	0,176	0,270	0,000	0,144	0,336					
	∑Xi=	100,60	S=√S²=	0,431					∑ΔX² =	0,928	S² =	∑Δx²/N	0,186
	Среднее (Xср.)=	20,12	ΔXрас =βт*S=	0,806		0,580	≥	0,806					
	арифметич.					достоверно							

Таблица П3.2.

Отсев грубых ошибок

(по критерию Граббса-Романовского (β))

Точка 3													
число измер. N=	5	18,50	Xi =	17,500	17,900	18,100	18,300	18,500					
коэфф. βт=	1,87	18,30											
		17,90	ΔXi =	0,560	0,160	-0,040	-0,240	-0,440					
		17,50											
		18,10	ΔX²i =	0,314	0,026	0,002	0,058	0,194					
	∑Xi=	90,30	S=√S²=	0,344					∑Δx² =	0,592	S² =	∑Δx² / N	0,118
	Среднее (Xср.)=	18,06	ΔXрас =βт*S=	0,643		0,660	≥	0,643					
	арифметич.					грубая ошибка							
повторные расчеты без четвертого замера													
число измер. N=	4	18,50	Xi =	0,000	17,900	18,100	18,300	18,500					
коэфф. βт=	1,69	18,30											
		17,90	ΔXi =	0,000	0,300	0,100	-0,100	-0,300					
		0,00											
		18,10	ΔX²i =	0,000	0,090	0,010	0,010	0,090					
	∑Xi=	72,80	S=√S²	0,224					∑Δx² =	0,200	S² =	∑Δx² / N	0,050
	Среднее (Xср.)=	18,2	ΔXрас =βт*S=	0,378		0,300	≥	0,378					
	арифметич.					достоверно							
Точка 4													
число измер. N=	5	16,30	Xi =	15,700	15,900	16,300	16,300	16,500					
коэфф. βт=	1,87	16,30											
		15,70	ΔXi =	0,440	0,240	-0,160	-0,160	-0,360					
		16,50											
		15,90	ΔX²i =	0,194	0,058	0,026	0,026	0,130					
	∑Xi=	80,70	S=√S²=	0,294					∑Δx² =	0,432	S² =	∑Δx² / N	0,086
	Среднее (Xср.)=	16,14	ΔXрас =βт*S=	0,550		0,440	≥	0,550					
	арифметич.					достоверно							

Таблица П3.3.

Отсев грубых ошибок

(по критерию Граббса-Романовского (β))

Точка 5													
число измер. N=	5	15,50	Xi =	14,700	14,800	15,200	15,200	15,500					
коэфф. βт=	1,87	14,80											
		15,20	ΔXi =	0,380	0,280	-0,120	-0,120	-0,420					
		14,70											
		15,20	ΔX²i =	0,144	0,078	0,014	0,014	0,176					
	∑Xi=	75,40	S=√S²=	0,293					∑ΔX² =	0,428	S² =	∑Δx²/N	0,086
	Среднее (Xср.)=	15,08	ΔXрас =βт*S=	0,547		0,420	≥	0,547					
	арифметич.					достоверно							
Точка 6													
число измер. N=	5	15,50	Xi =	15,000	14,900	15,100	15,300	15,500					
коэфф. βт=	1,87	15,30											
		15,10	ΔXi =	0,160	0,260	0,060	-0,140	-0,340					
		15,00											
		14,90	ΔX²i =	0,026	0,068	0,004	0,020	0,116					
	∑Xi=	75,80	S=√S²=	0,215					∑ΔX² =	0,232	S² =	∑Δx²/N	0,046
	Среднее (Xср.)=	15,16	ΔXрас =βт*S=	0,403		0,340	≥	0,403					
	арифметич.					достоверно							
Точка 7													
число измер. N=	5	15,50	Xi =	15,000	15,200	15,500	15,600	15,700					
коэфф. βт=	1,87	15,60											
		15,20	ΔXi =	0,400	0,200	-0,100	-0,200	-0,300					
		15,70											
		15,00	ΔX²i =	0,160	0,040	0,010	0,040	0,090					
	∑Xi=	77,00	S=√S²=	0,261					∑ΔX² =	0,340	S² =	∑Δx²/N	0,068
	Среднее (Xср.)=	15,4	ΔXрас =βт*S=	0,488		0,400	≥	0,488					
	арифметич.					достоверно							

Таблица П3.4.

Расчет абсолютной ошибки

Точка 1

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √N=	4 2,0000
1	21,70	0,06	0,0036				
2	20,20	1,56	2,4336	$S^2 = (\sum \Delta x^2) / (N-1) =$		0,8630	
3	22,00	-0,24	0,0576				
4	22,40	-0,64	0,4096				
5	22,50	-0,74	0,5476	$S = \sqrt{S^2}$	=	0,9290	
∑	108,80	0,00	3,452				
X сред=	21,76			Sx = S / √N	=	0,4645	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,5	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка прибора	0,15	В
Ошибка измерения:	N=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	1,193737	В
Абсолютная ошибка с округл.	1,2	В

повторные расчеты без второго замера

повторные расчеты

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √N=	3 1,7321
1	21,70	0,45	0,2025				
2	0,00	0,00	0	$S^2 = (\sum \Delta x^2) / (N-1) =$		0,1367	
3	22,00	0,15	0,0225				
4	22,40	-0,25	0,0625				
5	22,50	-0,35	0,1225	$S = \sqrt{S^2}$	=	0,3697	
∑	88,60	0,00	0,41				
X сред=	22,15			Sx = S / √N	=	0,2134	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,5	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка прибора	0,15	В
Ошибка измерения:	N=4	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,78	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,593356	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,593	В

Точка 2

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √N=	4 2,0000
1	19,70	0,42	0,1764				
2	19,60	0,52	0,2704	$S^2 = (\sum \Delta x^2) / (N-1) =$		0,2320	
3	20,10	0,02	0,0004				
4	20,50	-0,38	0,1444				
5	20,70	-0,58	0,3364	$S = \sqrt{S^2}$	=	0,4817	
∑	100,60	0,00	0,928				
X сред=	20,12			Sx = S / √N	=	0,2408	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,5	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка прибора	0,15	В
Ошибка измерения:	N=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,618938	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,619	В

Таблица П3.5.

Расчет абсолютной ошибки

Точка 3

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √N=	4 2,0000
1	18,50	-0,44	0,1936				
2	18,30	-0,24	0,0576	S² = (∑Δx²) / (N-1) =		0,1480	
3	17,90	0,16	0,0256				
4	17,50	0,56	0,3136				
5	18,10	-0,04	0,0016	S = √S²	=	0,3847	
∑	90,30	0,00	0,592				
X сред=	18,06			Sx = S / √N	=	0,1924	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	N=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка измерения	0,494349	В

повторные расчеты без четвертого замера

повторные расчеты

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √N=	3 1,7321
1	18,50	-0,30	0,09				
2	18,30	0,00	0	S² = (∑Δx²) / (N-1) =		0,0633	
3	17,90	0,30	0,09				
4	0,00	0,00	0				
5	18,10	0,10	0,01	S = √S²	=	0,2517	
∑	72,80	0,10	0,19				
X сред=	18,20			Sx = S / √N	=	0,1453	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	N=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,373412	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,373	В

Точка 4

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √N=	4 2,0000
1	16,30	-0,16	0,0256				
2	16,30	-0,16	0,0256	S² = (∑Δx²) / (N-1) =		0,108	
3	15,70	0,44	0,1936				
4	16,50	-0,36	0,1296				
5	15,90	0,24	0,0576	S = √S²	=	0,3286	
∑	80,70	0,00	0,432				
X сред=	16,14			Sx = S / √N	=	0,1643	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	N=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,422294	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,422	В

Таблица П3.6.

Расчет абсолютной ошибки

Точка 5

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √n=	4 2,0000
1	15,50	-0,42	0,1764				
2	14,80	0,28	0,0784	$S^2 = (\sum \Delta x^2) / (N-1) =$		0,1070	
3	15,20	-0,12	0,0144				
4	14,70	0,38	0,1444				
5	15,20	-0,12	0,0144	$S = \sqrt{S^2}$	=	0,3271	
∑	75,40	0,00	0,428				
X сред=	15,08			Sx = S / √N	=	0,1636	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	N=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,420334	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,420	В

Точка 6

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √N=	4 2,0000
1	15,50	-0,34	0,1156				
2	15,30	-0,14	0,0196	$S^2 = (\sum \Delta x^2) / (N-1) =$		0,058	
3	15,10	0,06	0,0036				
4	15,00	0,16	0,0256				
5	14,90	0,26	0,0676	$S = \sqrt{S^2}$	=	0,2408	
∑	75,80	0,00	0,232				
X сред=	15,16			Sx = S / √N	=	0,1204	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	N=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,309469	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,309	В

Точка 7

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		N-1= √N=	4 2,0000
1	15,50	-0,10	0,01				
2	15,60	-0,20	0,04	$S^2 = (\sum \Delta x^2) / (N-1) =$		0,0850	
3	15,20	0,20	0,04				
4	15,70	-0,30	0,09				
5	15,00	0,40	0,16	$S = \sqrt{S^2}$	=	0,2915	
∑	77,00	0,00	0,34				
X сред=	15,40			Sx = S / √N	=	0,1458	

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	N=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,374639	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,375	В

Таблица П3.7. Итоговая таблица статистической обработки экспериментальных данных (по данным Таблиц П3.1 – П3.6)

№ точки на графике	Доверительный интервал			Абсолютная ошибка (В)	Относител. ошибка (%)
1	22,15 - 0,593	< X <	22,15 + 0,593	0,593	2,677
2	20,12 - 0,619	< X <	20,12 + 0,619	0,619	3,077
3	18,20 - 0,373	< X <	18,20 + 0,373	0,373	2,049
4	16,14 - 0,422	< X <	16,40 + 0,422	0,422	2,615
5	15,08 - 0,420	< X <	15,08 + 0,420	0,420	2,785
6	15,16 - 0,309	< X <	15,16 + 0,309	0,309	2,038
7	15,40 - 0,375	< X <	15,40 + 0,375	0,375	2,435

Таблица П3.8. Таблица для построения графика на Рис. 2.6

№ опыта		1	2	3	4	5	6	7
Значение	Расчетное	22,15	20,12	18,2	16,14	15,08	15,16	15,4
параметра	Табличное	22	20	18	16	15	15	15

Приложение 4.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований датчиков тока

Таблица П4.1.

