

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики и транспортных систем

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой

_____ Н.В. Коровкин

« ___ » _____ 2019 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**Создание параметрической модели для расчета электрических машин, с
использованием объектов программного обеспечения Elcut
по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
по образовательной программе**

13.04.02_09 Технология проектирования и производства электромеханических
преобразователей энергии

Выполнил

студент гр. 23241/41

Д.Ю. Бондарь

Руководитель

доцент, к.н.т.

Е.Ф. Кади-Оглы

Санкт-Петербург

2019

РЕФЕРАТ

На 53 с., 18 рисунков, 10 таблиц, 2 приложения

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ELCUT, VISUAL BASIC FOR APPLICATION, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА, ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ, ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

В данной работе представлена параметрическая модель асинхронного двигателя. Разработано программное обеспечение для расчета зависимостей параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Рассчитаны рабочие характеристики и номинальные значения величин, соответствующих номинальной мощности.

THE ABSTRACT

53 pages, 18 pictures, 10 tables, 2 applications

PARAMETRIC MODEL, ELCUT, VISUAL BASIC FOR APPLICATION, ASYNCHRONOUS MOTOR, IDLE EXPERIENCE, SHORT CIRCUIT EXPERIENCE, PARAMETERS OF SUBSTITUTION DIAGRAM

This paper presents a parametric model of an asynchronous motor. A software has been developed for calculating the dependencies of the parameters of an asynchronous motor equivalent circuit. Calculated performance and nominal values corresponding to the rated power.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	6
1.1. Цель работы.....	9
2. Постановка задачи.....	10
2.1 Применяемый язык программирования и его особенности	10
2.2 Применяемый пакет.....	11
2.3 Задача магнитостатики.....	13
2.3.1 Основные уравнения.....	14
2.4 Задача магнитного поля переменных токов.....	15
2.4.1 Основные уравнения.....	15
2.5 Источники поля.....	16
2.6 Граничные условия.....	17
2.7 Задание свойств материалов.....	18
2.7.1 Для задачи магнитостатики.....	18
2.7.2 Для задачи магнитного поля переменных токов.....	19
2.8 Конечно – элементная дискретизация.....	20
3. Моделирование и расчет.....	21
3.1 Параметрическая модель.....	21
3.2 Моделирование.....	23
3.3 Опыт холостого хода.....	25
3.4 Опыт короткого замыкания.....	34

3.5 Расчет режимов асинхронного двигателя.....	41
4.Заключение.....	49
Список использованных источников.....	51
Приложение 1. Код программного модуля VBA.....	53
Приложение 2. Расчет режимов асинхронного двигателя.....	79

1. Введение

В настоящее время тенденцией в исследовании проблем современной электротехники является максимально полная замена натурального эксперимента численным моделированием, особенно это проявляется на стадии разработки нового оборудования и поискового конструирования. Эта тенденция диктует необходимость создания численных моделей физических процессов, которые бы воспроизводили законы природы с должной достоверностью. Частные численные модели, охватывающие одну группу физических уравнений, например, подмножество системы уравнений Максвелла, или уравнение теплопроводности, широко используются инженерами. Однако, специфика электротехнических изделий в широком спектре, от кабелей до электрических машин, трансформаторов и др. состоит в том, что адекватность численной модели значительно возрастает при включении в нее уравнений из разных областей физики – например, уравнений электромагнитного поля, теплопередачи. В инженерной практике это позволяет сократить размерность задачи и ускорить получение значимых результатов.

Одним из инструментов численного моделирования является программное обеспечение Elcut. Elcut - это мощный современный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов [2]. При постановке задач используются модели, позволяющие описывать различные физические процессы, а широкие возможности анализа решений поставленных задач и высокая степень автоматизации операций позволяют пользователю реализовать поставленные задачи и найти для них решение. Одним из преимуществ Elcut является наличие русскоязычной версии, документации на русском языке, а также развитые возможности по постпроцессорной обработке результатов расчета (расчет индуктивностей, емкостей, усилий и т.п.). Однако, для работы с таким программным обеспечением, от инженера требуются определенные навыки

работы с объектно-ориентированными программами и знания теории необходимой для постановки задач численного моделирования.

Главным достоинством аналитических методов расчета является то, что они позволяют анализировать и сопоставлять различные варианты конструкции магнитной системы электрических машин, а также исследовать влияние источников магнитного поля на основные характеристики и индуктивные параметры машин. Применение параметрического моделирования существенно сокращает срок проектирования оборудования, так как параметрическое моделирование позволяет автоматически обновлять модели и результаты расчетов при внесении изменений в конструкцию, позволяет просто определять и автоматически создавать семейство изделий, а также параметрическое моделирование хорошо сочетается с процессами производства. Однако, следует отметить, что аналитические решения получаются при существенных допущениях. Более строгая постановка электромагнитных задач возможна лишь при численных расчетах. В частности, такая возможность имеется при использовании конечно-элементного программного комплекса «ELCUT», как и возможность создания параметрической модели.

Электромагнитные процессы в электрических машинах можно рассматривать посредством анализа магнитного поля. Результаты полученные при использовании методики конечно-элементного анализа позволяют рассчитать характеристики электрической машины.

Благодаря развитию вычислительной техники сеточные методы стали одними из наиболее эффективных методов решения сложных краевых задач для дифференциальных уравнений с частными производными. Различают два больших класса, отличающихся по способу построения приложенного решения:

- сеточные методы, основанные на непосредственной аппроксимации либо самого дифференциального уравнения, либо соответствующих этому дифференциальному уравнению интегробалансных соотношений – это

метод конечных разностей (МКР), метод конечных (контрольных) объемов (МКО).

- сеточные методы, основанные на использовании вариационных формулировок, эквивалентных исходной дифференциальной краевой задаче – это метод конечных элементов (МКЭ), в различных вариантах.

В настоящее время МКЭ получил глубокие теоретические обоснования и применяется для решения весьма широкого круга задач, например:

- стационарные задачи распространения тепла, диффузии, распределения электрического поля, другие задачи теории поля.
- задачи гидромеханики, в частности, течение жидкости в пористой среде.
- задачи механики и прочности, в т.ч. проектирование самолётов, ракет и различных пространственных оболочек.

Существуют различные формулировки метода конечных элементов, однако, основная идея метода может быть охарактеризована следующими свойствами:

- 1) Физическая область задачи дробится на подобласти, или конечные элементы
- 2) Зависимую переменную (одну или несколько) можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенном на конечном числе подобластей (элементов)
- 3) Подстановка аппроксимаций в определяющие уравнения (или эквивалентные им) дает систему множества уравнений с неизвестными параметрами. Решая эти уравнения, можно определить значения этих параметров и, следовательно, получить приближенное решение задачи.

