

На правах рукописи



**ЛАВРЕНОВ ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ**

**МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВО ПОДДЕРЖАНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА ПРИ ПОЯВЛЕНИИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕСИММЕТРИИ В ЦЕПЯХ КРУПНЫХ  
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность: 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель:

**Тюков Валентин Андреевич**

доктор технических наук, профессор

**Темлякова Зоя Савельевна**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Полищук Владимир Иосифович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Энергетический факультет, декан

**Тамьярова Майя Владиславовна**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, Самолетостроительный факультет Института авиационных технологий и управления, декан

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «25» ноября 2021 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru).

Автореферат разослан

«\_\_\_» сентября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Электроэнергетика является одной из важнейших отраслей хозяйства, как для Российской Федерации, так и любой другой страны. От объемов производства электроэнергии зависит прогресс всех других областей промышленности, входящих в состав топливно-энергетического комплекса. Энергетическое машиностроение, как одна из его частей, играет важнейшую роль технической базы для стабильного и успешного развития экономики государства в целом.

В условиях роста технического и технологического уровня промышленности стратегическое значение приобретают задачи качественного и подробного исследования режимов работы, а также проблемы своевременной диагностики и прогнозирования возможных неполадок, которые неизбежно возникают при использовании электрических машин.

Причины возникновения неисправностей имеют различную природу. Они могут являться, к примеру, результатом несовершенства технологических процессов производства, несоблюдения установленных условий эксплуатации, неверно настроенной защиты или ее отсутствия. Возникающие дефекты зачастую становятся причиной возникновения различного рода несимметрий в электрических и магнитных цепях электродвигателей. Согласно статистике, капитальному ремонту подвергается всего лишь 20% электродвигателей, в остальных случаях имеют дело с ранним возникновением неисправностей при эксплуатации. Для высоковольтных асинхронных двигателей большой мощности в подавляющем большинстве случаев причиной выхода из строя является повреждение обмоток – 85-90%, основные отказы обмоток обусловлены межвитковыми замыканиями – 93%.

Существующая на сегодняшний день защита направлена на сохранение электромеханической системы в целом и в большинстве случаев способна лишь экстренно отключить двигатель в случае превышения фазными токами допустимого уровня. Однако, в некоторых отраслях (металлургия, цементная, химическая промышленность) с непрерывным циклом производства это может оказаться крайне нежелательным по экономическим причинам или причинам, связанным с вопросами безопасности. Примером могут служить печи обжига клинкера на цементных предприятиях, где остановки в процессе работы не допускаются технологическим процессом и приводят к значительным материальным издержкам.

Исходя из этого, возникает необходимость временного устранения негативных воздействий несимметрии, в частности, снижения электромагнитного момента. Это предполагает соответствующую организацию системы защиты с

целью поддержания эксплуатационного режима при появлении признаков электрической несимметрии до завершения производственной операции без сопутствующего ущерба и осуществления контроля над состоянием неисправного электродвигателя.

С учетом вышесказанного, рассматриваемая в диссертационной работе проблема является актуальной и представляет интерес для исследования.

### **Степень разработанности темы исследования**

Тематике исследования аварийных режимов работы асинхронных двигателей принадлежат работы научных школ России, США, Канады, Германии, Италии и др., в лице таких ведущих специалистов как А.И. Адаменко, А.М. Пантелеева, Н.Г. Никияна, Т.Г. Сорокера, P.Tavner, L.Ran, J.Penman, W.Thomson, R.Gilmore и других.

Стоит отметить, что подавляющее большинство исследований, посвященных работе асинхронных двигателей в несимметричных режимах, рассматривают их негативное влияние на электрическую сеть и соответствующие методы его устранения. В данной же работе рассмотрены физические процессы, происходящие непосредственно в двигателе, а для компенсации последствий несимметрии предлагается воздействовать на первопричину – несимметричный асинхронный двигатель.

**Целью диссертационного исследования** является разработка метода поддержания непрерывности производственного цикла при появлении электрической несимметрии в цепях высоковольтных асинхронных двигателей большой мощности.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Классифицировать причины возникновения основных видов электрической несимметрии, ее негативные последствия для асинхронного двигателя, а также рассмотреть теоретические основы формулирования методов, пригодных для подавления в обмотке статора токов, возникающих от действия эллиптического поля ротора.

2. Разработать модификацию математической модели для расчета несимметричных режимов асинхронных двигателей с учетом нелинейных свойств стали магнитопровода и компьютерную программу для ее реализации.

3. На основе разработанной модификации математической модели исследовать влияние эффекта Гергеса на механическую характеристику, токи фаз статора и ротора и другие показатели высоковольтного асинхронного двигателя.

4. Разработать принципы и алгоритм синтеза устройства, реализующего в действующем электрооборудовании компенсацию провала электромагнитного момента.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработана модификация математической модели асинхронного двигателя, отличающаяся от известных тем, что позволяет производить расчет несимметричных режимов в совокупности с учетом нелинейных свойств стали магнитопровода.

2. Предложен метод устранения негативного влияния электрической несимметрии обмоток за счет подавления токов статора, являющихся результатом появления ЭДС, наведенных полем обратной последовательности ротора.

3. Сформулирован принцип работы устройства, поддерживающего эксплуатационный режим при появлении электрической несимметрии в обмотке ротора.

4. Разработан метод компенсации провала электромагнитного момента, реализуемый с использованием предложенного устройства.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем:

1. На основе разработанной модификации математической модели асинхронного двигателя написана компьютерная программа, предназначенная для расчета зависимостей токов фаз статора и ротора, угловой частоты вращения, электромагнитного момента электродвигателя в функции времени, а также статической механической характеристики в режимах работы, связанных с наличием электрической несимметрии обмоток двигателя в совокупности с учетом насыщения стали магнитопровода.

2. Разработано и запатентовано (патент РФ №2647882 от 21.03.18) устройство, позволяющее компенсировать провал в механическом моменте электродвигателя, вызванный появлением электрической несимметрии ротора, без необходимости немедленного его отключения, что представляет возможность завершить производственный цикл, избежать сопутствующих затрат, возможного выхода из строя сопряженного оборудования, а также исключить опасность для рабочего персонала.

3. Предложенная в работе компьютерная программа в совокупности с разработанным устройством компенсации провала электромагнитного момента могут быть использованы в качестве средства прогнозирования предаварийных состояний высоковольтных асинхронных двигателей.

#### **Методы исследования**

Основные результаты работы получены на базе фундаментальных теорем и уравнений электродинамики, численного расчета дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами с использованием метода последовательных приближений.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечены: строгим теоретическим обоснованием всех

положений диссертации, использованием современных методов и программных средств, соответствием полученных результатов опубликованным общепризнанным исследованиям, принятием корректных допущений при математическом описании явлений, использованием фундаментальных теорем и уравнений электродинамики, публикациями, практической реализацией полученных результатов.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модификация математической модели асинхронного двигателя, разработанная с целью расчета несимметричных режимов с учетом нелинейных свойств стали магнитопровода.

2. Результаты моделирования несимметричных режимов отрезка высоковольтных асинхронных двигателей типов 4ФАЗ и ФАЗМ производства НПО «ЭЛСИБ» ПАО, используемых в качестве элемента электропривода механизмов в цементной промышленности.

3. Устройство, поддерживающее эксплуатационный режим асинхронного двигателя при появлении электрической несимметрии обмотки ротора, предложенное и запатентованное автором.

#### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались на международных, российских и региональных совещаниях и конференциях, в том числе:

- всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука, технологии, инновации» 2011-2013, г. Новосибирск;

- городская научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов «Progress through Innovation», 2014, г. Новосибирск;

- I международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», 2014, г. Новосибирск;

- в рамках 17ой международной конференции молодых специалистов по Микро/Нанотехнологиям и электронным приборам (EDM -2016), г. Новосибирск;

- в рамках «Научной сессии НГТУ-2016» среди профессорско-преподавательского состава факультета ФМА, 2016, г. Новосибирск.

- в рамках 14ой международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018", г. Новосибирск.

#### **Публикации**

Результаты исследований изложены в 17 научных трудах, в том числе 6 статьях в журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, 3 статьях в журналах, индексируемых базой SCOPUS, получен 1 патент на изобретение.