					Отсев грубых ошибок								
					(по критерию Граббса-Романовского (β))								
Точка 1													
число измер. n=	5	2,50	Xi =	2,300	2,400	2,500	2,600	2,700					
коэфф. βт=	1,87	2,40								ΔXmax	0,200		
		2,70	ΔXi =	0,200	0,100	0,000	-0,100	-0,200					
		2,30							∑ΔX²i =	0,100	S² =	∑Δx²i / n	0,020
		2,60	ΔX²i =	0,040	0,010	0,000	0,010	0,040					
	∑Xi=	12,50	S=√S²=	0,141									
	Среднее (Xср.) =	2,5	ΔXрас =βт*S=	0,264		0,200	≥	0,264					
	арифметич.					достоверно							
Точка 2													
число измер. n=	5	5,00	Xi =	4,600	4,900	5,000	5,100	5,200					
коэфф. βт=	1,87	4,60								ΔXmax	0,360		
		4,90	ΔXi =	0,360	0,060	-0,040	-0,140	-0,240					
		5,20							∑ΔX²i =	0,082	S² =	∑Δx²i / n	0,016
		5,10	ΔX²i =	0,000	0,004	0,002	0,020	0,058					
	∑Xi=	24,80	S=√S²=	0,128									
	Среднее (Xср.) =	4,96	ΔXрас =βт*S=	0,240		0,360	≥	0,240					
	арифметич.					грубая ошибка							
повторные расчеты без первогого замера													
число измер. n=	4	0,00	Xi =	0,000	4,900	5,000	5,100	5,200					
коэфф. βт=	1,69	4,60								ΔXmax	0,250		
		4,90	ΔXi =	0,000	0,050	-0,050	-0,150	-0,250					
		5,20							∑ΔX²i =	0,090	S² =	∑Δx²i / n	0,023
		5,10	ΔX²i =	0,000	0,002	0,003	0,023	0,063					
	∑Xi=	19,80	S=√S²=	0,150									
	Среднее (Xср.) =	4,95	ΔXрас =βт*S=	0,254		0,240	≥	0,254					
	арифметич.					достоверно							

Таблица П4.2.

Отсев грубых ошибок

(по критерию Граббса-Романовского (β))

Точка 3													
число измер. n=	5	7,50	Xi =	6,900	7,400	7,500	7,600	7,600					
коэфф. βт=	1,87	7,40								ΔXmax	0,500		
		6,90	ΔXi =	0,500	0,000	-0,100	-0,200	-0,200					
		7,60							∑ΔX²i =	0,340	S² =	∑Δx²i / n	0,068
		7,60	ΔX²i =	0,250	0,000	0,010	0,040	0,040					
	∑Xi=	37,00	S=√S²=	0,261									
	Среднее (Xср.) =	7,4	ΔXрас =βт*S=	0,488		0,500	≥	0,488					
	арифметич.					грубая ошибка							
повторные расчеты без третьего замера													
число измер. n=	4	7,50	Xi =	0,000	7,400	7,500	7,600	7,800					
коэфф. βт=	1,69	7,40								ΔXmax	0,225		
		0,00	ΔXi =	0,000	0,175	0,075	-0,025	-0,225					
		7,80							∑ΔX²i =	0,087	S² =	∑Δx²i / n	0,022
		7,60	ΔX²i =	0,000	0,031	0,006	0,001	0,051					
	∑Xi=	30,30	S=√S²=	0,148									
	Среднее (Xср.) =	7,575	ΔXрас =βт*S=	0,250		0,225	≥	0,250					
	арифметич.					достоверно							
Точка 4													
число измер. n=	5	9,60	Xi =	9,300	9,500	9,500	9,600	9,800					
коэфф. βт=	1,87	9,50								ΔXmax	0,260		
		9,80	ΔXi =	0,240	0,040	0,040	-0,060	-0,260					
		9,30							∑ΔX²i =	0,132	S² =	∑Δx²i / n	0,026
		9,50	ΔX²i =	0,058	0,002	0,002	0,004	0,068					
	∑Xi=	47,70	S=√S²=	0,162									
	Среднее (Xср.) =	9,54	ΔXрас =βт*S=	0,304		0,260	≥	0,304					
	арифметич.					достоверно							

Таблица П4.3.

Отсев грубых ошибок

(по критерию Граббса-Романовского (β))

Точка 5

число измер. n=	5	11,50	Xi =	11,300	11,400	11,500	11,600	11,600					
коэфф. βт=	1,87	11,30								ΔXmax	0,180		
		11,40	ΔXi =	0,180	0,080	-0,020	-0,120	-0,120					
		11,60							∑ΔX²i =	0,068	S² =	∑Δx²i / n	0,014
		11,60	ΔX²i =	0,032	0,006	0,000	0,014	0,014					
	∑Xi=	57,40	S=√S²=	0,117									
	Среднее (Xср.) =	11,48	ΔXрас =βт*S=	0,218		0,180	≥	0,218					
	арифметич.					достоверно							

Точка 6

число измер. n=	5	13,00	Xi =	12,700	12,800	13,000	13,200	13,300					
коэфф. βт=	1,87	13,20								ΔXmax	0,300		
		12,80	ΔXi =	0,300	0,200	0,000	-0,200	-0,300					
		12,70							∑ΔX²i =	0,260	S² =	∑Δx²i / n	0,052
		13,30	ΔX²i =	0,090	0,040	0,000	0,040	0,090					
	∑Xi=	65,00	S=√S²=	0,228									
	Среднее (Xср.) =	13	ΔXрас =βт*S=	0,426		0,300	≥	0,426					
	арифметич.					достоверно							

Точка 7

число измер. n=	5	14,10	Xi =	13,800	13,900	14,100	14,300	14,600					
коэфф. βт=	1,87	14,60								ΔXmax	0,460		
		13,80	ΔXi =	0,340	0,240	0,040	-0,160	-0,460					
		14,30							∑ΔX²i =	0,412	S² =	∑Δx²i / n	0,082
		13,90	ΔX²i =	0,116	0,058	0,002	0,026	0,212					
	∑Xi=	70,70	S=√S²=	0,287									
	Среднее (Xср.) =	14,14	ΔXрас =βт*S=	0,537		0,460	≥	0,537					
	арифметич.					достоверно							

Таблица П4.4.

Отсев грубых ошибок

(по критерию Граббса-Романовского (β))

Точка 8

число измер. n=	5	14,70	Xi =	14,700	14,900	15,000	15,100	15,300					
коэфф. βт=	1,87	14,90								ΔXmax	0,300		
		15,00	ΔXi =	0,300	0,100	0,000	-0,100	-0,300					
		15,10							∑Δx²i =	0,200	S² =	∑Δx²i / n	0,040
		15,30	ΔX²i =	0,090	0,010	0,000	0,010	0,090					
	∑Xi=	75,00	S=√S²=	0,200									
	Среднее (Xср.) =	15	ΔXрас =βт*S=	0,374		0,300	≥	0,374					
	арифметич.					достоверно							

Таблица П4.5.

Расчет абсолютной ошибки

Точка 1

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		n-1=	4
						√n=	2,0000
1	2,50	0,00	0,000				
2	2,40	0,10	0,010	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,0250	
3	2,70	-0,20	0,040				
4	2,30	0,20	0,040				
5	2,60	-0,10	0,010	S = √ S²	=	0,1581	
∑Xi=	12,50	0,00	0,100				
X сред=	2,50			Sx = S / √n	=	0,0791	

Точка 1

Приборная ошибка:			
Класс точности	0,2	%	
Предел шкалы	15	В	
Абсолютная ошибка	0,03	В	
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95	
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57		
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,203176	В	
Абсолютная ошибка с округл.	0,200	В	

Точка 2

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		n-1=	4
						√n=	2,0000
1	5,00	-0,04	0,002				
2	4,60	0,36	0,130	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,0530	
3	4,90	0,06	0,004				
4	5,20	-0,24	0,058				
5	5,10	-0,14	0,020	S = √ S²	=	0,2302	
∑Xi=	24,80	0,00	0,212				
X сред=	4,96			Sx = S / √n	=	0,1151	

Точка 2

Приборная ошибка:			
Класс точности	0,2	%	
Предел шкалы	15	В	
Абсолютная ошибка	0,03	В	
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95	
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57		
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,295829	В	
Абсолютная ошибка с округл.	0,300	В	

повторные расчеты без первогого замера

пересчет

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		n-1=	3
						√n=	1,7321
1	5,00	0,05	0,003				
2	0,00	0,00	0,000	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,0167	
3	4,90	0,15	0,023				
4	5,20	-0,15	0,022				
5	5,10	-0,05	0,002	S = √ S²	=	0,1291	
∑Xi=	20,20	0,00	0,050				
X сред=	5,05			Sx = S / √n	=	0,0745	

Приборная ошибка:			
Класс точности	0,2	%	
Предел шкалы	15	В	
Абсолютная ошибка	0,03	В	
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95	
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57		
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,191556	В	
Абсолютная ошибка с округл.	0,190	В	

Таблица П4.6.