Вместо определяющих уравнений часто используют вариационный подход (минимизация специально построенного функционала). Иногда ставиться условие обеспечения малости (в некотором смысле) разницы между истинным и

приближенным решениями, т.е. невязки метода конечных элементов. Так как число неизвестных в окончательной системе уравнений часто весьма велико, то общепринято использовать матричные обозначения, как для сокращения записи, так и для облегчения программирования.

1.1 Цель работы

Целью работы является создание программного обеспечения для расчета параметрической модели электрических машин на базе объектов Elcut. Актуальность данной работы обусловлена тенденцией на замену натурального эксперимента численным моделированием. Так как численное моделирование позволяет создавать параметрические модели для конкретного типа задач, поставленных перед инженером, результат данной работы имеет возможность практического применения разработанного приложения при проектировании электрических машин.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Создание программного модуля приложения
2. Отработка интерфейса программы
3. Постановка задачи в программном модуле Elcut
4. Построение геометрии электрической машины в программном обеспечении Elcut при помощи разработанной программы
5. Задание источников поля, граничных условий и свойств материалов
6. Расчет характеристик холостого хода и короткого замыкания
7. Определение параметров электрической машины
8. Расчет рабочих характеристик

2. Постановка задачи

При постановке задачи используются двумерные краевые задачи математической физики, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или однокомпонентной векторной функции (потенциала). Рассматривается плоско-параллельный класс двумерных задач.

Плоскопараллельные постановки используют декартову систему координат x y z , причем предполагается, что геометрия расчетных областей, свойств сред и параметры, характеризующие источники поля неизменны в направлении оси z . Вследствие этого описание геометрии, задание свойств, граничных условий и источников, а также обработка результатов проводится в плоскости x y [3].

2.1 Применяемый язык программирования и его особенности

Для создания программного модуля использовался язык программирования Visual Basic for Applications в приложении Microsoft Excel. Данное приложение имеет встроенный редактор VBA, который является элементом интегрированной среды разработки, позволяющей осуществлять создание, отладку и выполнение программ на VBA.

VBA (Visual Basic for Applications) — это диалект языка Visual Basic, расширяющий возможности Visual Basic и предназначенный для работы с приложениями Microsoft Office. Данный язык программирования имеет относительно простую структуру, что значительно упрощает взаимодействие неопытного пользователя и созданной программы. Visual Basic сочетает в себе процедуры и элементы объектно-ориентированных и компонентно-ориентированных языков программирования. Интегрированная среда разработки VB включает инструменты для визуального проектирования пользовательского интерфейса, редактор кода с возможностью IntelliSense и

подсветкой синтаксиса, а также инструменты для отладки приложений. Использование данного языка позволяет упростить доступ к программе, созданной на его основе, так как у большинства пользователей имеется установленный пакет Microsoft Office. Все работы, связанные с программированием и созданием интерфейса программы, ведутся в программе Microsoft Excel. Данное приложение имеет широкое распространение среди пользователей, что положительно влияет на практическое применение созданного приложения.

Основные операторы, используемые для написания программного кода приложения:

Option Explicit – оператор, запрещающий использование переменных без их предварительного явного объявления.

Public – оператор, объявляющий переменную доступной для всех процедур в проекте.

Dim – оператор, объявляющий переменную.

For...Next – оператор, задающий типовой цикл со счетчиком, выполняющий заданное число итераций.

If...Then – оператор, задающий условие выполнения операции.

На Рис. 1. приведен алгоритм созданной программы.

2.2 Применяемый пакет

Elcut – программное обеспечение для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов, используемое для разработки и анализа трехмерных и двумерных механизмов, таких как электродвигатели, привод и трансформаторы [4].

Пакет Elcut содержит различные модули, которые позволяют решать следующие типы задач:

- Модуль *магнитостатика* предназначен для расчета магнитного поля постоянных токов и/или постоянных магнитов с учетом насыщения ферромагнитных материалов.
- Модуль *магнитное поле переменных токов* предназначен для расчёта магнитного поля, возбуждаемого синусоидальным током заданной частоты с учётом вихревых токов (вытеснения тока и эффекта близости). Для этого модуля обеспечено также совместное решение полевой задачи с присоединённой электрической цепью.
- Модуль *нестационарное магнитное поле* предназначен для расчёта переходных процессов в электромагнитных устройствах. Этот вид анализа может включать учёт совместного действия переменных (в т.ч. импульсных) нагрузок и постоянных магнитов, а также совместное решение полевой задачи с присоединенной электрической цепью.
- Модуль *электростатика* предназначен для расчёта электростатического поля, вызванного приложенным потенциалом, объёмными, поверхностными и точечными зарядами.
- Модуль *электрическое поле постоянных токов* предназначен для расчета растекания постоянных токов в проводящих массивах.
- Модуль *электрическое поле переменных токов* предназначен для расчёта электрических полей, вызванных переменными напряжениями, с учётом токов утечки.
- Модуль *нестационарное электрическое поле* предназначен для расчёта электрических полей, вызванных импульсными напряжениями. Учитывает нелинейные физические свойства диэлектриков.
- Модуль *теплопередача* предназначен для расчёта переходного и установившегося температурного поля с учётом конвективного и радиационного теплообмена.

- Модуль *упругие деформации* может быть использован для расчёта механических напряжений в различных устройствах.

В комплексе использован принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователю не требуется записывать системы уравнений и программировать методы их решения, а достаточно лишь создать в графическом редакторе геометрическую модель рассчитываемого устройства, а также задать свойства и параметры решаемой задачи. В результате в десятки раз сокращаются временные затраты на решение полевых задач, а получаемые результаты являются достаточно точными и весьма наглядными.

2.3 Задача магнитостатики

Модуль магнитостатика применяется для расчета и анализа широкого списка электрических устройств, таких как соленоиды, электрические машины, магнитные экраны, постоянные магниты, реакторы, и т.п. Расчет магнитного поля позволяет исследовать и анализировать такие величины как индукция, напряженность поля, потенциал, магнитостатические силы и моменты, собственная и взаимная индуктивность, потокосцепление.

Пакет Elcut позволяет решать линейные и нелинейные задачи магнитостатики в плоской и осесимметричной постановке. Специальный редактор кривой намагничивания применяется для определения свойств изотропных материалов. Источниками поля служат сосредоточенные и распределенные токи и токовые слои, постоянные магниты, а также внешние магнитные поля. При постановке задачи применяются граничные условия Неймана и Дирихле, а специальные аппроксимирующие функции обеспечивают высокую точность расчета. Задача сформулирована относительно векторного магнитного потенциала.