### **Личный вклад**

Постановка научно-исследовательских задач и их решение, основные выводы и рекомендации диссертации принадлежат автору. Личный вклад в работах, опубликованных в соавторстве, составляет не менее 80 %.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 92 наименований, содержит 126 страниц текста, 45 рисунков и 4 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении:** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и научные задачи работы; приведены основные положения, выносимые на защиту; показана научная новизна исследований и оценена их практическая значимость, отражены уровень апробации и личный вклад автора в решение научных задач; представлены структура и объём диссертационной работы, а также объём публикаций.

**В первой главе** рассмотрен исторический путь развития индукционных двигателей, описана проблематика задач расчета несимметричных асинхронных машин, проведен обзор выполненных по данной теме работ поздних исследователей - А.И. Адаменко, А.М. Пантелеева, Н.Г. Никияна, P.Tavner, L.Ran, J.Penman, W. Thomson, R. Gilmore и др.

Классифицированы основные типы несимметричных режимов асинхронного двигателя и причины их возникновения. Отмечено, что перекося фазных токов, как и их несинусоидальность, порождают магнитный поток, вращающийся в обратном по отношению к основному потоку направлении, что приводит, в конечном счете, к перегреву двигателя, вибрации и повышенному износу узлов электрической машины.

Выполнен сравнительный анализ основных методов расчета несимметричных режимов работы асинхронных двигателей. В результате классификации среди аналитических выделены методы двух реакций, вращающихся полей и симметричных составляющих, как наиболее распространенные для решения данной задачи. Отмечено, что эти методы сводятся, в конечном счете, к использованию метода наложения, что делает невозможным учет насыщения стали магнитопровода, высших гармоник МДС, что в определенной степени отражается на точности расчетов. В качестве альтернативы предложено непосредственное интегрирование исходной системы дифференциальных уравнений численными методами.

Для выполнения поставленной задачи компенсации провала электромагнитного момента при появлении электрической несимметрии обмоток асин-

хронного двигателя проанализированы причины его возникновения. Показано, что для компенсации провала в статической механической характеристике асинхронного двигателя пригодны методы, приводящие к ослаблению влияния ЭДС обратной последовательности в статоре, индуцируемой несимметричным магнитным потоком ротора, на суммарный ток статора.

**Во второй главе** получены модификации исходной математической модели асинхронного двигателя для исследования несимметричных режимов работы с учетом насыщения стали магнитопровода для двух типов задач - неравенства сопротивлений по фазам и случая межвиткового короткого замыкания. Общий алгоритм модификации представлен на рисунке 1.

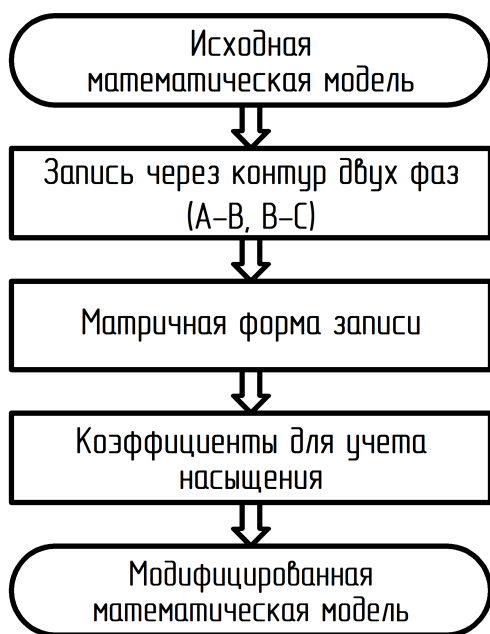


Рисунок 1 – Алгоритм модификации исходной математической модели асинхронного двигателя

За основу взята общеизвестная математическая модель асинхронного двигателя в трехфазной естественной системе координат. Исходная математическая модель трехфазного асинхронного двигателя рассматривается со следующими допущениями:

- энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре, т.е. принято, что магнитная проницаемость стали равна бесконечности;
- потери в стали и механические потери пренебрежимо малы;
- воздушный зазор равномерен;
- питающая сеть имеет бесконечно большую мощность.

Использование математической модели в исходном виде для анализа электромагнитных процессов при одновременном учете несимметрии в обмотках фаз асинхронного двигателя и насыщения стали представляется неудобным. Это неудобство обосновано тем, что взаимные индуктивности  $M_{Ab}$ ,  $M_{Bc}$ , ..., соответствуют различным частям магнитопровода, находящимся в различных состояниях насыщения. Вычисление результирующей взаимной индуктивности в этом случае представляет собой отдельную сложную задачу.

В качестве решения данной проблемы в модификации математической модели были предприняты следующие шаги:

- в отличие от исходной системы уравнения записаны не для каждой фазы, как в классической записи, а для двух соседних контуров – контура фаз А и В и контура фаз В и С.



- обоснованы и выведены коэффициенты, отражающие состояние насыщения магнитопровода каждой из фаз. Изменяющиеся вследствие насыщения взаимные индуктивности при этом определяются путем умножения эквивалентной взаимной индуктивности  $L_m$  на данные коэффициенты.

Разрабатываемая модификация математической модели для решения задач диссертационной работы включает в себя два блока: для статора и ротора.

Система уравнений для блока статора в данном случае имеет вид:

$$\begin{cases} u_A - i_A \cdot R_A - \frac{d\Psi_A}{dt} - u_B + i_B \cdot R_B + \frac{d\Psi_B}{dt} = 0 \\ u_B - i_B \cdot R_B - \frac{d\Psi_B}{dt} - u_C + i_C \cdot R_C + \frac{d\Psi_C}{dt} = 0. \\ i_A + i_B + i_C = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений для блока ротора в данном случае имеет вид:

$$\begin{cases} -i_a \cdot R_a - \frac{d\Psi_a}{dt} + i_b \cdot R_b + \frac{d\Psi_b}{dt} = 0 \\ -i_b \cdot R_b - \frac{d\Psi_b}{dt} + i_c \cdot R_c + \frac{d\Psi_c}{dt} = 0, \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $u_A, u_B, u_C$  - мгновенные значения напряжений на зажимах фаз статора;  
 $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$  - мгновенные значения токов обмоток фаз статора и ротора;

$\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  - полные потокосцепления фаз статора и ротора;

$R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$  - активные сопротивления фаз статора и ротора.

В системах уравнений (1) и (2) выражения для потокосцеплений имеют вид:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_A \cdot i_A + M_{AB} \cdot i_B + M_{AC} \cdot i_C + \\ &+ M_{Aa} \cdot i_a \cdot \cos(\gamma) + M_{Ab} \cdot i_b \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{Ac} \cdot i_c \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) ; \\ \Psi_B &= M_{BA} \cdot i_A + L_B \cdot i_B + M_{BC} \cdot i_C + \\ &+ M_{Ba} \cdot i_a \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{Bb} \cdot i_b \cdot \cos(\gamma) + M_{Bc} \cdot i_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) ; \\ \Psi_C &= M_{CA} \cdot i_A + M_{CB} \cdot i_B + L_C \cdot i_C + \\ &+ M_{Ca} \cdot i_a \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{Cb} \cdot i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{Cc} \cdot i_c \cdot \cos(\gamma) ; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Psi_a &= M_{aA} \cdot i_A \cdot \cos(\gamma) + M_{aB} \cdot i_B \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{aC} \cdot i_C \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \\ &+ L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c \\ \Psi_b &= M_{bA} \cdot i_A \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{bB} \cdot i_B \cdot \cos(\gamma) + M_{bC} \cdot i_C \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \\ &+ M_{ba} \cdot i_a + L_b \cdot i_b + M_{bc} \cdot i_c \\ \Psi_c &= M_{cA} \cdot i_A \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{cB} \cdot i_B \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{cC} \cdot i_C \cdot \cos(\gamma) + \\ &+ M_{ca} \cdot i_a + M_{cb} \cdot i_b + L_c \cdot i_c \end{aligned}$$

где  $\gamma$  - угол между осями одноименных обмоток фаз статора и ротора;

$L_A, L_B, L_C, L_a, L_b, L_c$  - индуктивности обмоток фаз статора и ротора;

$M_{AB}, M_{AC}, M_{BA}, M_{BC}, M_{CA}, M_{CB}$  - взаимные индуктивности между обмотками фаз статора;

$M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$  - взаимные индуктивности между обмотками фаз ротора;

$M_{Aa}, M_{Ba}, M_{Ca}, \dots$  - взаимные индуктивности между обмотками соответствующих фаз статора и ротора.