Расчет абсолютной ошибки

Точка 3

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		
					n-1=	4
					√n=	2,0000
1	7,50	-0,10	0,010			
2	7,40	0,00	0,000	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,0850
3	6,90	0,50	0,250			
4	7,60	-0,20	0,040			
5	7,60	-0,20	0,040	S = √S² =		0,2915
∑Xi=	37,00	0,00	0,340			
X сред=	7,40			Sx = S / √n =		0,1458

Точка 3

Приборная ошибка:			
Класс точности	0,2	%	
Предел шкалы	15	В	
Абсолютная ошибка	0,03	В	
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95	
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57		
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,374639	В	
Абсолютная ошибка с округл.	0,370	В	

повторные расчеты без третьего замера

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		
					n-1=	3
					√n=	1,7321
1	7,50	0,03	0,001			
2	7,40	0,13	0,016	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,0447
3	0,00	0,00	0,000			
4	7,60	-0,07	-0,075			
5	7,60	-0,07	-0,075	S = √S² =		0,2113
∑Xi=	30,10	0,00	0,134			
X сред=	7,53			Sx = S / √n =		0,1220

повторные расчеты

Приборная ошибка:			
Класс точности	0,2	%	
Предел шкалы	15	В	
Абсолютная ошибка	0,03	В	
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95	
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57		
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,313591	В	
Абсолютная ошибка с округл.	0,314	В	

Точка 4

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		
					n-1=	4
					√n=	2,0000
1	9,60	-0,06	0,004			
2	9,50	0,04	0,002	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,033
3	9,80	-0,26	0,068			
4	9,30	0,24	0,058			
5	9,50	0,04	0,002	S = √S² =		0,1817
∑Xi=	47,70	0,00	0,132			
X сред=	9,54			Sx = S / √n =		0,0908

Точка 4

Приборная ошибка:			
Класс точности	0,2	%	
Предел шкалы	15	В	
Абсолютная ошибка	0,03	В	
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95	
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57		
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,233432	В	
Абсолютная ошибка с округл.	0,233	В	

Таблица П4.7.

Расчет абсолютной ошибки

Точка 5

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		n-1=	4
						√n=	2,0000
1	11,50	-0,02	0,000				
2	11,30	0,18	0,032	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,0170	
3	11,40	0,08	0,006				
4	11,60	-0,12	0,014				
5	11,60	-0,12	0,014	S = √ S²	=	0,1304	
∑Xi=	57,40	0,00	0,068				
X сред=	11,48			Sx = S / √n	=	0,0652	

Точка 5

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	15	В
Абсолютная ошибка	0,03	В
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,167544	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,170	В

Точка 6

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		n-1=	4
						√n=	2,0000
1	13,00	0,00	0,000				
2	13,20	-0,20	0,040	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,065	
3	12,80	0,20	0,040				
4	12,70	0,30	0,090				
5	13,30	-0,30	0,090	S = √ S²	=	0,2550	
∑Xi=	65,00	0,00	0,260				
X сред=	13,00			Sx = S / √n	=	0,1275	

Точка 6

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,327612	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,330	В

Точка 7

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		n-1=	4
						√n=	2,0000
1	14,10	0,04	0,002				
2	14,60	-0,46	0,212	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,1030	
3	13,80	0,34	0,116				
4	14,30	-0,16	0,026				
5	13,90	0,24	0,058	S = √ S²	=	0,3209	
∑Xi=	70,70	0,00	0,412				
X сред=	14,14			Sx = S / √n	=	0,1605	

Точка 7

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,412403	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,412	В

Таблица П4.8.

Расчет абсолютной ошибки

Точка 8

№ п/п	Результаты измерений	Xi - Xсред	(Xi - Xсред)²	Расчетные данные		n-1=	4
						√n=	2,0000
1	14,70	0,30	0,090				
2	14,90	0,10	0,010	S² = (∑Δx²) / (n-1) =		0,0500	
3	15,00	0,00	0,000				
4	15,10	-0,10	0,010				
5	15,30	-0,30	0,090	S = √S²	=	0,2236	
∑Xi=	75,00	0,00	0,200				
X сред	15,00			Sx = S / √n	=	0,1118	

Точка 8

Приборная ошибка:		
Класс точности	0,2	%
Предел шкалы	30	В
Абсолютная ошибка	0,06	В
Ошибка измерения:	n=5	P=0,95
Коэффициерт Стьюдента (t)	2,57	
Абсолютная ошибка = Sx *t =	0,287335	В
Абсолютная ошибка с округл.	0,287	В

Таблица П4.9. Итоговая таблица статистической обработки экспериментальных данных (по данным Таблицы 3.1)

№ точки на графике	Доверительный интервал			Абсолютная ошибка (B)	Относител. ошибка (%)
0		0		0	0
1	2,50 - 0,20	< X <	2,50 + 0,20	0,200	8,000
2	4,96 - 0,30	< X <	4,96 + 0,30	0,300	6,048
3	7,57 - 0,19	< X <	7,57 + 0,19	0,190	2,510
4	9,54 - 0,23	< X <	9,54 + 0,23	0,233	2,442
5	11,48 - 0,17	< X <	11,48 + 0,17	0,170	1,481
6	13,00 - 0,33	< X <	13,00 + 0,33	0,330	2,538
7	14,14 - 0,41	< X <	14,14 + 0,41	0,412	2,914
8	15,00 - 0,29	< X <	15,00 + 0,29	0,287	1,913

Таблица П4.10. Данные для построения графика (Рис. 3.2)

	№ точки	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Значение	Расчетное	0	2,50	4,96	7,57	9,54	11,48	13,00	14,14	15,00
параметра	Табличное	0	2,5	5	7,5	9,5	11,5	13	14	15

Приложение 5.

Обзор патентной литературы.

Обзор заявок, патентов и авторских свидетельств.

1. Великобритания	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№9750	ИЭР 1975,	№10
2. США	МПК НО2 Н7/08.	Патент	№369145	ИЭР 1972,	№18
3.	МПК НО2 Н7/085.	Патент	№3671808	ИЭР 1972,	№13
4.	МПК НО2 Н7/085.	Патент	№3753070	ИЭР 1974,	№15
5.	МПК НО2 Н7/08.	Патент	№3818270	ИЭР 1975,	№10
6.	МПК НО2 Н7/085.	Патент	№3919600	ИЭР 1976,	№07
7.	МПК НО2 Н7/09.	Патент	№ 3875463	ИЭР 1976,	№11
8.	МПК НО2 Н7/085.	Патент	№3932789	ИЭР 1976,	№09
9.	МПК НО2 Н7/08.	Патент	№4028736	ИЭР 1978,	№04
10.	МПК НО2 Н7/08.	Патент	№3903456	ИЭР 1975,	№21
11. Франция	МПК НО2 Н7/08.	Заявка	№2193279	ИЭР 1974,	№06
12.	МПК НО2 Н7/08.	Заявка	№2213610	ИЭР 1974,	№17
13.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2399271	ИЭР 1978,	№02
14.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2247001	ИЭР 1975,	№11
15.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2379930	ИЭР 1979,	№03
16.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2379929	ИЭР 1979,	№03
17.	МПК НО2 Н7/09.	Заявка	№2275922	ИЭР 1976,	№03
18.	МПК НО2 Н7/09.	Заявка	№2203193	ИЭР 1974,	№12
19.	МПК НО2 Н7/09.	Заявка	№2227536	ИЭР 1975,	№02
20. ФРГ	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№1513280	ИЭР 1975,	№02
21.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2700841	ИЭР 1978,	№22
22.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2704337	ИЭР 1977,	№15
23.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2704820	ИЭР 1979,	№01
24.	МПК НО2 Н7/09.	Заявка	№1918345	ИЭР 1978,	№15
25.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№260072	ИЭР 1977,	№14
26.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2532956	ИЭР 1977,	№03
27.	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№2527064	ИЭР 1975,	№15
28.	МПК НО2 Н7/08.	Заявка	№2652635	ИЭР 1978,	№19
29.	МПК НО2 Н7/09.	Заявка	№2504841	ИЭР 1976,	№17
30.	МПК НО2 Н7/09.	Заявка	№253899	ИЭР 1976,	№09
31.	МПК НО2 Н7/09 .	Заявка	№1921250	ИЭР 1976,	№10
32.	МПК НО2 Н7/08.	Заявка	№2223676	ИЭР 1974,	№17
33.	МПК НО2 Н7/088.	Заявка	№2506686	ИЭР 1976,	№17
34. Япония	МПК НО2 Н7/085.	Заявка	№5138899	ИЭР 1977,	№04
35. СССР, РФ	МПК НО2 Н7/085.	А.С.	№347854		
36.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№289987		
37.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№523479		
38.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№019992		
39.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№501446		
40.	МПК НО2 Н7/085.	А.С.	№432631		
41.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№559328		
42.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№529329		
43.	МПК НО2 Н7/09.	А.С.	№369677		
44.	МПК НО2 Н7/085.	А.С.	№609165		
45.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№535655		
46.	МПК НО2 Н7/09.	А.С.	№564676		

47.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№612339	
48.	МПК НО2 Н7/09.	А.С.	№598824	
49.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№611270	
50.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№414675	
51.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№363154	
52.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№555495	
53.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№153080	
54.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№595822	
55.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№568109	
56.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№586523	
57.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№652644	
58.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№418923	
59.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№553709	
60.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№574813	
61.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№547901	
62.	МПК НО2 Н7/085.	А.С.	№439877	
63.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№445095	
64.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№488279	
65.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№611269	
66.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№640390	
67.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№646404	
68.	МПК НО2 Н7/09.	А.С.	№550717	
69.	МПК НО2 Н7/09.	А.С.	№619992	
70.	МПК НО2 Н7/09.	А.С.	№562036	
71.	МПК НО2 Н7/09.	А.С.	№558348	
72.	МПК НО2 Н7/08.	А.С.	№553709	
73.	МКИЗ НО2Н7/09	А.С.	№1020912	ОИ, 1983, №20
74.	МКИЗ НО2Н7/08	А.С.	№1089691	ОИ, 1984, №16
75.	МКИЗ НО2Н7/09	А.С.	№1020994	ОИ, 1984, №16
76.	МКИЗ НО2Н7/08	А.С.	№1274062	ОИ, 1997, №44
77.	МПК6 НО2Н7/09	Патент	№2066082	ИЭР, 2006
78.	МПК7 НО2Н7/09	Патент	№2251189	ИЭР, 2010

Приложение 6.