2.3.1 Основные уравнения

Для формулирования задачи магнитостатики используются уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

$$\operatorname{rot} H = j, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (2)$$

$$B = \mu H, \quad (3)$$

где H – вектор напряженности магнитного поля, j – вектор плотности тока, B – вектор магнитной индукции, μ – магнитная проницаемость материала.

Уравнение векторного магнитного потенциала:

$$B = \operatorname{rot} A, \quad (4)$$

где A – векторный магнитный потенциал.

Для решения задачи применяется уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала A . В исследуемых задачах вектор индукции B всегда лежит в плоскости модели $x y$, а вектор стороннего тока j и векторный потенциал перпендикулярны к ней. Из чего следует, что электрический ток, создающий магнитное поле, направлен перпендикулярно плоскости чертежа. Отличными от нуля являются только компоненты j_z и A_z в плоско-параллельной постановке. В дальнейшем они обозначаются как j и A . Для плоско-параллельной задачи уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (5)$$

где μ_y и μ_x – компоненты магнитной проницаемости, H_{cy} и H_{cx} – составляющие коэрцитивной силы, j – плотность тока.

В нелинейной постановке свойства материалов считаются изотропными и задаются зависимостью $B = f(H)$, представленной кубическим сплайном.

2.4 Задача магнитного поля переменных токов

Модуль магнитные поля переменного тока применяется для исследования магнитных полей, созданными синусоидально изменяющимися во времени токами и, проводить расчет токов, индуцированных переменным магнитным полем в проводящей среде (вихревых токов). Данный модуль используется при проектировании установок индукционного нагрева, трансформаторов, катушек, электрических машин, и различных типов индукторов [2].

При анализе расчета магнитного поля представляют интерес такие величины как магнитный потенциал, плотность тока, напряжение, индукция магнитного поля, моменты, распределение температуры, собственная и взаимная индуктивность, и другие интегральные величины. Большинство величин характеризуются амплитудой и фазой, но также возможен анализ действующих и мгновенных значений. В качестве источников поля выступают различные токовые источники с различными фазами, напряжения, плотности токов. При постановке задачи применяются граничные условия Неймана и Дирихле. Задача сформулирована относительно векторного магнитного потенциала.

2.4.1 Основные уравнения

Анализ магнитного поля переменных токов основан на предположении, что все электромагнитные поля пульсируют с одинаковой частотой, имеют амплитуду и начальную фазу. Изменение поля во времени предполагается синусоидальным. Все компоненты поля и электрические токи изменяются как:

$$Z(t) = Z_m \cdot \cos(\omega t + \theta), \quad (6)$$

где Z_m – амплитудное значение величины, ω – угловая частота, θ – фазный угол.

Комплексная запись уравнения (6):

$$\dot{Z} = Z_m \cdot e^{i(\omega t + \theta)}, \quad (7)$$

Для формулировки задачи используются уравнения Максвелла, представленные в параграфе 2.4.1. Задача сформулирована в качестве дифференциального уравнения в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала, представленного в уравнении (4). Для решения задачи применяется уравнение Гельмгольца:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - i\omega\gamma A = -j_{\text{стор}}, \quad (8)$$

где γ – электропроводность.

2.5 Источники поля

Источники поля задаются в блоках, на рёбрах или в отдельных вершинах геометрической модели. В магнитостатике источниками поля являются сосредоточенные и распределенные токи и токовые слои, постоянные магниты, намагничённость которых задаётся величиной коэрцитивной силы. Для задачи магнитного поля переменных токов источниками поля являются объёмная, поверхностная или линейная плотность тока, полный ток или напряжение приложенное к проводникам [3].

Источник, который задается в конкретной точке плоскости x y и проходящий через эту точку в положительном и отрицательном направлении относительно оси z , описывает ток. Для описания пространственно распределенного тока применяется описание посредством плотности электрического тока или же полным числом ампер-витков в блоке модели. В данном случае источник поля задается через плотность тока. Для нахождения плотности тока в катушке используется формула:

$$j = n \cdot Im/S, \quad (9)$$

$$Im = \sqrt{2} \cdot I, \quad (10)$$

где n – число витков катушки, I_m – амплитудное значение полного тока, I – полный ток, проходящий через исследуемую катушку, S – площадь поперечного значения катушки.

Блоки модели, в которых задано одно и то же значение плотности тока, рассматриваются как соединенные параллельно.

Для упрощения решения задачи используются допущения:

- Поле плоско-параллельное и не изменяется по глубине модели на заданной длине / машина бесконечно длинная.
- Рассматривается только одна составляющая векторного магнитного потенциала (тока) в направлении по глубине модели.
- Рассматривается состояние магнитного поля в определенный момент времени.
- Сердечники магнитопроводов моделируются с учетом задания основной кривой намагничивания материала стали магнитопровода. Сердечники магнитопроводов в направлении глубины модели считаются однородными. Неоднородность учитывается корректировкой магнитных свойств материала.
- Не учитывается электрическая изоляция элементарных проводников, межкатушечная изоляция в пазу машины. Катушки обмотки моделируются монолитными.
- Немагнитные клинья, изоляционные прокладки, корпусная изоляция, конструкционные детали из немагнитных металлов моделируются воздушными промежутками.
- Принимается, что поле за пределы машины не выходит.

2.6 Граничные условия

Перед началом решения задачи необходимо определить граничные условия, соответствующие реальному физическому процессу или явлению. Они

задаются на внутренних или внешних границах областей. Существует три типа граничных условий:

- 1) Условие Дирихле – определяется по нормальной составляющей поля либо по векторному магнитному потенциалу. Однородное условие Дирихле обозначает, что линии нормальной составляющей магнитного поля или линии векторного потенциала параллельны границе.
- 2) Условие Неймана – определяется по касательной составляющей магнитного поля либо индукции. Однородное условие Неймана обозначает, что линии магнитного поля направлены по касательной к границе и не пересекают ее (в данной работе не применяется).
- 3) Условие нулевого магнитного потока – определяется на границе сверхпроводников, обозначает постоянство потенциала (в данной работе не применяется).

Для решения поставленных задач применяется граничное условие Дирихле ($A = 0$). Оно позволяет задать значение векторного магнитного потенциала на ребре модели статора. Это обозначает, что все линии магнитного поля статора замыкаются по магнитопроводу.

2.7 Задание свойств материалов

2.7.1 Для задачи магнитостатики

В исследуемых задачах рассматриваются материалы с различными свойствами: воздух, статор, ротор, обмотка статора, пазы ротора.