Электромагнитный момент асинхронной машины определяется как частная производная по геометрическому углу от электромагнитной энергии машины. Электромагнитная энергия асинхронной машины на основании законов преобразования энергии определяется по соотношению:

$$W_{\Sigma} = \frac{1}{2} \cdot [\Psi_A \cdot i_A + \Psi_B \cdot i_B + \Psi_C \cdot i_C + \Psi_a \cdot i_a + \Psi_b \cdot i_b + \Psi_c \cdot i_c] \quad (4)$$

Отсюда электромагнитный момент асинхронного двигателя:

$$M = \frac{\partial W_{\Sigma}}{\partial \gamma} \cdot Z_p, \quad (5)$$

где  $Z_p$  – число пар полюсов двигателя.

Уравнение движения с учетом момента сопротивления запишется как

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (6)$$

где  $M_C$  - момент сопротивления;

$J$  - суммарный момент инерции электропривода;

$\omega$  - угловая частота вращения ротора, рад/с.

Подставляя выражения для потокосцеплений (3) в системы (1) и (2), после математических преобразований, а также представления полученного результа-

та в матричной форме записи, получена система уравнений для расчета токов фаз статора и ротора при наличии электрической несимметрии:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_a \\ i_b \end{bmatrix} = -A^{-1} \times B, \quad (7)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -L_{1\sigma} - 3 \cdot \frac{L_m}{2} & L_{1\sigma} + 3 \cdot \frac{L_m}{2} & -3 \cdot \cos(\varphi + \frac{\pi}{3}) \cdot L_m & -3 \cdot \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \cdot L_m \\ -L_{1\sigma} - 3 \cdot \frac{L_m}{2} & -2 \cdot L_{1\sigma} - 3 \cdot L_m & 3 \cdot \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \cdot L_m & -3 \cdot \cos(\varphi) \cdot L_m \\ 3 \cdot \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \cdot L_m & -3 \cdot \cos(\varphi + \frac{4\pi}{3}) \cdot L_m & -L_{2\sigma} - 3 \cdot \frac{L_m}{2} & L_{2\sigma} + 3 \cdot \frac{L_m}{2} \\ 3 \cdot \cos(\varphi + \frac{4\pi}{3}) \cdot L_m & -3 \cdot \cos(-\varphi) \cdot L_m & -L_{2\sigma} - 3 \cdot \frac{L_m}{2} & -2 \cdot L_{2\sigma} - 3 \cdot L_m \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} u_A - u_B - i_A \cdot R_A + i_B \cdot R_B + i_a \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi + \frac{\pi}{3}) + i_b \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ u_B - u_C - i_A \cdot R_C - i_B \cdot (R_B + R_C) + i_a \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot (-3 \cdot \sin(\varphi + \frac{2 \cdot \pi}{3})) + i_b \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi) \\ -i_a \cdot R_a + i_b \cdot R_b + i_A \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot (-3 \cdot \sin(\varphi + \frac{2 \cdot \pi}{3})) + i_B \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi + \frac{4 \cdot \pi}{3}) \\ -i_a \cdot R_c - i_b \cdot (R_b + R_c) + i_A \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot (-3 \cdot \sin(\varphi + \frac{4 \cdot \pi}{3})) + i_B \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi) \end{bmatrix}$$

Система уравнений (7) в совокупности с выражениями (4) – (6) составляют полную запись модификации математической модели асинхронного двигателя в трехфазной естественной системе координат, которая обладает возможностью расчета несимметричных режимов работы машины.

Как уже было сказано, учет насыщения стали магнитопровода при наличии электрической несимметрии осуществляется путем умножения эквивалентной взаимной индуктивности  $L_m$  на коэффициенты, отражающие влияние насыщения на данную фазу и вытеснение магнитного потока в пазы.

На основании вышесказанного, реализация учета насыщения стали магнитопровода системой уравнений (7) представлена в виде:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_a \\ i_b \end{bmatrix} = -A^{-1} \times K \times B, \quad (8)$$

где  $K = \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_a \\ K_b \end{bmatrix}$  - матрица коэффициентов изменения эквивалентной взаимной

индуктивности от влияния насыщения стали магнитопровода. Подробное обоснование и вывод данных коэффициентов приведены в тексте диссертации.

Данные выражения справедливы для первой задачи, рассматриваемой в работе - неравенства сопротивлений по фазам. Для второй задачи – межвиткового короткого замыкания – в тексте диссертации приведен вывод собственной модификации исходной математической модели. Принципы аналогичны приведенному выше примеру, с добавлением уравнения для короткозамкнутого контура и учетом составляющих тока данного контура в выражениях для потокосцеплений обмоток фаз статора и ротора.

**В третьей главе** на базе программного пакета MatLab и описанной выше модификации математической модели разработана компьютерная программа, обладающая возможностью расчета несимметричных режимов работы асинхронного двигателя с учетом насыщения стали магнитопровода.

Для рассмотрения по существу из большого многообразия несимметричных режимов асинхронного двигателя в данной работе были выбраны два случая. Первый из них – режим обрыва фазы статора или ротора – чаще других описывается в известной литературе, что дает представление об ожидаемых результатах моделирования и позволяет оценить адекватность модели. Кроме этого, в случае с обрывом фазы ротора, можно наблюдать характерное явление – эффект Гёргеса (одноосного включения), представляющего собой провал механического момента двигателя при скольжении, близком к 0,5. Второй случай – межвитковое короткое замыкание – чаще других является причиной выхода двигателя из строя.

В качестве объекта исследования выступают асинхронные двигатели с фазным ротором серий ФАЗМ и 4ФАЗ производства НПО «ЭЛСИБ» ПАО.

Для демонстрации работы программы осуществлен расчет предельного случая несимметрии статора – обрыва одной фазы, результаты которого приведены на рисунке 2.

Наличие магнитных потоков обратной последовательности при обрыве обмотки статора вследствие несимметрии статорных токов создает составляющую механического момента, имеющую синхронный режим при скольжении  $s=2$ , и равную по модулю моменту прямой последовательности в точке  $s=1$ . Таким образом, при обрыве фазы обмотки статора наблюдается значительное уменьшение максимального и падение до нуля пускового момента.

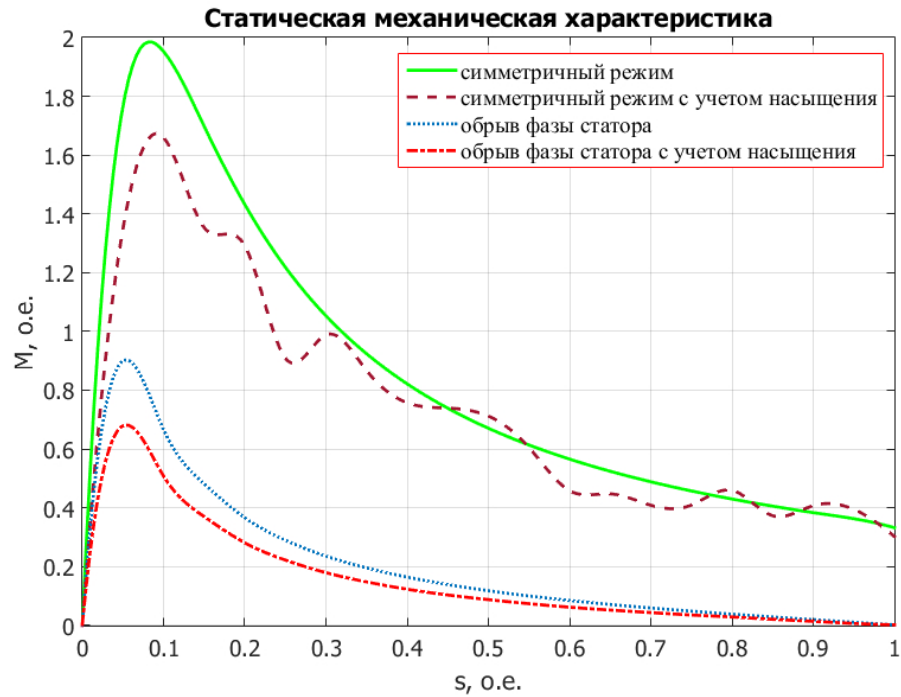


Рисунок 2 - Статические механические характеристики асинхронного двигателя в симметричном режиме и при обрыве одной фазы статора

При учете насыщения магнитопровода статическая механическая характеристика обретает локальные скачки и провалы, объясняемые появлением спектра высших гармоник в составе магнитного потока ротора и статора. Их взаимодействие и порождает искривление механической характеристики. Наибольшее их влияние можно заметить на статической механической характеристике, соответствующей несимметричным режимам ротора, в данном случае построенной для обрыва одной фазы (рисунок 3).