Результаты расчетов некоторых параметров асинхронных двигателей, выполненных с применением математической модели.

(выполнено автором по данным [162]).

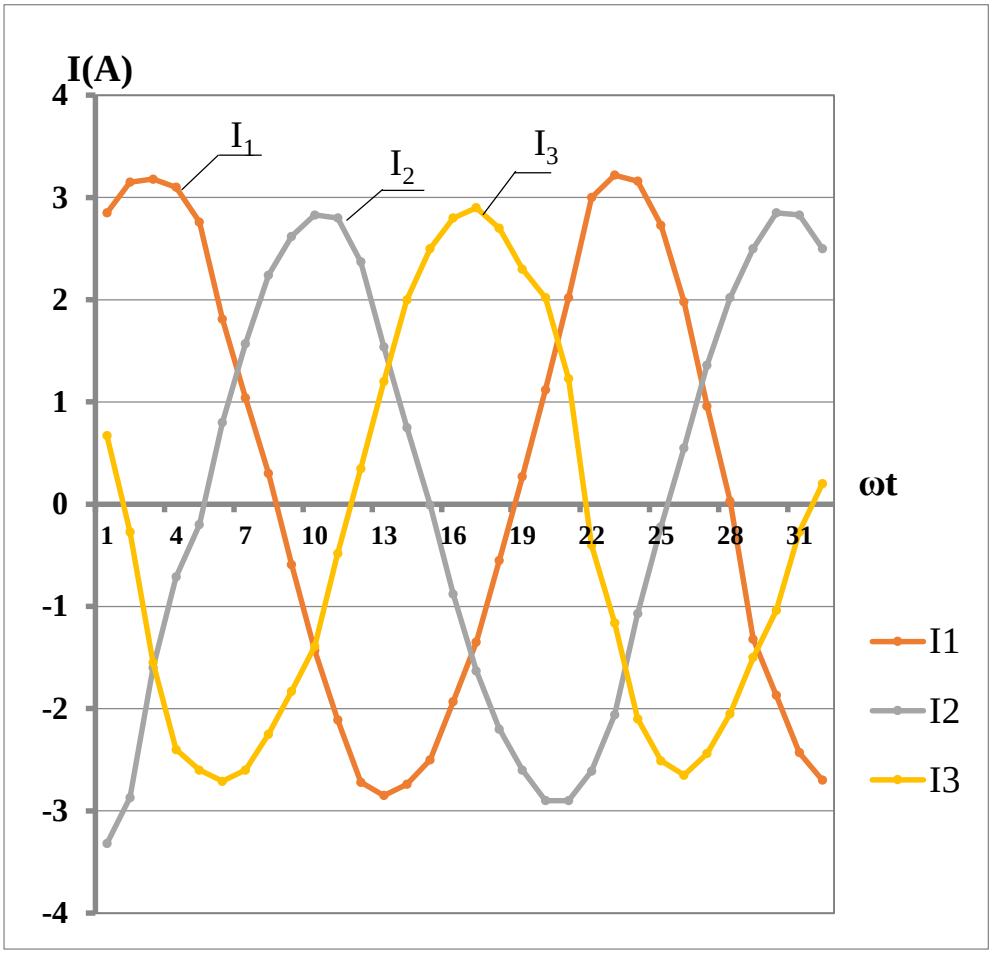


Рис. П6.1. Токи по фазам двигателя 4А 56 А4.
Режим КЗ.
Uc=380,0 (В).
Симметричное электропитание по фазам.
(по данным Таблицы П6.1)

Таблица П6.1. Токи по фазам двигателя 4А 56 А4, (данные получены с применением математической модели).

Режим КЗ. Uс=380,0 (В).

Симметричное электропитание по фазам.

ωt	I1(A)	I2(A)	I3(A)
1	2,85	-3,32	0,67
2	3,15	-2,87	-0,27
3	3,18	-1,60	-1,55
4	3,10	-0,71	-2,40
5	2,76	-0,20	-2,55
6	1,81	0,80	-2,61
7	1,04	1,57	-2,50
8	0,30	2,24	-2,25
9	-0,59	2,62	-1,83
10	-1,43	2,83	-1,39
11	-2,11	2,80	-0,48
12	-2,72	2,37	0,35
13	-2,85	1,54	1,20
14	-2,74	0,75	2,00
15	-2,50	-0,01	2,50
16	-1,93	-0,88	2,80
17	-1,35	-1,63	2,90
18	-0,55	-2,20	2,70
19	0,27	-2,60	2,30
20	1,02	-2,95	2,02
21	2,02	-2,96	1,23
22	3,00	-2,61	-0,40
23	3,22	-2,06	-1,16
24	3,16	-1,07	-2,10
25	2,73	-0,22	-2,51
26	1,98	0,67	-2,65
27	0,96	1,36	-2,34
28	0,03	2,02	-2,05
29	-1,32	2,50	-1,50
30	-1,87	2,85	-1,04
31	-2,43	2,83	-0,27
32	-2,70	2,50	0,20

Результаты расчетов параметров электродвигателя, полученные с применением математической модели.

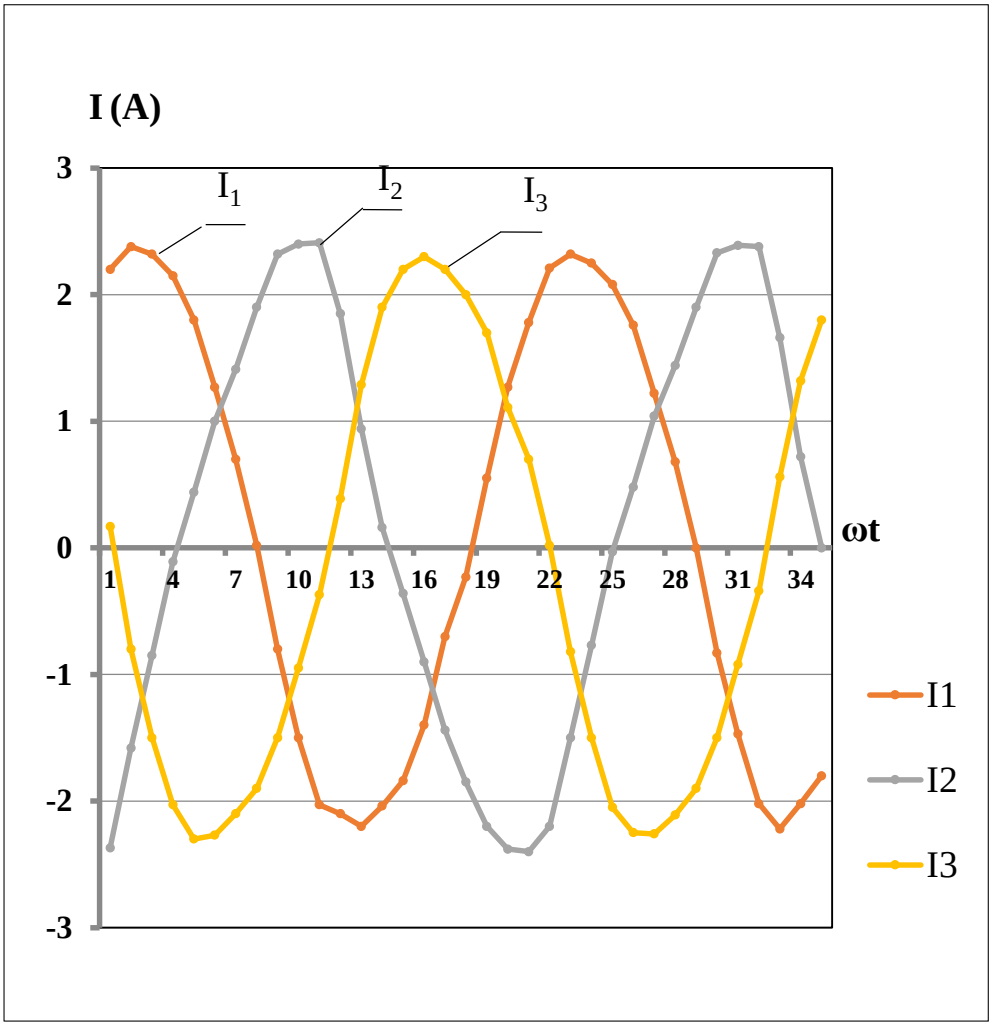


Рис. 2. Токи по фазам двигателя 4А 71 А4.
Режим номинальной нагрузки.
Uс=380,0 (В).
Симметричное электропитание по фазам.
(по данным Таблицы П6.2)

Таблица П6.2. Токи по фазам двигателя 4А 71 А4, (данные получены с применением математической модели).

Режим номинальный нагрузки.

Uc=380,0 (В).

Симметричное электропитание по фазам.

ωt	I1(A)	I2(A)	I3(A)
1	2,20	-2,37	0,17
2	2,38	-1,58	-0,80
3	2,32	-0,85	-1,50
4	2,15	-0,11	-2,03
5	1,80	0,44	-2,30
6	1,27	1,00	-2,27
7	0,70	1,41	-2,10
8	0,02	1,90	-1,90
9	-0,80	2,32	-1,50
10	-1,50	2,40	-0,95
11	-2,03	2,41	-0,37
12	-2,10	1,85	0,39
13	-2,20	0,94	1,29
14	-2,04	0,16	1,90
15	-1,84	-0,36	2,20
16	-1,40	-0,90	2,30
17	-0,70	-1,44	2,20
18	-0,23	-1,85	2,00
19	0,55	-2,20	1,70
20	1,27	-2,38	1,11
21	1,78	-2,40	0,70
22	2,21	-2,20	0,02
23	2,32	-1,50	-0,82
24	2,25	-0,77	-1,50
25	2,08	-0,03	-2,05
26	1,76	0,48	-2,25
27	1,22	1,04	-2,26
28	0,68	1,44	-2,11
29	0,00	1,90	-1,90
30	-0,83	2,33	-1,50
31	-1,47	2,39	-0,92
32	-2,02	2,38	-0,34
33	-2,22	1,66	0,56
34	-2,02	0,72	1,32
35	-1,80	0,00	1,80

Результаты расчетов параметров электродвигателя, полученные с применением математической модели.