Для объекта модели, имеющего метку “воздух”, “пазы статора” и обмотки статора, задается магнитная проницаемость равная единице:

$$\mu_x = 1$$

$$\mu_y = 1$$

Для объектов модели, имеющих метку “статор” и “ротор”, задаются свойства электротехнической стали, которая является изотропным материалом и имеет нелинейную магнитную проницаемость, задающуюся по формуле:

$$B = f(H), \quad (11)$$

Для объектов модели, определяющих обмотку статора, задается свойство источника поля. Источник поля описывается через плотность тока, рассчитанную по формуле 9.

2.7.2 Для задачи магнитного поля переменных токов

Для задачи магнитного поля переменных токов в объекте “воздух” задается магнитная проницаемость равная единице:

$$\mu_x = 1$$

$$\mu_y = 1$$

Для объектов модели, имеющих метку “статор” и “ротор”, задаются свойства электротехнической стали, которая является изотропным материалом и имеет нелинейную магнитную проницаемость, задающуюся по формуле (11). Эта кривая представляет основную кривую намагничивания материала на постоянном токе, а также используется как источник для вычисления эквивалентной кривой намагничивания при заданной частоте для задачи магнитного поля переменных токов.

Для объектов модели, определяющих обмотку статора, задается свойство источника поля. Источник поля описывается через плотность тока, рассчитанную по формуле 9. Для создания вращающегося магнитного поля фазы обмотки статора задаются с шагом $\varphi = 120^\circ$.

Для объектов модели, определяющих обмотку ротора, задается свойство электропроводность γ .

2.8 Конечно – элементная дискретизация

Построение сетки конечных элементов является важным этапом, так как сетка используется для непосредственного определения численного решения поля, а также используется для вычисления всех вторичных значений, таких как объем интеграции или других расчетов поля.

Параметры построенной сетки должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить наиболее точное приближение к истинному распределению зависимой переменной. Точность решения зависит от размера каждого из отдельных элементов. При построении сетки следует использовать большее количество элементов в областях, представляющих интерес для исследования, или в областях с сильной неоднородностью поля. Однако, при построении поля, решение предполагает инвертирование матрицы с таким же количеством элементов, как тетраэдров в узлах. Для сетки с большим количеством элементов требуется больше времени для расчета, а также для инверсии требуется значительный объем вычислительной мощности и памяти компьютера. Поэтому при построении сетки необходимо найти компромисс между точностью решения и временем, имеющимся для выполнения расчета.

Для исследуемых задач применяется минимальный шаг дискретизации равный одной четвертой расстояния воздушного зазора. Данная дискретизация выбрана из соображения, что густая сетка необходима в расчётной области, характеризующейся сильной неоднородностью поля. Для снижения расчетного времени применяется неоднородная структура сетки конечных элементов, полученная за счет увеличения шага дискретизации в магнитопроводе статора и ротора исследуемой модели.

3. Моделирование и расчет

3.1 Параметрическая модель

Параметрическое моделирование (параметризация) - моделирование (проектирование) с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами.

В данной работе параметрической моделью является математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая выполнять расчет его режимов и параметров на основе конечно-элементного пакета Elcut с внешним программным управлением построения модели, расчетом и постпроцессорной обработкой.

Преимуществом параметрических моделей является существенное снижение времени выполнения проекта за счет внедрения параметрического анализа и, как следствие, уменьшение этапов расчета проекта.

Существует несколько подходов к реализации параметрической модели на основе пакета Elcut :

- 1) Создание параметрической модели в «оболочке» пакета Elcut.

Данный способ позволяет использовать программное обеспечение с методом конечных элементов, встроенным языком программирования и создавать параметрические модели с дополнительным функционалом.

- 2) Создание «отдельной оболочки» для параметрической модели на базе доступных Windows объектов программного обеспечения с методом конечных элементов

Этот способ позволяет создавать стандартные параметрические модели, а также модели, учитывающие технические требования заказчика.

В настоящей работе для реализации параметрической модели, представленной в Приложении 1, используется второй подход. Был разработан интерфейс программы на базе приложения Microsoft Excel, представленный на Рис. 2.