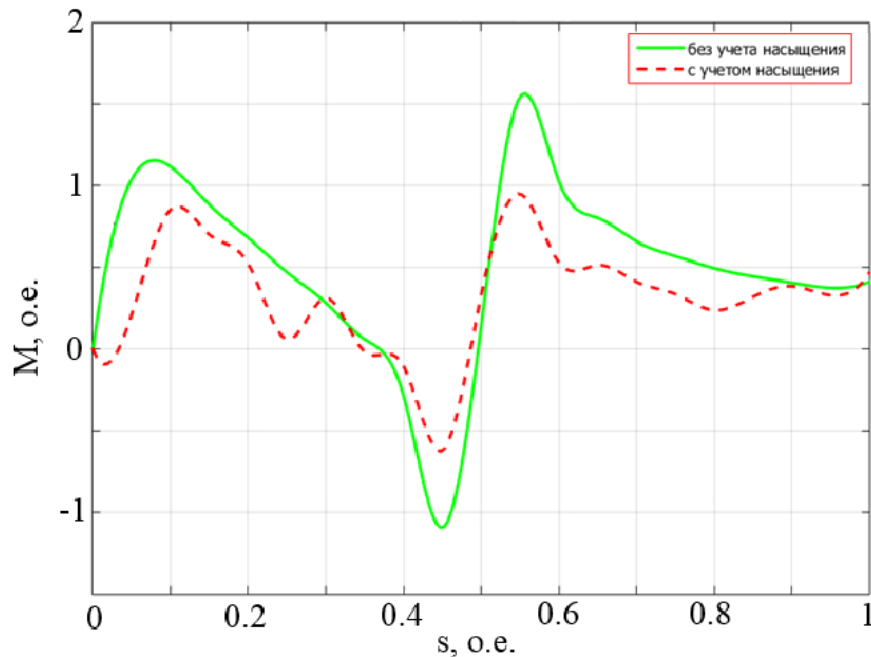


Рисунок 3 – Статические механические характеристики асинхронного двигателя при обрыве одной фазы ротора

Провал с отрицательными значениями электромагнитного момента обусловлен эффектом одноосного включения, именуемым эффектом Гёргеса.

Токи фаз статора и ротора, а также угловая частота вращения ротора двигателя в режиме обрыва фазы ротора представлены на рисунках 4 - 6.

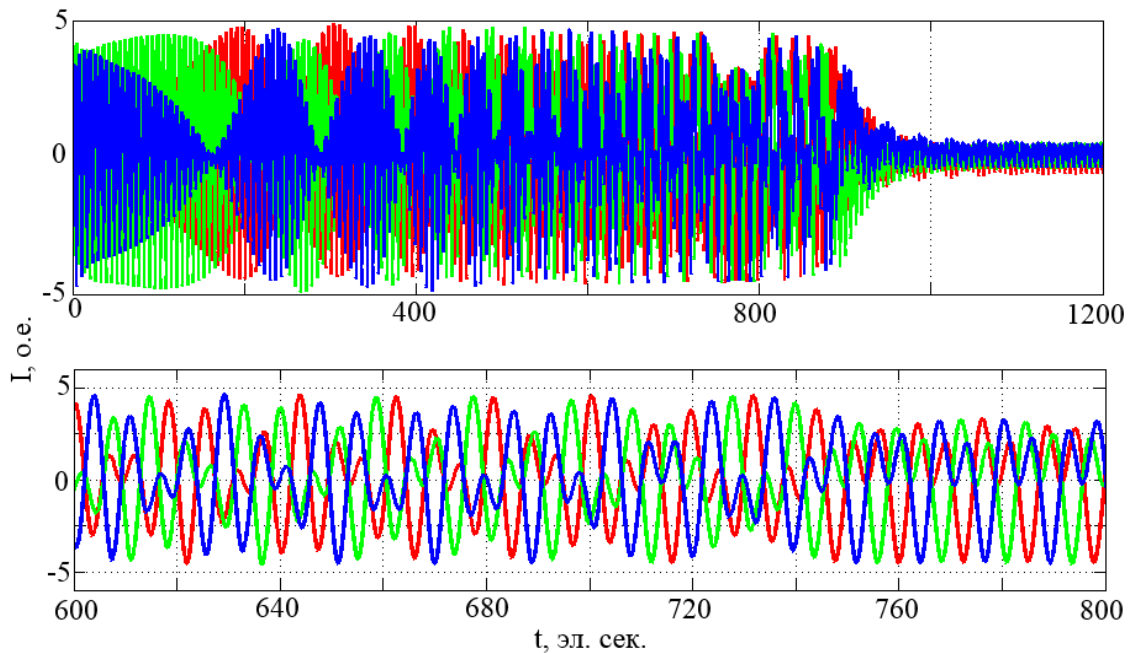


Рисунок 4 - Зависимость токов фаз статора и ротора от времени при обрыве фазы ротора

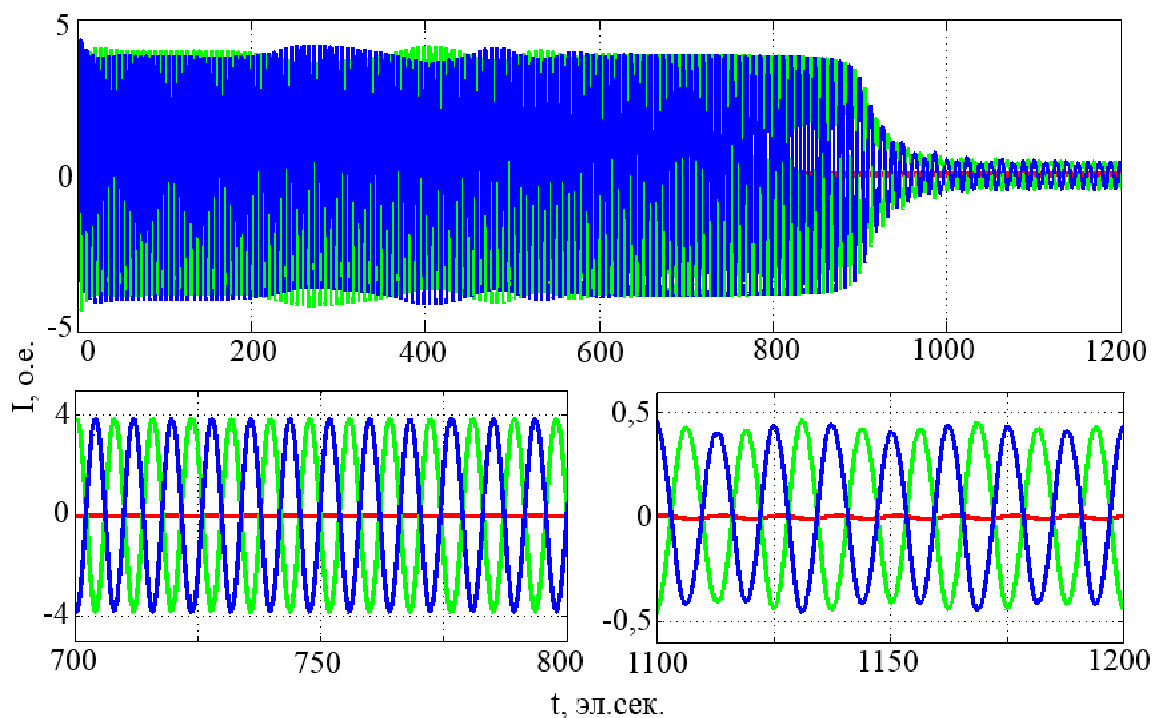


Рисунок 5 - Зависимость токов фаз статора и ротора от времени при обрыве фазы ротора