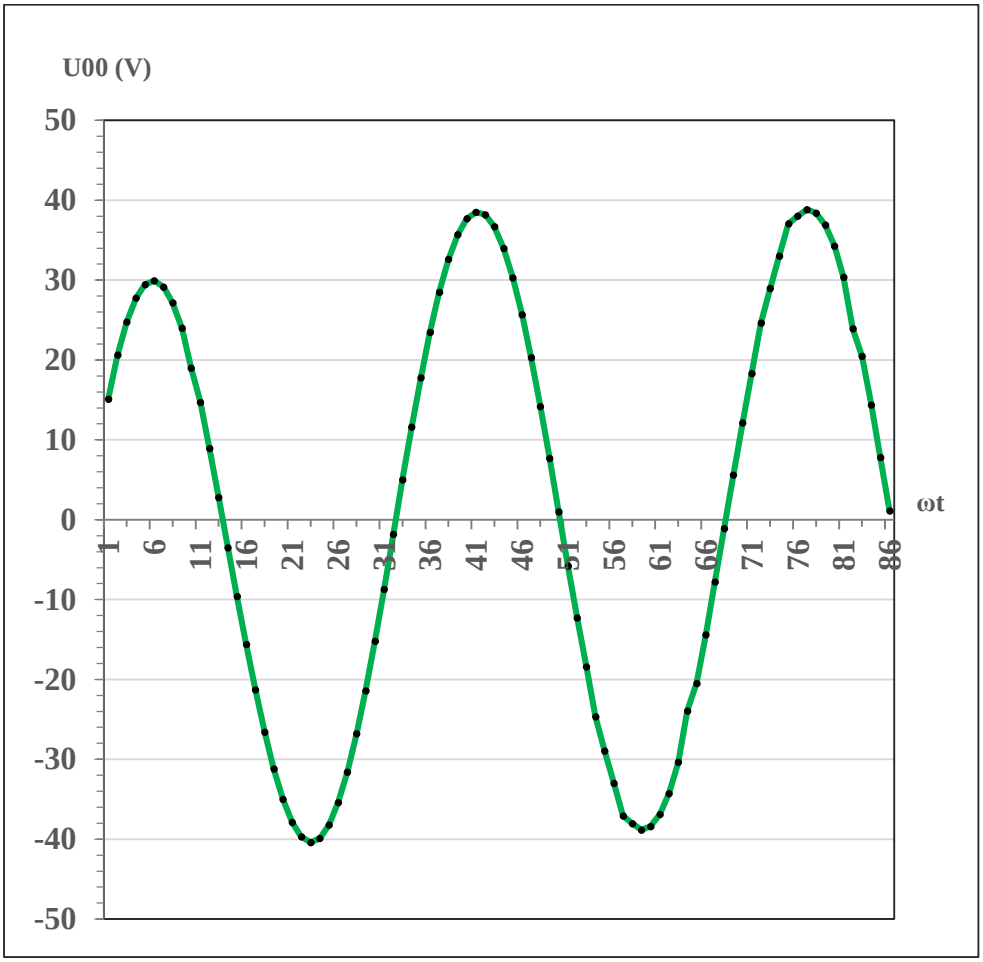


Рис.3. Напряжение системы U 00' двигателя 4А 56 В4.
Режим ХХ.
Uс=380,0 (В).
Симметричное электропитание по фазам.
(по данным Таблицы П6.3)

Таблица П6.3. Напряжение системы U00' двигателя 4А 56 В4, (данные получены с применением математической модели).

Режим ХХ.

Uс=380,0 (В).

Симметричное электропитание по фазам.

ωt	U00'(V)
1	15,12
2	20,62
3	24,78
4	27,75
5	29,47
6	29,93
7	29,14
8	27,15
9	24,01
10	19,01
11	14,71
12	8,94
13	2,80
14	-3,50
15	-9,60
16	-15,60
17	-21,30
18	-26,60
19	-31,20
20	-35,00
21	-37,90
22	-39,70
23	-40,40
24	-39,90
25	-38,20
26	-35,40
27	-31,60
28	-26,80
29	-21,40
30	-15,20
31	-8,70
32	-1,80
33	5,01
34	11,6
35	17,8

ωt	U00'(V)
36	23,5
37	28,50
38	32,60
39	35,70
40	37,70
41	38,50
42	38,20
43	36,70
44	34,00
45	30,30
46	25,70
47	20,30
48	14,20
49	7,70
50	1,00
51	-5,76
52	-12,28
53	-18,42
54	-24,64
55	-28,96
56	-33,01
57	-37,07
58	-38,03
59	-38,84
60	-38,40
61	-36,90
62	-34,27
63	-30,36
64	-23,92
65	-20,47
66	-14,40
67	-7,80
68	-1,10
69	5,60
70	12,15

ωt	U00'(V)
71	18,31
72	24,64
73	28,96
74	33,01
75	37,07
76	38,03
77	38,84
78	38,40
79	36,90
80	34,27
81	30,36
82	23,92
83	20,47
84	14,40
85	7,80
86	1,10

Результаты расчетов параметров электродвигателя полученных с применением математической модели.

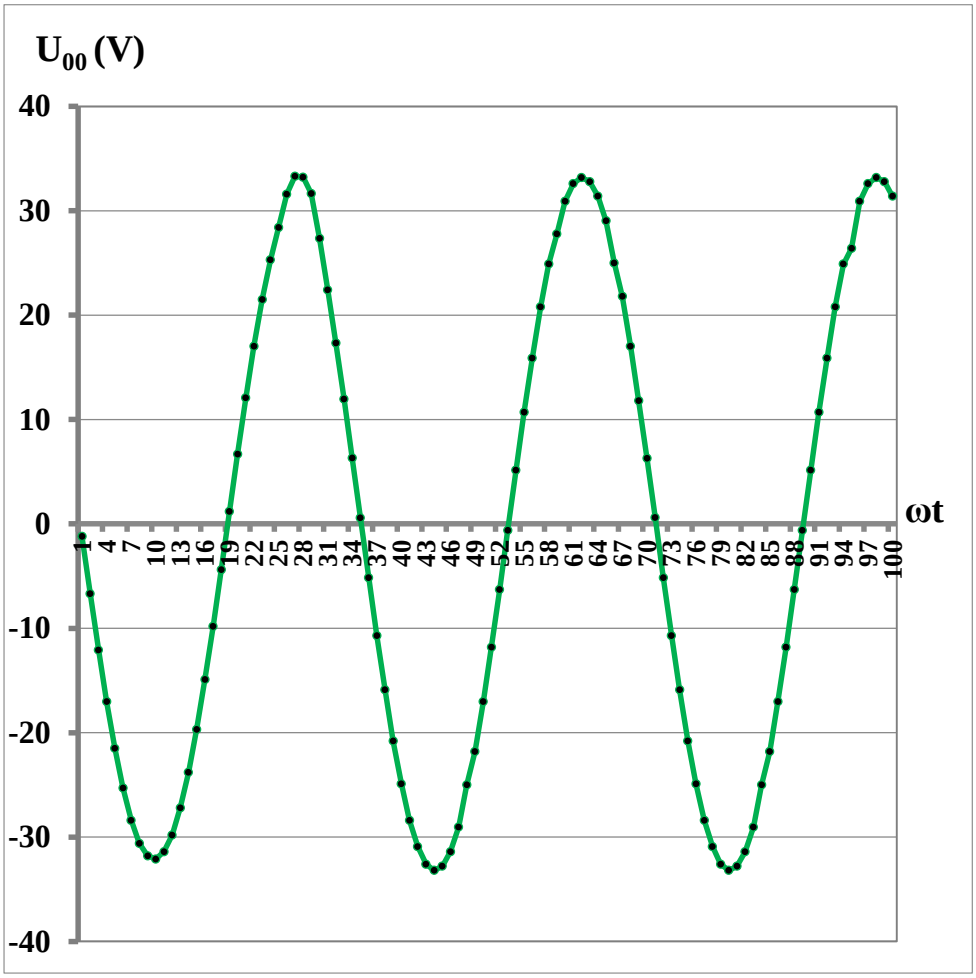


Рис.4. Напряжение системы U 00' двигателя 4А 80 А4.
Режим ХХ.
Uc=380,0 (В).
Симметричное электропитание по фазам.
(по данным Таблицы П6.4)

Таблица П6.4. Напряжение системы U00' двигателя 4А80 А4, (данные получены с применением математической модели).

Режим ХХ.

Uс=380,0 (В).

Симметричное электропитание по фазам.

ωt	U00'(V)
1	-1,20
2	-6,70
3	-12,07
4	-17,03
5	-21,50
6	-25,30
7	-28,40
8	-30,60
9	-31,80
10	-32,10
11	-31,40
12	-29,80
13	-27,20
14	-23,80
15	-19,70
16	-14,90
17	-9,80
18	-4,39
19	1,20
20	6,70
21	12,07
22	17,03
23	21,50
24	25,30
25	28,40
26	31,60
27	33,30
28	33,22
29	31,66
30	27,36
31	22,41
32	17,34
33	11,96
34	6,33
35	0,58

ωt	U00'(V)
36	-5,14
37	-10,70
38	-15,90
39	-20,80
40	-24,90
41	-28,40
42	-30,90
43	-32,60
44	-33,20
45	-32,80
46	-31,40
47	-29,03
48	-25,00
49	-21,80
50	-17,02
51	-11,80
52	-6,30
53	-0,60
54	5,14
55	10,70
56	15,90
57	20,80
58	24,90
59	27,80
60	30,90
61	32,60
62	33,20
63	32,80
64	31,40
65	29,03
66	25,00
67	21,80
68	17,02
69	11,80
70	6,30

ωt	U00'(V)
71	0,60
72	-5,14
73	-10,70
74	-15,90
75	-20,80
76	-24,90
77	-28,40
78	-30,90
79	-32,60
80	-33,20
81	-32,80
82	-31,40
83	-29,03
84	-25,00
85	-21,80
86	-17,02
87	-11,80
88	-6,30
89	-0,60
90	5,14
91	10,70
92	15,90
93	20,80
94	24,90
95	28,40
96	30,90
97	32,60
98	33,20
99	32,80
100	31,40

Результаты расчетов параметров электродвигателя, полученные с применением математической модели.