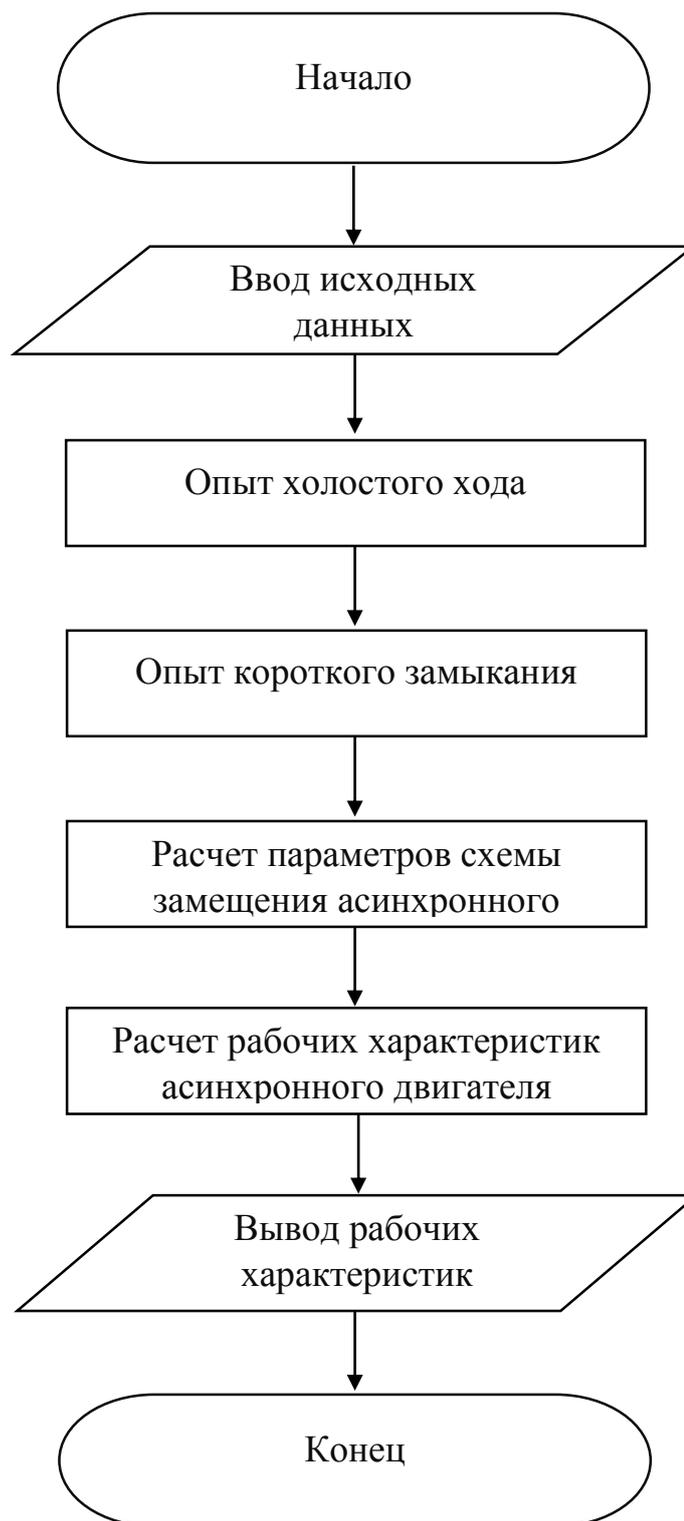


Рисунок 1. Алгоритм разработанной программы.

Таблица 1. Технические данные

Параметры	Обозначение	Величина	Размерность
Номинальная мощность	P_H	13	кВт
Номинальная частота вращения	n_H	1500	об/мин
Номинальное напряжение	U_H	220	В
Номинальная частота	f	50	Гц
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,885	-
К.П.Д	η	0,89	-
Число фаз	m	3	-
Число пар полюсов	p	2	-
Частота	f	100	-
Номинальный ток	I_H	25,3	А

При проведении исследования вызывает интерес определение индуктивностей рассеяния статора и ротора для последующего нахождения параметров схемы замещения асинхронного двигателя. При расчете учитывается влияние насыщения магнитопровода статора и ротора на индуктивности рассеяния.

Таблица 2. Данные статора.

Параметры	Обозначение	Величина	Размерность
Внешний диаметр статора	D_a	0,291	м
Диаметр статора	D	0,184	м
Длина статора	l_1	0,123	м
Число пазов статора	Z_1	36	-
Число эф. проводников на паз	$u_{п1}$	20	-
Высота паза	$h_{п1}$	25,5	мм
Ширина паза 1	b_1	9	мм
Ширина паза 2	b_2	13,15	мм
Высота клина	$h_{к1}$	1	мм

Параметры	Обозначение	Величина	Размерность
Высота шлица паза	$h_{ш1}$	0,6	мм
Ширина шлица паза	$b_{ш1}$	3,1	мм
Намагничивающий ток	I_{μ}	7,2	А
Число элементарных проводников в одном эффективном	$n_{эл}$	3	-
Число витков в фазе	w_1	120	-
Обмоточный коэффициент	$k_{об1}$	0,902	-
Коэффициент заполнения пакета сталью	k_c	0,95	-
Ток короткого замыкания с учетом насыщения	I_k	130	А

Таблица 3. Данные ротора

Параметры	Обозначение	Величина	Размерность
Внешний диаметр ротора	D'	0,1831	м
Диаметр вала	$D'_в$	0,06	м
Число пазов ротора	Z_2	46	-
Полная высота паза	$h_{п2}$	30,4	мм
Высота паза	$h_{п12}$	28	мм
Ширина паза	$b_{п2}$	3,5	мм
Высота шлица	$h_{ш2}$	0,4	мм
Ширина шлица	$b_{ш2}$	1,5	мм
Высота короткозамыкающего кольца	a_k	0,033	м
Ширина короткозамыкающего кольца	b_k	0,014	м

3.3 Опыт холостого хода

Разработанная программа позволяет провести расчет опыта холостого хода, по результатам которого определяются индуктивные параметры холостого хода машины. Первым этапом моделирования является заполнение таблиц 1 - 3 данными.

Для проведения опыта холостого хода необходимо нажать кнопку интерфейса программы «1. Вычислить Хар-ку ХХ». После этого произойдет выполнение программного кода, приведенного в Приложении 1 и соответствующего опыту холостого хода. Программа автоматически создает файл задачи пакета Elcut, в котором задаются следующие свойства задачи:

- 1) Тип задачи – магнитостатика
- 2) Класс задачи – плоско-параллельная
- 3) Система координат – Декартова
- 4) Единицы длины – метры
- 5) Длина модели по оси $z - L_z = l_1 = 0,123$ м

По геометрическим размерам магнитопроводов асинхронного двигателя, представленных в таблице 3 и таблице 4, создается модель магнитной системы, представленная на рис. 3., а также вычисляются площади пазов статора и ротора.

$$S_{\text{п статора}} = 264,692 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2 \quad (12)$$

$$S_{\text{п ротора}} = 101,062 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2 \quad (13)$$

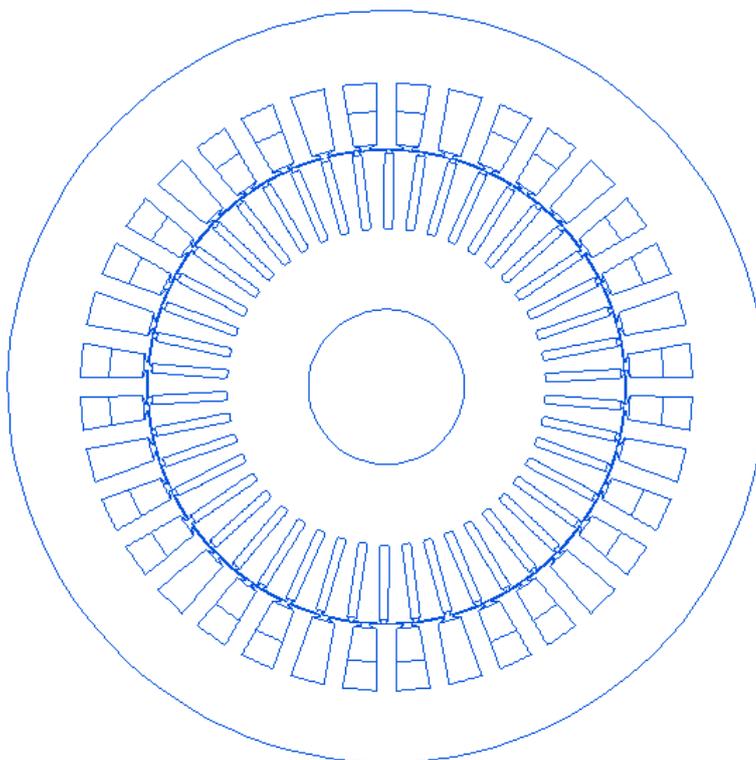


Рисунок 3. Магнитная система асинхронного двигателя.