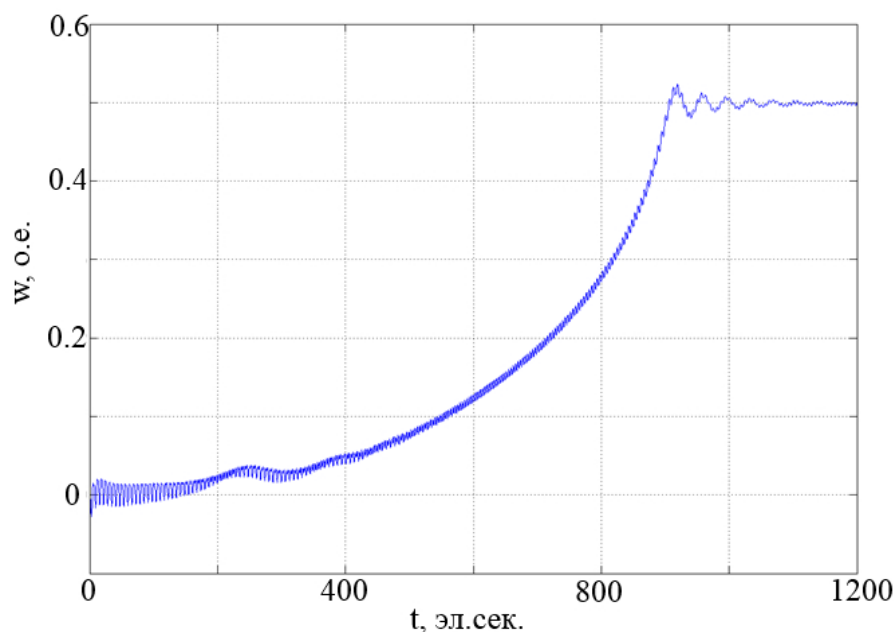


Рисунок 6 - Зависимость угловой частоты вращения ротора от времени при обрыве фазы ротора

Анализируя механические характеристики, построенные для случая с учетом насыщения магнитопровода (рис.2 и 3), можно заметить, что максимальные значения электромагнитного момента для насыщаемого магнитопровода несколько ниже. Количественную оценку влияния учета насыщения при расчете несимметричного режима на конечный результат удобно проводить по величинам тока в установившемся режиме. Сравнительная характеристика приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние учета насыщения при расчете величин токов в несимметричном режиме

Тип двигателя	Ток фазы А статора при обрыве одной фазы ротора, о.е.		
	$\mu_{cm} = \infty$	$\mu_{cm} \neq \infty$	Разница, %
4ФАЗ-800-6000У2,5	0,43	0,49	13,9
4ФАЗ-800-10000У2,5	0,46	0,54	14,8
ФАЗМ4000-6000С УХЛ4	0,48	0,55	13,4
ФАЗМ4000-10000 УХЛ4	0,47	0,53	12,8

Для установления влияния уровня несимметрии на величину провала момента было построено семейство статических механических характеристик с различными величинами сопротивлений  $R_a$  в фазе ротора.

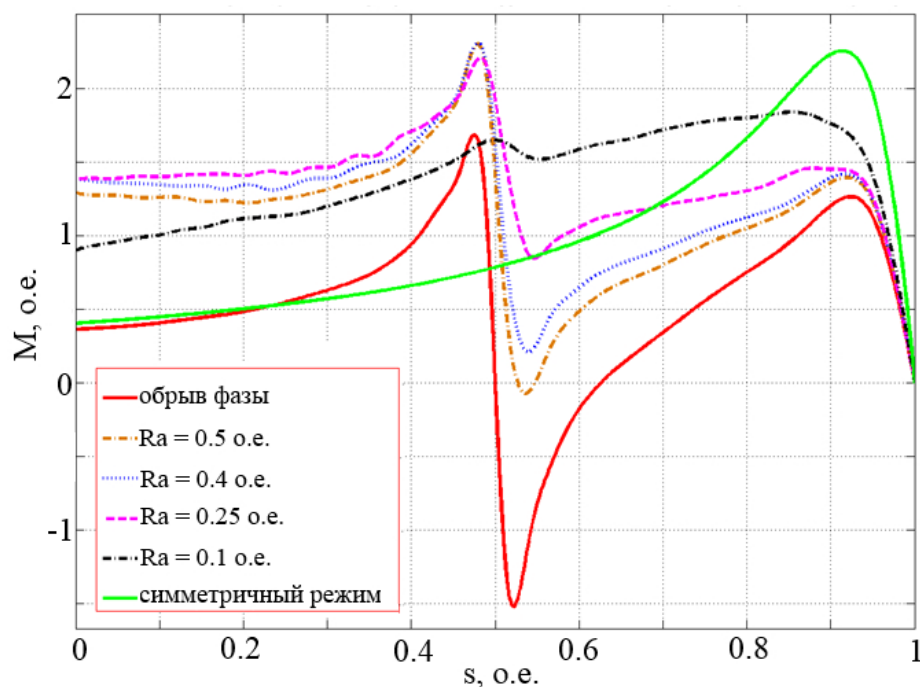


Рисунок 7 - Семейство статических механических характеристик с различными уровнями несимметрии сопротивлений одной из фаз ротора

Как видно из рисунка 7, с увеличением сопротивления фазы ротора растет и величина провала момента двигателя. Нужно отметить, что если величина этого провала станет настолько большой, что момент двигателя в области скольжения  $s=0,5$  окажется меньше момента нагрузки, двигатель не сможет разогнаться свыше половинной скорости вращения. К тому же, с ростом сопротивления фазы ротора растет и величина номинального скольжения, что приводит к увеличению потерь двигателя и, как результат, к повышению нагрева обмоток.

Для второго рассматриваемого в работе случая – межвиткового короткого замыкания – проведены аналогичные расчеты и получены искомые характеристики. Кроме всего прочего, для случая межвиткового короткого замыкания в одной из фаз ротора определено минимальное процентное соотношение короткозамкнутых витков, при котором величина электромагнитного момента двигателя в области провала оказывается ниже номинального момента нагрузки. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Величина числа короткозамкнутых витков фазы ротора для условия  $M_{дв} < M_n$

Тип двигателя	Число короткозамкнутых витков одной из фаз ротора для условия $M_{дв} < M_n$ , %
4ФАЗ-800-6000У2,5	49
4ФАЗ-800-10000У2,5	46
ФАЗМ4000-6000С УХЛ4	52
ФАЗМ4000-10000 УХЛ4	50

**В четвёртой главе** приведено устройство питания асинхронного двигателя, разработанное в ходе проведенных исследований, обеспечивающее поддержа-



ние эксплуатационного режима при возникновении несимметрии ротора асинхронного двигателя. На данное устройство оформлен патент на изобретение (патент РФ № 2647882 от 21.03.18).

Устройство работает следующим образом: при подаче напряжения питания задающий генератор 10 (рис.8) формирует синусоидальные симметричные уровни напряжений, умножаемые на некоторый коэффициент, обратно пропорциональный среднему значению фазных амплитуд статора и ограниченный задаваемым максимальным пусковым током. Произведения напряжений на этот коэффициент подаются на сумматоры 4, 5, 6, на выходах которых формируются разностные составляющие токов задаваемых и токов фактически протекающих по фазам статора асинхронного двигателя 20. Эта разностная составляющая управляет мостовыми инверторами 21, 22, 23 на основе ШИМ – появление положительного сигнала токового рассогласования приводит к увеличению длительности импульса в периоде ШИМ, из-за чего среднее значение напряжения на выходе инверторов 21, 22, 23 повышается, и наоборот – отрицательный сигнал токового рассогласования снижает длительность импульса в периоде, что приводит к уменьшению среднего напряжения на выходе инверторов 21, 22, 23.