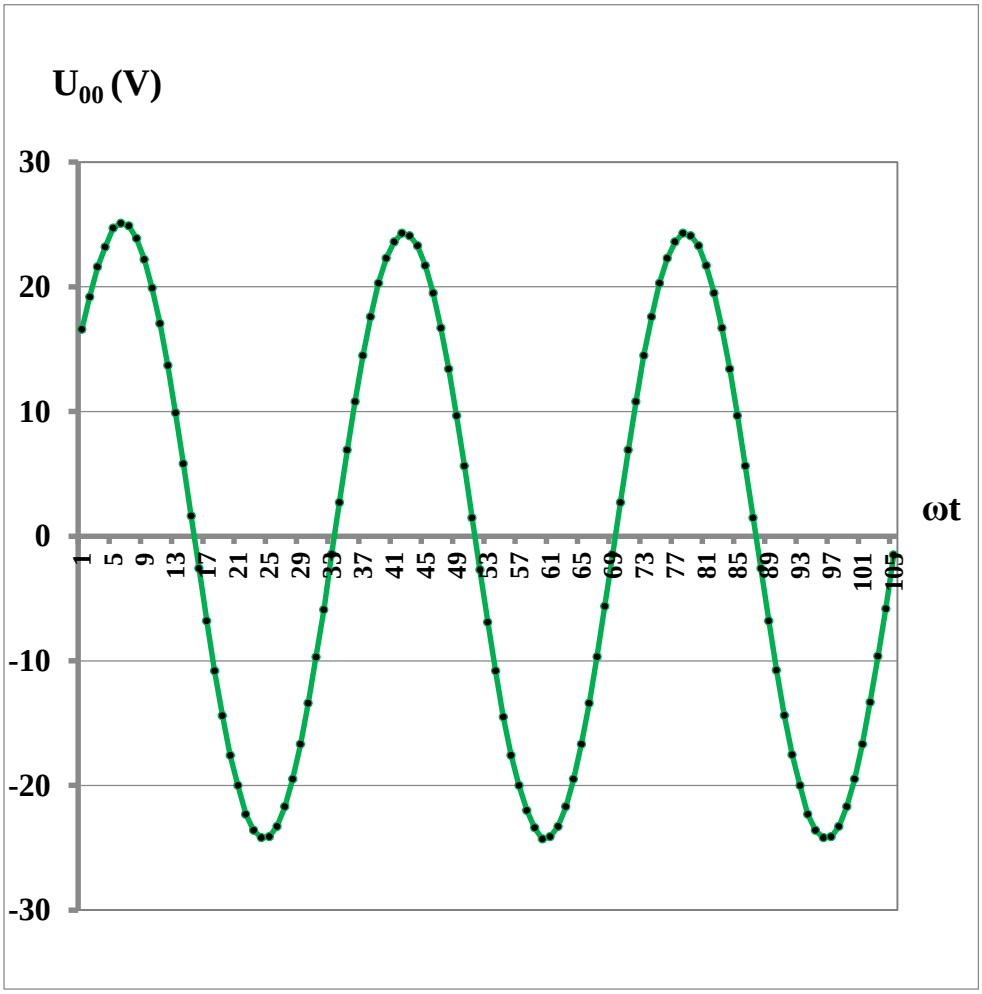


Рис.5. Напряжение системы U 00' двигателя 4А 100 L4.
Режим XX.
Uc=380,0 (В).
Симметричное электропитание по фазам.
(по данным Таблицы П6.5)

Таблица П6.5. Напряжение системы $U_{00'}$ двигателя 4A100LA, (данные получены с применением математической модели).

Режим XX. Uc=380,0 (В).

Симметричное электропитание по фазам.

ωt	$U_{00'}$(V)
1	16,60
2	19,20
3	21,60
4	23,20
5	24,70
6	25,10
7	24,90
8	23,90
9	22,20
10	19,90
11	17,05
12	13,70
13	9,90
14	5,80
15	1,62
16	-2,60
17	-6,80
18	-10,80
19	-14,40
20	-17,60
21	-20,00
22	-22,30
23	-23,60
24	-24,20
25	-24,10
26	-23,30
27	-21,70
28	-19,50
29	-16,70
30	-13,40
31	-9,70
32	-5,90
33	-1,43

ωt	$U_{00'}$(V)
34	2,70
35	6,90
36	10,80
37	14,50
38	17,60
39	20,30
40	22,30
41	23,60
42	24,30
43	24,10
44	23,30
45	21,70
46	19,50
47	16,70
48	13,40
49	9,67
50	5,63
51	1,46
52	-2,70
53	-6,90
54	-10,80
55	-14,50
56	-17,60
57	-20,30
58	22,30
59	-23,60
60	-24,30
61	-24,10
62	-23,30
63	-21,70
64	-19,50
65	-16,70
66	-13,40
67	-9,67
68	-5,63
69	-1,47

ωt	$U_{00'}$(V)
70	2,70
71	6,90
72	10,80
73	14,50
74	17,60
75	20,30
76	22,30
77	23,60
78	24,30
79	24,10
80	23,30
81	21,70
82	19,50
83	16,70
84	13,40
85	9,67
86	5,63
87	1,46
88	-2,58
89	-6,81
90	-10,76
91	-14,37
92	-17,54
93	-20,00
94	-22,30
95	-23,60
96	-24,20
97	-24,10
98	-23,30
99	-21,70
100	-19,50
101	-16,70
102	-13,32
103	-9,63
104	-5,83
105	-1,52

Результаты расчетов параметров электродвигателя, полученные с применением математической модели.

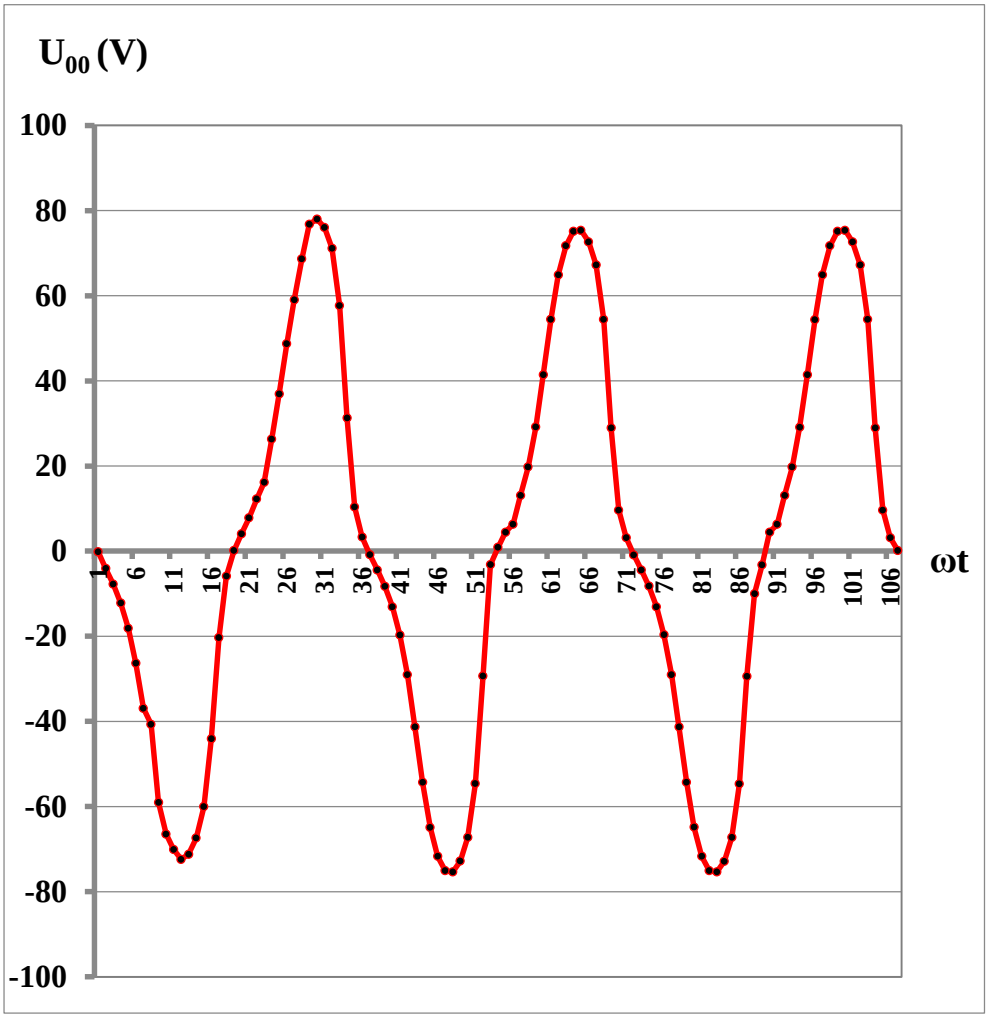


Рис. 6. Напряжение системы U 00' двигателя 4А 71 А4.
Режим ХХ. Uс=380,0 (В).
Обрыв одной питающей фазы.
(по данным Таблицы П6.6)

Таблица П6.6. Напряжение системы U00' двигателя 4A100LA (данные получены с применением математической модели). Режим XX. Uc=380,0 (В).

Обрыв одной питающей фазы.