В качестве источников поля выступают катушки обмотки статора. Принятое токораспределение обмотки статора максимально возможно учитывает реальные конструктивные особенности обмотки и рассчитано в соответствии с данной работой и [10]. Источником поля является плотность тока, вычисленная по формуле (9) и формуле (10):

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_H = \sqrt{2} \cdot 25,3 = 35,77 \text{ A} \quad (14)$$

$$j = u_{\pi} \cdot n_{\text{эл}} \cdot \frac{I_m}{(S_{p1}/2)} = 20 \cdot 3 \cdot 35,77 / 132,346 \cdot 10^{-6} = 16216583 \text{ A/мм}^2 \quad (15)$$

Материалом статора и ротора была выбрана электротехническая сталь Э12. В свойствах материалов блоков «статор» и «ротор» задается магнитная проницаемость $\mu = 1$ и кривая намагничивания стали с учетом коэффициента заполнения пакета сталью $k_c = 0.95$, представленная на рис. 4 и в Таблице 4.

Таблица 4. Кривая намагничивания стали Э12

B Тл	A, A/M	
	Без учета k_c	С учетом k_c
0,1	35	33,25
0,2	70	66,5
0,3	105	99,75
0,4	140	133
0,5	171	162,45
0,6	211	200,45
0,7	261	247,95
0,8	318	302,1
0,9	397	377,15
1	502	476,9
1,1	647	614,65
1,2	843	800,85
1,3	1140	1083
1,4	1580	1501
1,5	2500	2375
1,6	4370	4151,5
1,7	7780	7391
1,8	12800	12160
1,9	19700	18715
2	31000	29450

<i>B</i> Тл	<i>A</i>, А/М	
	Без учета k_c	С учетом k_c
2,1	65500	62225
2,2	144000	136800
2,3	224000	212800
2,4	304000	288800
2,5	384000	364800

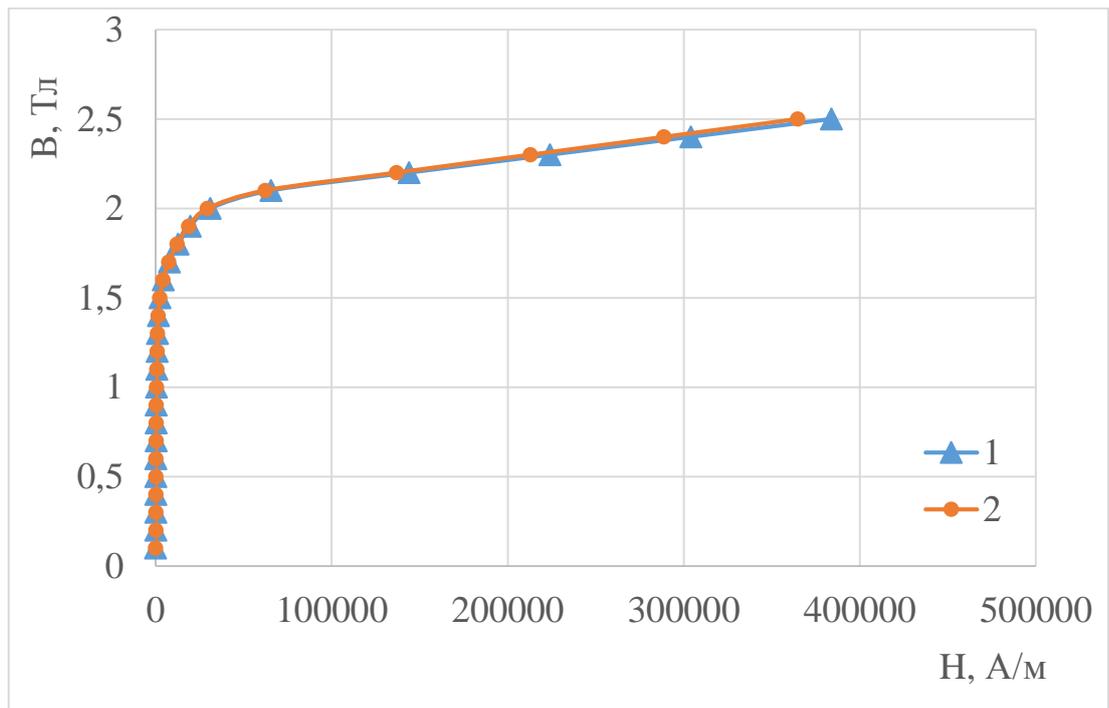


Рисунок 4. Кривые намагничивания стали Э12: 1 – Без учета коэффициента заполнения пакета сталью, 2 – С учетом заполнения пакета сталью.

После построения геометрической модели и задания всех свойств материалов программа задает шаг дискретизации сетки конечных элементов в исследуемых областях. Минимальный шаг дискретизации sp рассчитывается по формуле:

$$sp = \delta/4 , \quad (16)$$

где $\delta = 0,45$ мм – величина воздушного зазора.

В магнитопроводе статора и ротора задается больший шаг сетки. Это сделано для снижения плотности сетки и, следовательно, ускорения процесса расчета.

Для построения характеристики холостого хода проводится расчет 10 точек. В свойствах источников поля изменяется плотность тока относительно номинального тока $I_n = 25,3$ А. Ток изменяется от 0 до 0,36 о. е. с шагом 0,04 о. е. После проведения расчета одного значения поля, программа производит анализ влияния насыщения на гармоники магнитного поля. Для этого в полученном решении программа автоматически проводит построение контура интегрирования. Контур задается по середине воздушного зазора на половину окружности машины. На основании заданного контура создается таблица всех вычисленных вдоль контура величин, из которой вычленяется таблица координат x и y и соответствующие значениям координат значения векторного магнитного потенциала A . На рис. 5 приведен пример таблицы распределения векторного магнитного потенциала вдоль контура.

	x (м)	y (м)	A (Вб/м)
	0.091775	0	0.0273257
	0.0917715	8.0087...	0.0274791
	0.091761	0.0016...	0.0277631
	0.0917436	0.0024...	0.0282555
	0.0917191	0.0032029	0.0287532
	0.0916876	0.0040...	0.0292521
	0.0916492	0.0048...	0.0297525
	0.0916038	0.0056...	0.0302368
	0.0915514	0.0064019	0.0305178
	0.0914921	0.0072...	0.0308922
	0.0914258	0.0079...	0.0314346
	0.0913525	0.0087...	0.0319781
	0.0912722	0.0095931	0.0325214
	0.091185	0.0103892	0.0330636
	0.0910909	0.0111846	0.0336022

Рисунок 5. Таблица распределение векторного магнитного потенциала A вдоль контура.