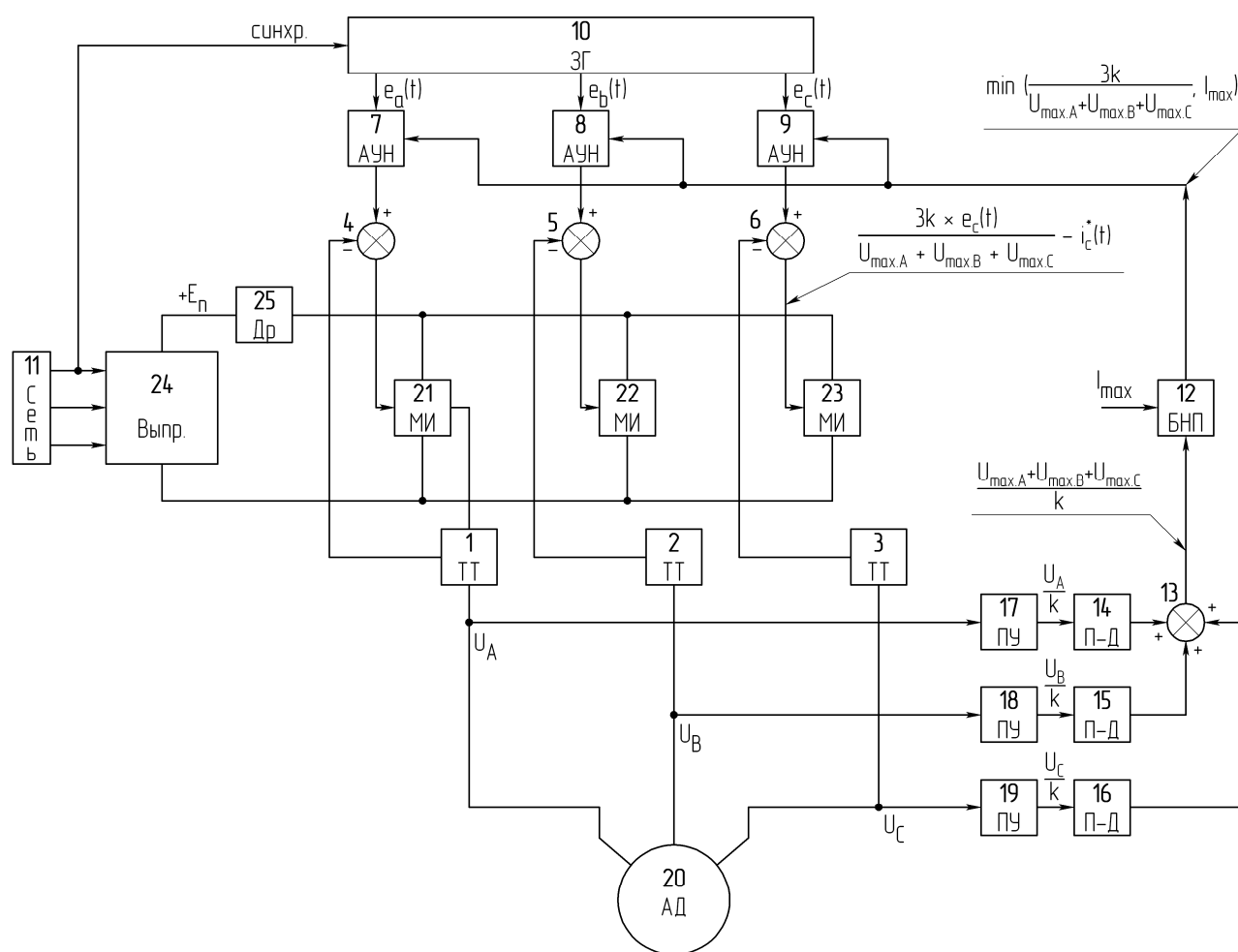


Рисунок 8 - Блок-схема устройства питания асинхронного двигателя с компенсацией провала механической характеристики

Для компенсации пускового момента в предлагаемом устройстве предусмотрена цепь коррекции, состоящая из блока формирования средней амплитуды 13, блока нелинейного преобразования 12 и аналоговых умножителей напряжения 7, 8, 9, и повышающая уровень фазных токов статора асинхронного двигателя 20 при малых напряжениях на зажимах фаз статора умножением формируемых задающим генератором 10 токов на коэффициент, обратно пропорциональный амплитудным напряжениям фаз статора.

Таким образом, благодаря введению трансформаторов тока устройство питания асинхронного двигателя способно задавать симметричные синусоидальные токи фаз статора, что избавляет асинхронный двигатель от провала в статической механической характеристики ниже нуля при наличии в нем электрической несимметрии в роторе.

Для корректного выбора элементов устройства и его эффективной работы, необходимо соблюдать принципы синтезирования, реализуемые в приведенном ниже алгоритме (рис. 9), состоящем из трех основных блоков.

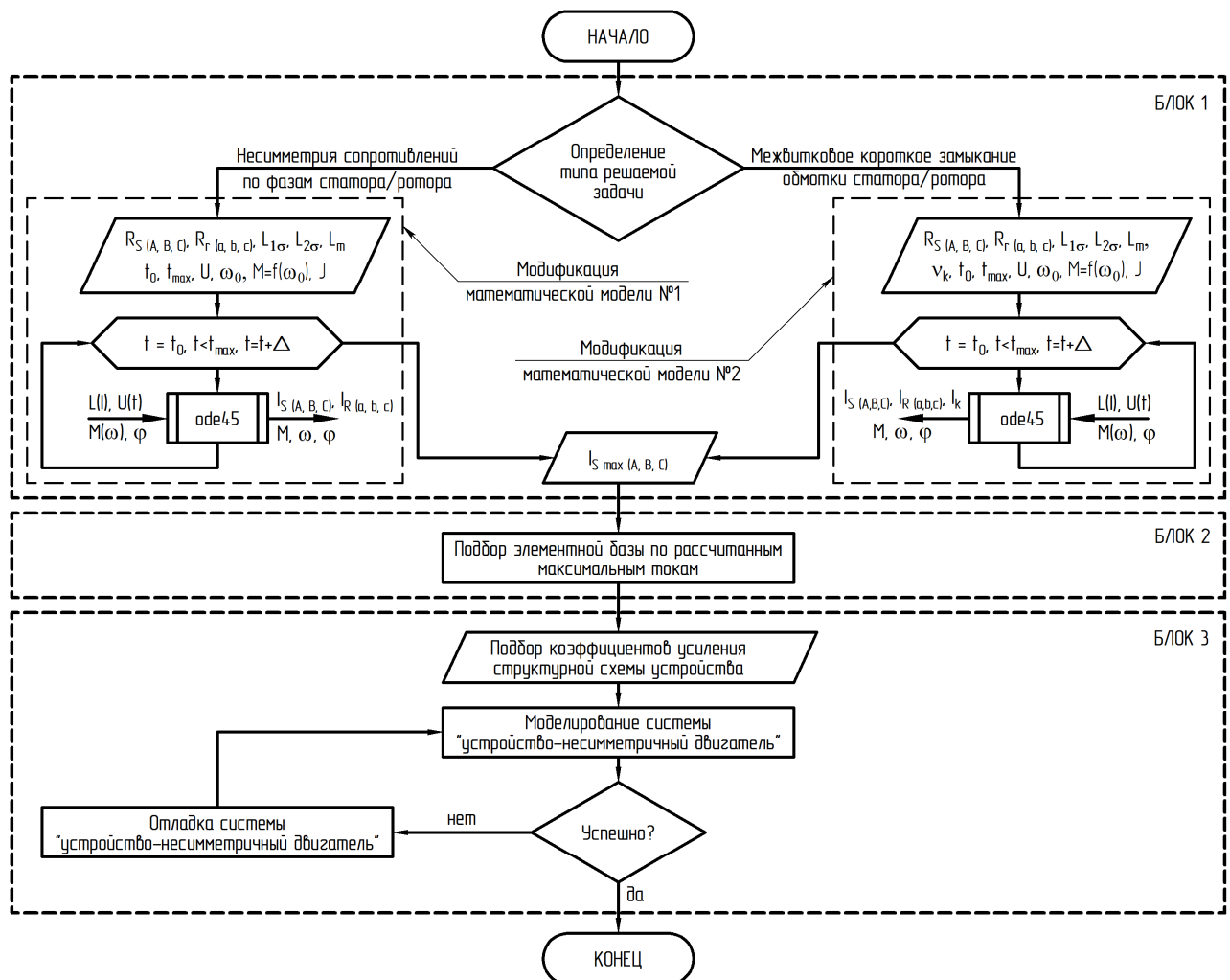


Рисунок 9 – Алгоритм синтезирования системы «устройство - несимметричный асинхронный двигатель»

Первый блок основан на определении максимальных токов в обмотках статора асинхронного двигателя при наличии электрической несимметрии в цепи ротора. Данная величина токов необходима для подбора некоторых элементов устройства – трансформаторов тока, мостовых инверторов и др. На этом этапе следует определить характер решаемой задачи, от чего будет зависеть выбор одной из математических моделей для расчета характеристик асинхронного двигателя, описанных в главе 2.