ωt	U00'(V)
1	-0,17
2	-4,07
3	-7,75
4	-12,21
5	-18,13
6	-26,29
7	-36,92
8	-40,66
9	-59,02
10	-66,48
11	-70,09
12	-72,39
13	-71,19
14	-67,39
15	-60,03
16	-44,10
17	-20,31
18	-5,90
19	0,15
20	4,06
21	7,79
22	12,23
23	16,16
24	26,34
25	36,96
26	48,72
27	59,06
28	68,64
29	76,75
30	78,00
31	76,00
32	71,17
33	57,66
34	31,29
35	10,36

ωt	U00(V)'
36	3,33
37	-0,82
38	-4,42
39	-8,25
40	-13,07
41	-19,67
42	-29,05
43	-41,32
44	-54,31
45	-64,89
46	-71,69
47	-75,07
48	-75,36
49	-72,83
50	-67,26
51	-54,61
52	-29,31
53	-3,19
54	0,90
55	4,47
56	6,32
57	13,12
58	19,75
59	29,16
60	41,45
61	54,43
62	64,93
63	71,74
64	75,11
65	75,36
66	72,65
67	67,26
68	54,44
69	28,95
70	9,63

ωt	U00'(V)
71	3,16
72	-0,89
73	-4,45
74	-8,20
75	-13,06
76	-19,65
77	-29,02
78	-41,29
79	-54,29
80	-64,83
81	-71,68
82	-75,07
83	-75,36
84	-72,84
85	-67,25
86	-54,66
87	-29,37
88	-10,00
89	-3,20
90	4,46
91	6,31
92	13,11
93	19,75
94	29,14
95	41,42
96	54,41
97	64,91
98	71,74
99	75,11
100	75,36
101	72,65
102	67,26
103	54,44
104	28,95
105	9,63
106	3,16
107	0,15

Приложение 7.

Матрицы электромагнитных параметров трёхфазного асинхронного двигателя.

(Выполнено автором).

Таблица П7.1. Матрица электромагнитных параметров

Матрица $A_{11} = \frac{\partial(\omega\psi)}{\partial i}$

	1	2	3	4	5	6
1	$X_{\delta A}$	0	0	0	0	0
2	0	$X_{\delta B}$	0	0	0	0
3	0	0	$X_{\delta C}$	0	0	0
4	0	0	0	$X_{\delta a}$	0	0
5	0	0	0	0	$X_{\delta b}$	0
6	0	0	0	0	0	$X_{\delta c}$

Таблица П7.2. Матрица электромагнитных параметров.

Матрица $A_{12} = \frac{\partial(\omega\psi)}{\partial\varphi}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	ω*W1	ω*W1	0	0	0	0	- ω*W1	- ω*W1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	ω*W1	ω*W1	0	0	0	0	- ω*W1	- ω*W1	0
3	0	0	- ω*W1	- ω*W1	0	0	0	0	ω*W1	ω*W1	0	0	0
4	ω*W2	ω*W2	0	0	0	0	- ω*W2	- ω*W2	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	ω*W2	ω*W2	0	0	0	0	- ω*W2	- ω*W2	0
6	0	0	- ω*W2	- ω*W2	0	0	0	0	ω*W2	ω*W2	0	0	0

Таблица П7.3. Матрица электромагнитных параметров

Матрица $A_{21} = \frac{\partial f}{\partial i}$

	1	2	3	4	5	6
1	-W1	0	0	-W2	0	0
2	-W1	0	0	-W2	0	0
3	0	0	+W1	0	0	+W2
4	0	0	+W1	0	0	+W2
5	0	-W1	0	0	-W2	0
6	0	-W1	0	0	-W2	0
7	+W1	0	0	+W2	0	0
8	+W1	0	0	+W2	0	0
9	0	0	-W1	0	0	-W2
10	0	0	-W1	0	0	-W2
11	0	+W1	0	0	+W2	0
12	0	+W1	0	0	+W2	0
13	0	0	0	0	0	0

Таблица П7.4. Матрица электромагнитных параметров

Матрица $A_{22} = \frac{\partial f}{\partial \varphi}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	RC1+RK1 RC2+RK2 RE1+RR1 2Rδ	-RC2 -2Rδ -RK2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-RR1 -RC1 -RK1 -Rδ	-RR1
2	-RC2 -2Rδ -RK2	RC2+RK2 RC3+RK3 RE2+RR2 2Rδ	-RC3 -2Rδ -RK3	0	0	0	0	0	0	0	0	-RR2	-RR2
3	0	-RC3 -2Rδ -RK3	RC3+RK3 RC4+RK4 RE3+RR3 2Rδ	-RC4 -2Rδ -RK4	0	0	0	0	0	0	0	-RR3	-RR3
4	0	0	-RC4 -2Rδ -RK4	RC4+RK4 RC5+RK5 RE4+RR4 2Rδ	-RC5 -2Rδ -RK5	0	0	0	0	0	0	-RR4	-RR4
5	0	0	0	-RC5 -2Rδ -RK5	RC5+RK5 RC6+RK6 RE5+RR5 2Rδ	-RC6 -2Rδ -RK6	0	0	0	0	0	-RR5	-RR5
6	0	0	0	0	-RC6 -2Rδ -RK6	RC6+RK6 RC7+RK7 RE6+RR6 2Rδ	-RC7 -2Rδ -RK7	0	0	0	0	-RR6	-RR6
7	0	0	0	0	0	-RC7 -2Rδ -RK7	RC7+RK7 RC8+RK8 RE7+RR7 2Rδ	-RC8 -2Rδ -RK8	0	0	0	-RR7	-RR7
8	0	0	0	0	0	0	-RC8 -2Rδ -RK8	RC8+RK8 RC9+RK9 RE8+RR8 2Rδ	-RC9 -2Rδ -RK9	0	0	-RR8	-RR8
9	0	0	0	0	0	0	0	-RC9 -2Rδ -RK9	RC9+RK9 RC10+RK10 RE9+RR9 2Rδ	-RC10 -2Rδ -RK10	0	-RR9	-RR9
10	0	0	0	0	0	0	0	0	-RC10 -2Rδ -RK10	RC10+RK10 RC11+RK11 RE10+RR10 2Rδ	-RC11 -2Rδ -RK11	-RR10	-RR10
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-RC11 -2Rδ -RK11	RC11+RK11 RC12+RK12 RE11+RR11 2Rδ	-RR12 -RC12 -RK12 -Rδ	-RR11
12	-RR1 -RC1 -RK1 -Rδ	-RR2	-RR3	-RR4	-RR5	-RR6	-RR7	-RR8	-RR9	-RR10	-RR12 -RC12 -RK12 -Rδ	RC1+RK1 RC12+RK12 RE12+2Rδ i=11 ΣRRi i=1	i=11 ΣRRi i=1
13	-RR1	-RR2	-RR3	-RR4	-RR5	-RR6	-RR7	-RR8	-RR9	-RR10	-RR11	i=11 ΣRRi i=1	i=12 ΣRRi i=1

Приложение 8.

Установочные таблицы для настройки пороговых элементов канала контроля токовой перегрузки.

(Выполнено автором).

Таблица П8.1. Допустимая длительность работы двигателя в зависимости от величины токовой перегрузки, согласно ГОСТ 183-94.

№ п/п	Превышение мощности ΔP	Выдержка времени (сек)
1	0%	0
2	10%	1800
3	25%	1200
4	50%	120
5	200%	30
6	300%	15
7	800%	10

Габлица П8.2. Напряжения с датчика тока Uдт (В) амп. (схема без ускорения времени заряда конденсатора).

№ п/п	**Превышение мощности ΔP**	**Входной сигнал Uвх**	**На транзис-ре U трн**	**На конден-ре U кон**	**Порог DA3 Uопор.=3,9**	**Время заряда конден. T (сек)**
1	0%	3,4	3,8	0		0
2	10%	3,74	4,18	3,98		780
3	25%	4,25	4,75	4,55		400
4	50%	5,10	5,70	5,50		250
5	200%	6,80	7,60	7,40		150
6	300%	20,40	22,80	22,60		37
7	800%	27,20	30,40	30,20		28

Таблица П8.3. Напряжения с датчика тока Uдт (В) амп. (схема с ускорением времени заряда конденсатора)

№ п/п	Превышение мощности ΔР	Входной сигнал Uвх.	На транзис-ре U трн.	На конден-ре U кон.	Порог DA3 U опор.=3,9	Время заряда конден. Т (сек)
1	0%	3,4	3,8	0		0
2	10%	3,74	4,18	3,98		780
3	25%	4,25	4,75	4,55		400
4	50%	5,10	5,70	5,50		40
5	200%	6,80	7,60	7,40		25
6	300%	20,40	22,80	22,60		11
7	800%	27,20	30,40	30,20		5

Таблица П8.4.
Пороговые напряжения

Компаратор		**DA1**
		(В)
Прямой	вход №3	3,4
Инвертир.	вход №4	3,5

Таблица П8.5.
Пороговые напряжения

Компаратор		**DA3**
		(В)
Прямой	вход №3	variabl
Инвертир.	вход №4	3,9

Таблица П8.6. Установочная таблица для настройки элементов канала контроля обрыва фаз (Напряжение U_{00}' (В), амплитудное значение)

№	Мощность	Число пар	Симметр. режим		Обрыв фазы		Установочные данные		
п/п	двигателя Р, кВт	полюсов	холос. ход	ном. нагр	холос. ход	ном. нагр.	порог (min)	(К) передачи	порог (max)
1	**0,55**	**1**	26,50	18,50	43,00		3,58	7,40	5,81
2	**0,55**	**2**	37,00	26,00	70,00		3,56	10,40	6,73
3	**1,50**	**1**	22,00	15,00	33,00	140,00	3,66	6,00	5,50
4	**1,50**	**2**	31,00	22,50	46,00	160,00	3,44	9,00	5,11
5	**1,50**	**3**	35,00	24,50	58,30		3,57	9,80	5,95
6	**3,00**	**1**	17,50	12,00	25,00		3,64	4,80	5,20
7	**3,00**	**2**	26,00	18,20	40,00		3,57	7,28	5,35
8	**5,00**	**1**	16,00	11,20	22,80		3,57	4,48	5,09
9	**5,00**	**2**	23,00	16,10	38,50		3,54	7,00	5,50
							MAX 3,66	MIN 4,48	MIN 5,09

Пример расчета параметров настройки по пункту №1 Таблицы П8.6

Напряжение на прямом входе №3 компаратора DA2 = 2,5В при номинальной нагрузке

Коэф. передачи = U_{00}' (ном) / 2,5= 18,5 / 2,5 = 7,4

Порог min = U_{00}' (хх сим.) / коэф. передачи = 26,5 / 7,4 = 3,58

Порог max = U_{00}' (хх обр.фаз) / коэф. передачи = 43,0 / 7,4 = 5,81

Устанавливаем U инв. Больше 3,66 и меньше 5,09. Выбираем U инв.=4,0 В

Таблица 7

Компаратор		**DA2**
		(В)
Прямой	вход №3	2,5
Инвертир.	вход №4	4,0

Приложение 9а.