Для исследования режима холостого хода машины применяется гармонический анализ кривых магнитного поля в зазоре. В дальнейшем распределение векторного магнитного потенциала представляется гармоническим рядом Фурье. При гармоническом анализе кривых распределения магнитного поля в зазоре машины, исходя из распределения $A(\varphi)$, где φ – фаза, стоит учитывать, что функция $A(\varphi)$ не является четной или не

четной, хотя она симметрична относительно оси абсцисс. Следовательно, разложение такой функции будет содержать как косинусные, так и синусные n -е гармоники нечетного порядка с нулевыми начальными фазами. Фаза рассчитывается как:

$$\varphi = \operatorname{arctg}(x_i/y_i) , \quad (17)$$

$$A(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_{nc} \cos \frac{n\pi\varphi}{\tau} + A_{ns} \sin \frac{n\pi\varphi}{\tau} \right) , \quad (18)$$

где амплитуды косинусных и синусных гармоник A_{nc} и A_{ns} определяются, как:

$$A_{nc} = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} A(\varphi) \cos \frac{n\pi\varphi}{\tau} d\varphi = A_c(n) , \quad (19)$$

$$A_{ns} = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} A(\varphi) \sin \frac{n\pi\varphi}{\tau} d\varphi = A_s(n) , \quad (19)$$

Для практического расчета ряд Фурье в виде (18) неудобен, так как требуется дважды вычислять тригонометрические функции. Поэтому выражение (18) следует преобразовать в вид, когда запись ряда Фурье имеет только косинусные или синусные гармоники с начальными фазами отличными от нуля. Данное преобразование имеет вид:

$$A(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\frac{n\pi\varphi}{\tau} + d\varphi\right) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\pi\varphi}{\tau} - d\varphi\right) , \quad (20)$$

Из формулы (20) следует, что амплитуда n -ой гармоники векторного потенциала равна:

$$A_n = \sqrt{A_c^2(n) + A_s^2(n)} , \quad (21)$$

где $A_c(n)$ и $A_s(n)$ – косинусные и синусные амплитуды n -ой гармоники.

На основании описанной выше методики был написан программный код для нахождения амплитуд гармоник поля, при написании кода использовались следующие формулы:

$$A_c(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^n A_j \cos(k\varphi_j d\varphi_j)$$

$$A_s(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^n A_j \sin(k\varphi_j d\varphi_j)$$

$$d\varphi_j = (\varphi_j - \varphi_{j-1})$$

$$A_k = \sqrt{A_c^2(k) + A_s^2(k)}$$

где k – номер гармоники, j – элементы массива данных, полученных на основании построенного контура.

Вычисление амплитуды гармоники происходит по представленным выше формулам при помощи гармонического анализатора, написанного отдельно для разработанной программы. Код гармонического анализатора представлен в Приложении 1. Рассчитанные значения амплитуды первой гармоники векторного магнитного потенциала A заносятся в таблицу в окне «XXX» программы. На основании полученных данных вычисляется магнитный поток Φ , напряжение U в о. е., значение индуктивного сопротивления взаимной индукции $X\sigma_1 + X_m$ в о. е. Результаты расчета занесены в Таблицу 6. При расчете применяются следующие формулы:

$$\Phi = \frac{2 \cdot l \cdot A}{\sqrt{2}}, \quad (22)$$

$$U = \Phi / \Phi_0, \quad (23)$$

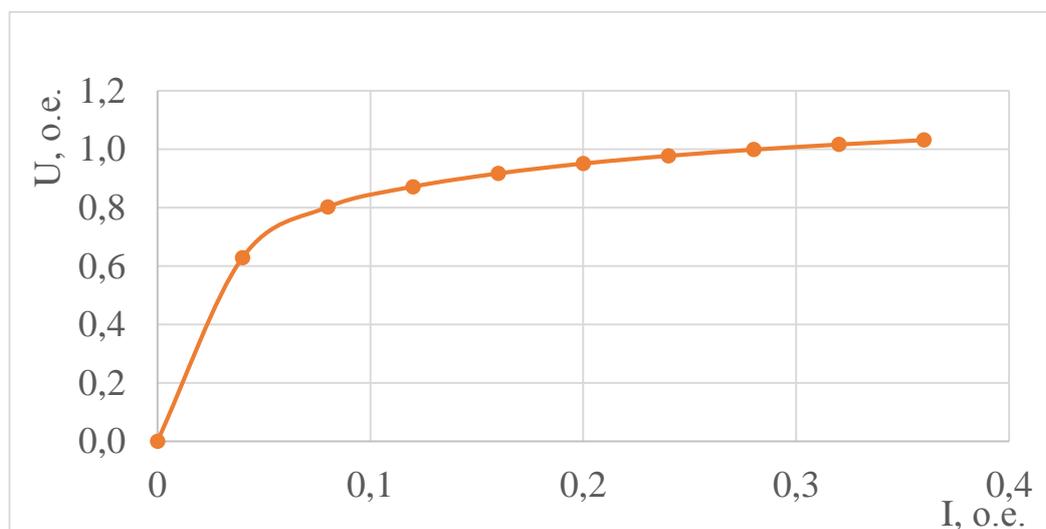
$$X\sigma_1 + X_m = \frac{U}{i}, \quad (24)$$

где l – длина статора, A – амплитуда первой гармоники векторного потенциала, $\Phi_0 = 0,00903$ Вб – номинальный магнитный поток, полученный из расчета [10], U_H – номинальное напряжение, f – частота тока, w_1 – число витков катушки обмотки статора, k_{o1} – обмоточный коэффициент статора, $i = (0 \div 0,36) \cdot I_H$ – ток в обмотке статора в о.е.

Таблица 6.

A , Вб/м	Φ_0	U	I	$X\sigma + X_m$
С учетом k_c	Вб	о.е.	о.е.	о.е.
0,00000	0,000000	0,0000	0	15,71891
0,03264	0,005678	0,6288	0,04	15,71891
0,04163	0,007241	0,8019	0,08	10,02418
0,04525	0,007871	0,8717	0,12	7,263897
0,04760	0,008280	0,9169	0,16	5,730854
0,04937	0,008588	0,9510	0,2	4,755164
0,05074	0,008826	0,9774	0,24	4,072598
0,05184	0,009017	0,9986	0,28	3,566476
0,05275	0,009176	1,0161	0,32	3,175447
0,05354	0,009313	1,0314	0,36	2,864892

По данным таблицы 6 были построены характеристика холостого хода исследуемой машины, а также характеристика распределения индуктивного сопротивления взаимной индукции в зависимости от напряжения холостого хода $X\sigma_1 + X_m(U)$, представленные на рис. 6 и рис. 7.