Второй блок предназначен для корректного выбора элементов устройства (рис. 8), поддерживающего эксплуатационный режим работы при наличии электрической несимметрии в цепи ротора. Для эффективной работы устройства его элементная база должна учитывать максимально допустимые токи, рассчитанные на первом шаге алгоритма.

Третий блок предназначен для оптимизации системы «устройство-двигатель», осуществляемой на основе моделирования конкретных исследуемых режимов. Важной и наиболее трудоемкой задачей на этом этапе является подбор коэффициентов усиления соответствующих блоков структурной схемы для реализации эффективной работы системы в целом.

Результат реализации данного алгоритма для частного случая работы асинхронного двигателя при наличии несимметрии в роторной цепи приведен ниже. Для асинхронного двигателя типа 4ФА3-800-6000У2,5 рассмотрен вариант работы системы «устройство-двигатель» при неравенстве активных сопротивлений фаз обмотки ротора. На основе программного пакета MatLab Simulink реализовано моделирование системы «устройство-двигатель» при несимметрии электрических сопротивлений в цепи ротора. Частный случай структурной схемы моделируемой системы представлен на рисунке 10.

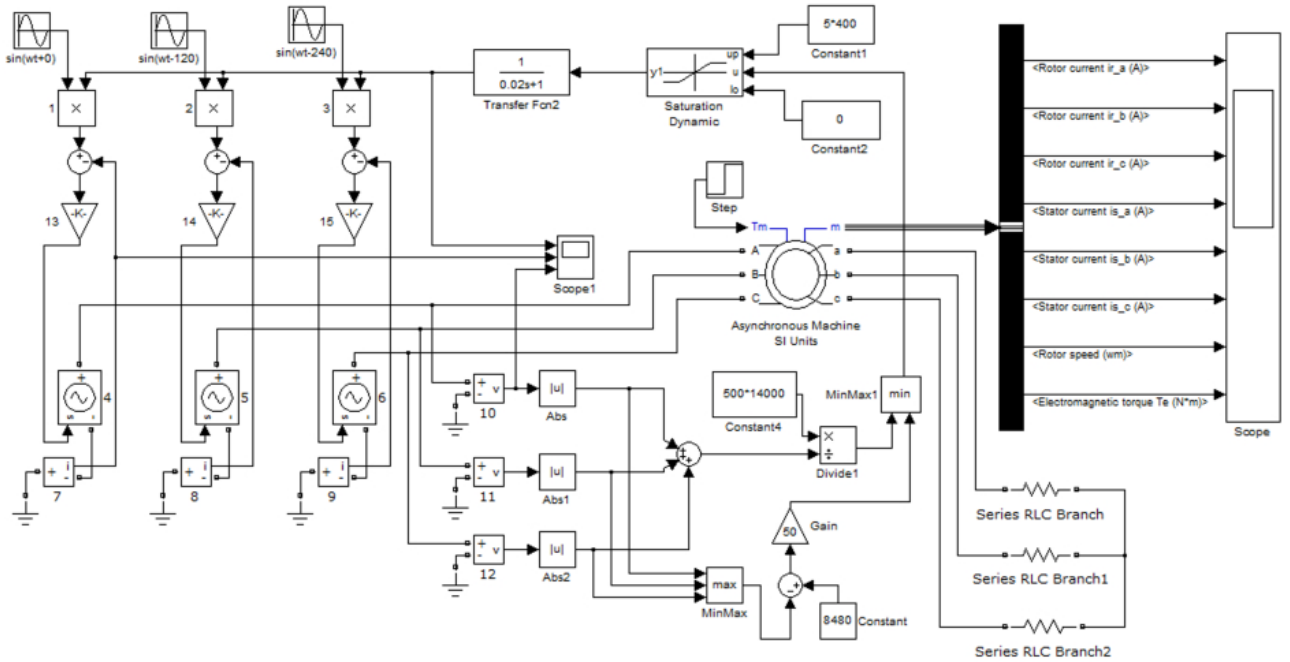


Рисунок 10 – Структурная схема системы «устройство-несимметричный асинхронный двигатель»

Зависимости токов статора и ротора, скорости вращения ротора и электромагнитного момента от времени, полученные при моделировании, показаны на рисунках 11-13.

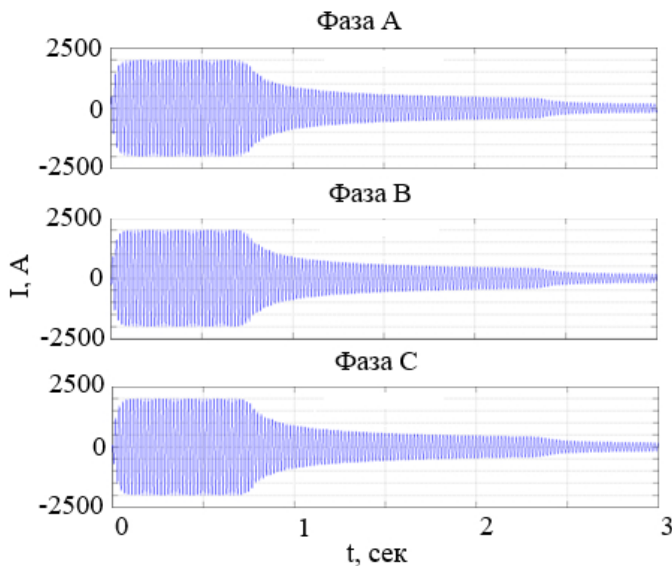


Рисунок 11 – Токи фаз статора при несимметрии ротора и их принудительном задании в функции времени.

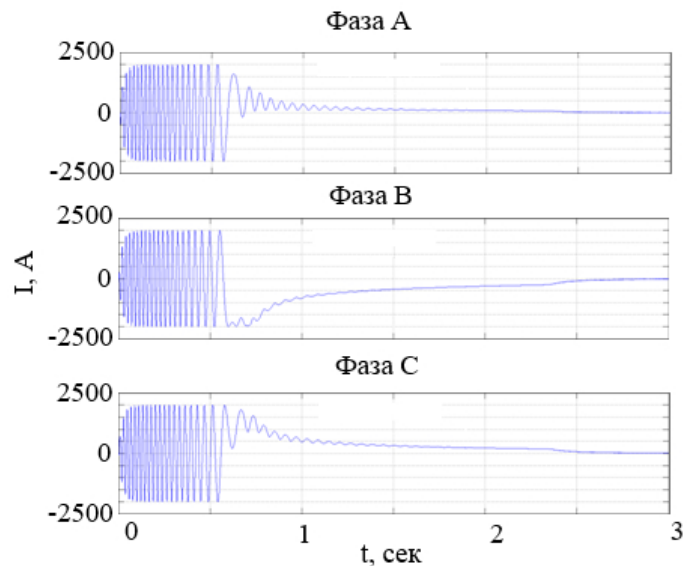


Рисунок 12 – Токи фаз ротора при несимметрии ротора и принудительном задании токов статора в функции времени.