Документы по внедрения разработанного защитного устройства

СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 807435

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы"

Автор (авторы): Житарь Николай Дмитриевич, Коцофана Виссарион Иванович, Мишин Владимир Иванович и Шаповалов Вячеслав Иванович

Заявитель: КИШИНЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. С. ЛАЗО

Заявка № 2730870 Приоритет изобретения 27февраля 1979г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

20 октября 1980г.

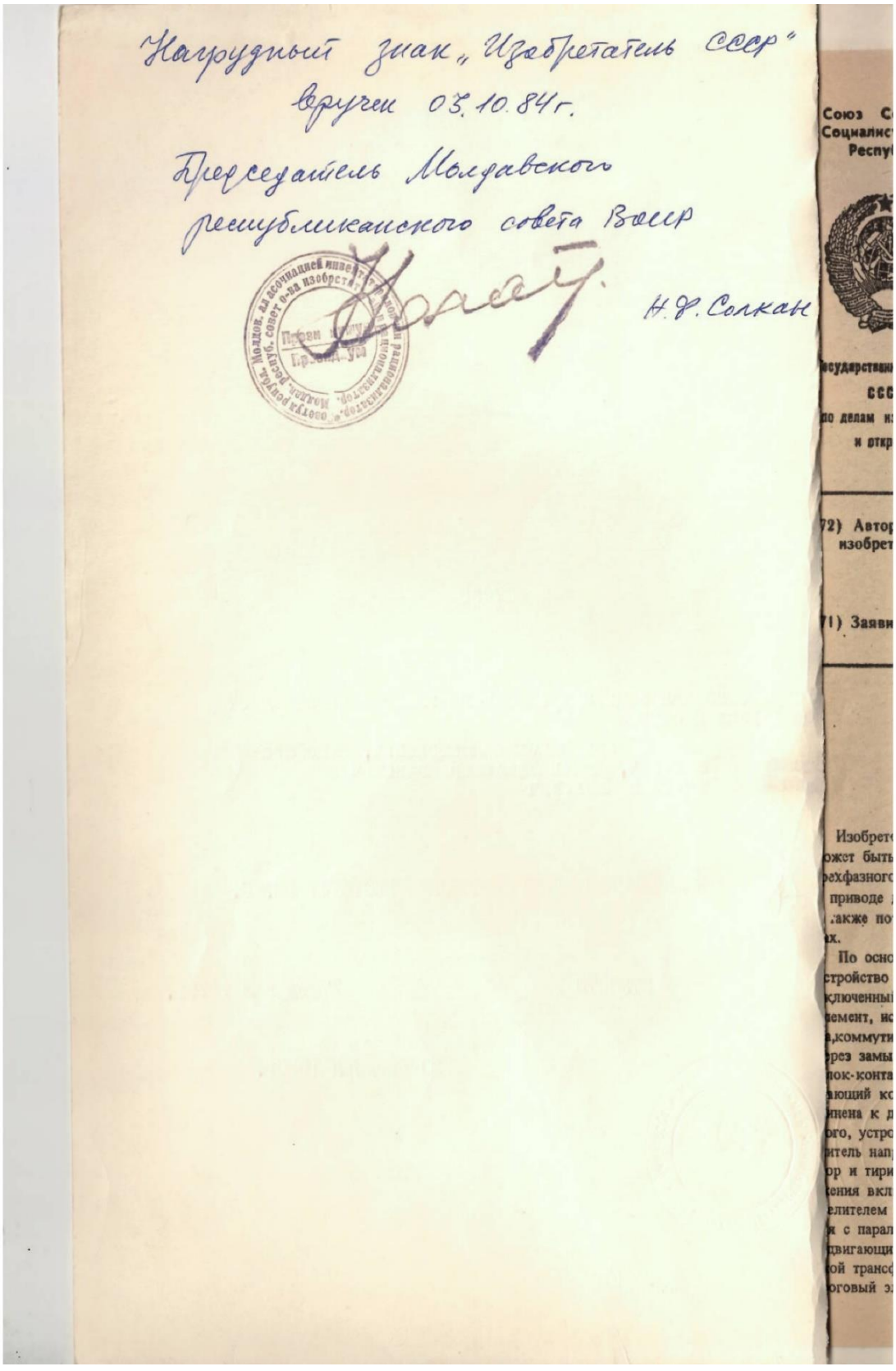
Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

МПФ Гознака. 1979. Зак. 79-3083.

Приложение 9b.



Нагрудный знак „Изобретатель СССР"
вручен 03.10.84г.
Председатель Молдавского
республиканского совета ВОИР
Н.Ф. Солкан

Приложение 9d.

Молдавский республиканский
совет ВОИР

№ 27/347

"4" июня 1984 г.

Уважаемый т. Шаповалов В.К.

Для получения нагрудного знака "Изобретатель СССР" за изобретение (а.с. № 807435), использованное в народном хозяйстве СССР после 20 августа 1973 года, Вам необходимо зайти в Республиканский совет ВОИР, комната 214.

Выдача знаков производится в первую среду каждого месяца с 10 до 12 часов.

При себе иметь авторское свидетельство № 807435

Председатель
республиканского совета ВОИР Н.Ф.Сойкан

Тираж 500 экз.

Декларация об ответственности

Я, нижеподписавшийся, Шаповалов Вячеслав, заявляю с ответственностью, что материал, представленный в моей диссертационной работе доктора технических наук, рассказывает о деятельности и достижениях автора в соответствии с действующим законодательством и не включает секретную информацию и государственную тайну, в противном случае, уведомлен, о правовых последствиях, предусмотренных действующим законодательством.

Шаповалов Вячеслав _____

Дата _____

CV автора

Личные данные.

Фамилия	Шаповалов
Имя	Вячеслав
Дата рождения	31.01.1947
Телефон	+373 6 924 60 06
e-mail	shapovalov.veaceslav @uniflux-line.net

Образование.

1970	Высшее техническое, Кишинёвский политехнический институт.
1965-1970	Факультет - «Энергетический», специальность - «Электрификация сельского хозяйства».
1982-1986	Аспирант заочного отделения аспирантуры Украинской Сельскохозяйственной Академии. Кафедра «Электрические машины и электропривод».

Список научных публикаций по теме работы.

1980	• Исследование эффективности работы электродвигателей в условиях сельского хозяйства Молдавии. Отчет НИР. КПИ им. Лазо. Инв. №868508 № ГР 800059075. Молд. НИИ НТИ.
1981	• Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы. А.С. №807435 Б.И. №7. • Устройство для защиты трехфазного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы. А.С. №877691 Б.И. № 40.
1987	• Устройство для защиты погружного электродвигателя от перегрузок, обрыва фазы и сухого хода» А.С. № 1410175.

1985	• Устройство для защиты асинхронных электродвигателей от аварийных перегрузок и обрыва фазы. В кн. «Ученые высшего учебного заведения Молдавии народному хозяйству». РИО Молд. НИИ НТИ. Кишинев. • Математическая модель асинхронного двигателя для исследования аварийных режимов. Тезисы доклада ВНТК «Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов», Днепродзержинск.
1986	• Математическая модель асинхронной машины. Библиотечный указатель депонированных рукописей. Кишинев: Молд. НИИ НТИ, Кишинев.
1988	• Некоторые результаты расчета магнитного состояния короткозамкнутых электродвигателей. Тезисы доклада XX НТК КПИ, Кишинев.
1989	• Гармоники насыщения асинхронных двигателей в динамических и аварийных режимах. Тезисы доклада У ВНТК «Динамические режимы работы асинхронной машины», Каунас. • Электронное устройство защиты асинхронных электродвигателей. Тезисы доклада, НТК КТУ, Кишинев.
2000	• Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал в устройствах защиты электрических двигателей. Сборник научных трудов ГАУРМ, Кишинэу.
2006	• Некоторые результаты исследований параметров системы нуль сети 220/380 – нуль электродвигателя. М: ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5-ймеждународной НТК, “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, Часть 1. Москва, 2006. • Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал обрыва фазы асинхронного электродвигателя. М: ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5-й международной НТК “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, Часть 1. Москва, 2006. .
2015	• Краткий анализ парка асинхронных электродвигателей, применяемых в сельском хозяйстве РМ. . Сборник научных трудов 6-й международной НТК. Часть1. Кишинэу: ГАУРМ,

	• Математическая модель асинхронного трехфазного электродвигателя в условиях насыщения магнитной системы. Сборник научных трудов 6-й международной НТК. Часть1. Кишинэу: ГАУРМ,
2016	• Исследования измерительного преобразователя тока как источника сигнала аварийной перегрузки асинхронного электродвигателя. Институт энергетики. Международная конференция. «Энергетика Молдовы-2016». Часть III. 2016.
2018	• Универсальное защитное устройство. Сборник научных трудов ГАУРМ 46-й выпуск, часть 1. Кишинэу: 2018.
2019	• Асинхронные двигатели современных серий как не линейные системы - источники напряжения высших гармоник в нулевом проводе. “Ştiinţa agricolă”, 2019. Кишинев: Выпуск 2, с.125-130. • Universal protection device as an efficient way to increase the operational reliability of asynchronous engines. “Journal of Engineering Science”. 2019. Volume 26 (2), p. 58-65.