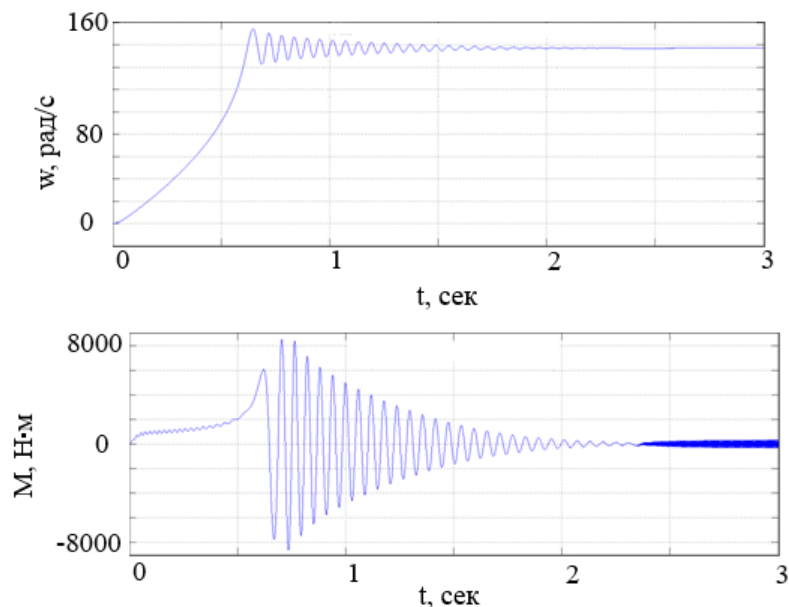


Рисунок 13 – Угловая частота вращения ротора и электромагнитный момент при несимметрии ротора и принудительном задании токов статора в функции времени.

По полученным осциллограммам характеристик асинхронного двигателя можно сделать вывод об эффективном решении устройством задачи устранения провала электромагнитного момента при наличии электрической несимметрии обмотки ротора, что предоставляет возможность довести технологическую операции до завершения без необходимости немедленного отключения двигателя.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В диссертационной работе решена крупная научно-техническая задача, имеющая важное народно-хозяйственное значение и получены следующие результаты:

1. Выполнены классификация основных типов несимметричных режимов асинхронных двигателей и анализ причин их возникновения. Вычленены группы несимметричных режимов, наиболее часто имеющих место в высоковольтных асинхронных двигателях цементной промышленности. Отмечено, что вследствие перекоса фазных токов, как и их несинусоидальности, порождается магнитный поток, вращающийся в обратном по отношению к основному потоку направлении, что приводит, в конечном счете, к перегреву двигателя, вибрации и повышенному износу узлов электрической машины, а также к возникновению паразитного момента, вызывающего провал в механической характеристике двигателя.

2. Выполнена систематизация основных методов расчета несимметричных режимов работы асинхронных двигателей: аналитических и численных. Анализ показал, что наиболее широко применяемые аналитические методы сводятся к применению метода наложения, что делает невозможным учет нелинейных свойств стали магнитопровода. Применение же численных методов позволяет обойти эти недостатки. Отмечено, что при решении различных задач целесообразно использовать комбинации аналитических и численных методов.

3. Предложена модификация математической модели для расчета несимметричных режимов работы асинхронного двигателя, отличающаяся возможностью относительно простого и точного учета нелинейных свойств стали магнитопровода. Автором разработаны методика расчета несимметричных режимов асинхронных двигателей и реализующая ее компьютерная программа, успешно внедренные в электромагнитных и тепловых расчетах НПО «ЭЛСИБ» ПАО, в частности для оценки момента на валу и токов и их пульсаций при аварийных режимах, а также для выработки рекомендаций для возможности продолжения эксплуатации двигателей до вывода в ремонт.

4. С помощью разработанных автором инструментальных средств оценено влияние эффекта Гёргеса, связанного с появлением в обмотке статора токов обратной последовательности вследствие обрыва фазы обмотки ротора, на провал кривой электромагнитного момента. Установлено влияние уровня электрической несимметрии ротора на провал электромагнитного момента. Показан принцип определения допустимого числа короткозамкнутых витков фазы для сохранения вращения электродвигателя. Выявлено, что данные величины следует определять индивидуально, так как они в значительной степени зависят от типа нагрузки.

5. Автором предложено несколько методов, пригодных для устранения негативного влияния несимметрии сопротивлений фаз обмоток электродвигателя на эксплуатационные характеристики машины.

Один из этих методов – принудительное задание токов статора с использованием источника тока - использован в предложенном устройстве, позволяющем устранить провал в механической характеристике. Принцип его действия основан на поддержании постоянства действующих значений фазных токов обмотки статора и подавлении возникающих в обмотке статора токов, обусловленных наличием системы напряжений обратной последовательности в обмотке ротора вследствие несимметрии сопротивлений. Проведена верификация результатов компенсации с использованием разработанного устройства на основе моделирования системы устройство-несимметричный высоковольтный асинхронный двигатель в программном пакете MatLab Simulink. Подтверждена эффективность устройства применительно к поставленной задаче.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### ***Статьи, опубликованные в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК:***

1. Лавренов Е.О., Тюков В.А. Оценка интенсивности процессов разгона и торможения индукционного двигателя на этапе проектирования машины // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета». 2014. № 3 (56). С. 151-159;
2. Лавренов Е.О. Имитационная модель асинхронной машины с учетом

электрической несимметрии и насыщения магнитной цепи // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 3. С. 25-30;

3. Лавренов Е.О. Методы компенсации влияния электрической несимметрии на механический момент индукционного двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2016. – Т. 327. – № 1. С.72-78;

4. Лавренов Е.О., Тюков В.А. Численное моделирование несимметрии статора и ротора асинхронного двигателя // Электротехника. – 2017. №1. С.9-14;

5. Лавренов Е.О., Темлякова З.С., Темляков А.А. Оценка влияния межвиткового короткого замыкания на качество работы асинхронного двигателя // Доклады АН ВШ РФ. – 2019. – № 1 (42). – С. 62-72;

6. Лавренов Е.О., Темлякова З.С., Темляков А.А. Принципы синтезирования устройства, поддерживающего эксплуатационный режим двигателя при несимметрии обмотки ротора // Доклады АН ВШ РФ. – 2019. – № 3 (44). – С. 48-56.

#### ***Патент на изобретение РФ:***

7. Лавренов Е.О. Устройство питания асинхронного двигателя. Патент на изобретение RU 2647882 С2, 21.03.2018. Заявка № 2016106441 от 24.02.2016 г.

#### ***Статьи в изданиях, индексируемых базами Scopus и/или WebofScience:***

8. Lavrenov E.O. et al. Electrical asymmetry level influence on quality attributes of an induction motor. Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020. Bristol, England, 2020;

9. Lavrenov E.O., Temlyakova Z.S., Vilberger M.E. Estimate of turn-to-turn short circuit influence on an induction motor operation quality. Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – proceedings APEOE-2018, 02-08 October 2018, Novosibirsk, Russia, pp. 233-237;

10. Lavrenov E.O. Torque dip compensation at electrical asymmetry in rotor circuit of induction motor. 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM -2016) Conference Proceedings, 2016, pp. 486-489.

#### ***Статьи в прочих рецензируемых научных изданиях и материалах конференций:***

11. Лавренов Е.О. Учет насыщения магнитной цепи при моделировании электрической несимметрии индукционного двигателя. «Электротехника. Энергетика. Машиностроение». Сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых, 2014, С. 27-30;

12. Лавренов Е.О. К численному моделированию несимметричных режимов работы асинхронных двигателей // Сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов

«Высокие технологии в современной науке и технике» ВТСНТ - 2014. Национальный исследовательский Томский политехнический университет; под редакцией В.В. Лопатина, А.Н. Яковлева, 2014 г., С. 355-357;

13. Lavrenov E. Modes of induction motor at electrical asymmetry of rotor circuit. «Progress through Innovation». Тезисы городской научно-практической конференции аспирантов и магистрантов. Новосибирский государственный технический университет, 2014 г., С. 71;

14. Лавренов Е.О. Коррекция механической характеристики индукционного двигателя напряжением питания при продольной несимметрии ротора. «Теоретические и прикладные вопросы образования и науки». Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, 2014 г., С. 78-80;

15. Лавренов Е.О. Способы учета насыщения магнитопровода в имитационном моделировании асинхронного двигателя с использованием численных методов. Сборник научных трудов НГТУ, 2014 г. № 2 (76). С. 58-63.

16. Лавренов Е.О. Компьютерная программа для исследования несимметрии ротора асинхронного двигателя. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации – 2013 г.», 2013 г., С.116-119;

17. Лавренов Е.О., Тюков В.А. Определение допустимого промежутка времени при внезапном понижении напряжения, подводимого к асинхронному двигателю. Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов I Международной (IV Всероссийской) научно-технической конференции / ред. кол.: В.А. Шабанов и др. - Уфа: "Нефтегазовое дело", 2013 г. С. 8-12.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20 Тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ No 262. Подписано в печать 02.09.2021 г.