Рисунок 6. Характеристика холостого хода с учетом k_c .

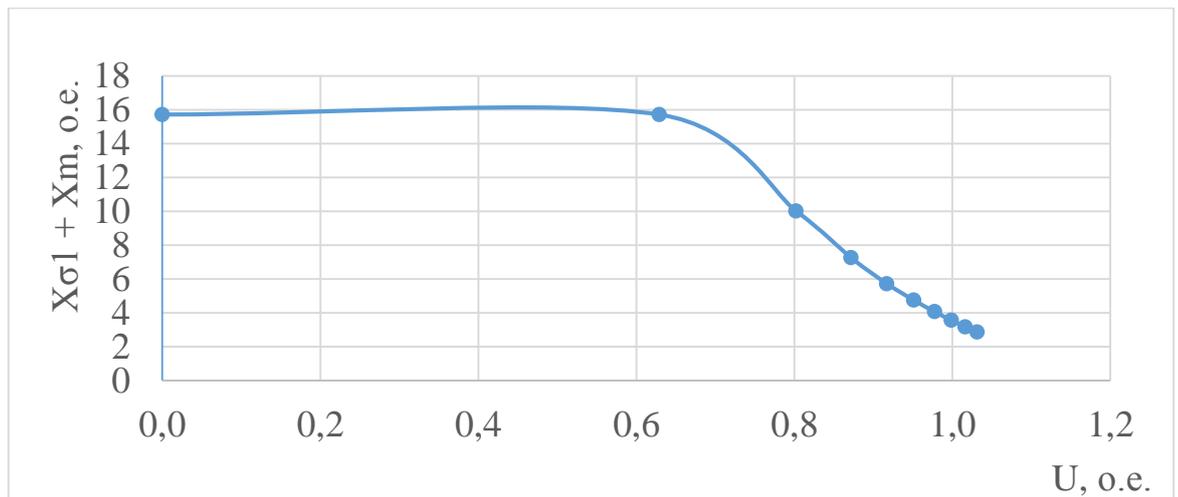


Рисунок 7. Характеристика изменения индуктивного сопротивления взаимной индукции с учетом k_c .

В результате опыта холостого хода была получена характеристика холостого хода асинхронного двигателя, найден ток холостого ход, а также рассчитаны индуктивные сопротивления рассеяния необходимые для вычисления параметров схемы замещения электрической машины. На основании полученных данных можно сделать вывод, что индуктивные сопротивления рассеяния асинхронной машины не остаются постоянными. Данный процесс происходит по причине насыщения магнитопровода машины по пути основного потока.

Таким образом, разработанная модель на базе пакета Elcut позволяет решать нелинейные задачи расчета магнитного поля при помощи численных методов с учетом насыщения. Это позволяет найти точное влияние насыщения на индуктивные сопротивления рассеяния исходя из анализа распределения общего поля в машине. На основании анализа результатов численного моделирования и аналитического расчета, приведенный в таблице 6, можно сказать, что разработанная модель является корректной и воспроизводит электромагнитные процессы в асинхронном двигателе с инженерной точностью.

Таблица 6.

Сравнение результатов

Исследуемые величины	Аналитический метод	Численное моделирование	Отклонение %
I_0	7,2 А	7,16 А	0,5
$X\sigma1 + Xm$	3,452	3,534 о.е.	2,375

При моделировании опыта холостого хода исследуется поток машины и потоки рассеяния, обусловленные влиянием насыщения магнитопроводов ротора и статора, аналитический метод расчета индуктивных сопротивлений учитывает приближенное влияние насыщения, чем и объясняется различие полученных данных и рассчитанных аналитически.

Созданная программа позволяет существенно сократить время, необходимое для проведения опыта холостого хода, а также позволяет исследовать различные варианты исполнения машины путем варьирования геометрии пазов и анализа влияния геометрии на индуктивные сопротивления рассеяния.

3.4 Опыт короткого замыкания

Исследование режима короткого замыкания позволяет провести анализ индуктивных сопротивлений рассеяния статора и ротора, так как наведенные вихревые токи в пазах ротора создают магнитное поле противоположенное магнитному полю статора, вследствие этого основной магнитный поток статора и ротора замыкается через магнитопровод.

Перед началом проведения опыта короткого замыкания необходимо рассчитать параметры цепной модели торцевой зоны ротора. При расчете определяются активное и индуктивное сопротивления части короткозамыкающего кольца между стержнями ротора (на 1 сторону). Для расчета применялись следующие формулы:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi p}{Z_2}, \quad (25)$$

$$\lambda_{end} = \frac{2,3 \cdot D_K}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \left(\frac{4,7 \cdot D_K}{a_K + b_K} \right), \quad (26)$$

$$x_{end} = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot \lambda_{end} \cdot 10^{-6}, \quad (27)$$

$$l_K = \frac{x_{end}}{2 \cdot f_1 \cdot Z_2}, \quad (28)$$

$$r_K = \frac{\pi \cdot D_K}{\sigma_2 \cdot Z_2 \cdot a_K \cdot b_K}, \quad (29)$$

где λ_{end} – коэффициент магнитной проводимости короткозамыкающего кольца, $D_K = D' - a_K$ – диаметр короткозамыкающего кольца, a_K – высота кольца, b_K – ширина кольца, x_{end} – индуктивное сопротивление ротора, соответствующее лобовой части, l_K – индуктивное сопротивление части кольца между стержнями ротора, r_K – активное сопротивление части кольца между стержнями ротора, σ_2 – электропроводность алюминия.

По формулам (25) – (29) были вычислены параметры торцевой зоны ротора, которые приведены ниже.

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{46} = 0,272, \quad (30)$$

$$\lambda_{end} = \frac{2,3 \cdot 0,1501}{46 \cdot 0,123 \cdot 0,272^2} \cdot \lg \left(\frac{4,7 \cdot 0,1501}{0,033 + 0,014} \right) = 0,8746, \quad (31)$$

$$x_{end} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,123 \cdot 0,8746 \cdot 10^{-6} = 4,249 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}, \quad (32)$$

$$l_K = \frac{4,249 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 50 \cdot 46} = 9,238 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}, \quad (33)$$

$$r_K = \frac{\pi \cdot 0,1501}{23000000 \cdot 46 \cdot 0,033 \cdot 0,014} = 965 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}, \quad (34)$$

На основании полученных данных была построена цепная модель торцевой зоны ротора в Elcut, которая приведена на рис. 8.

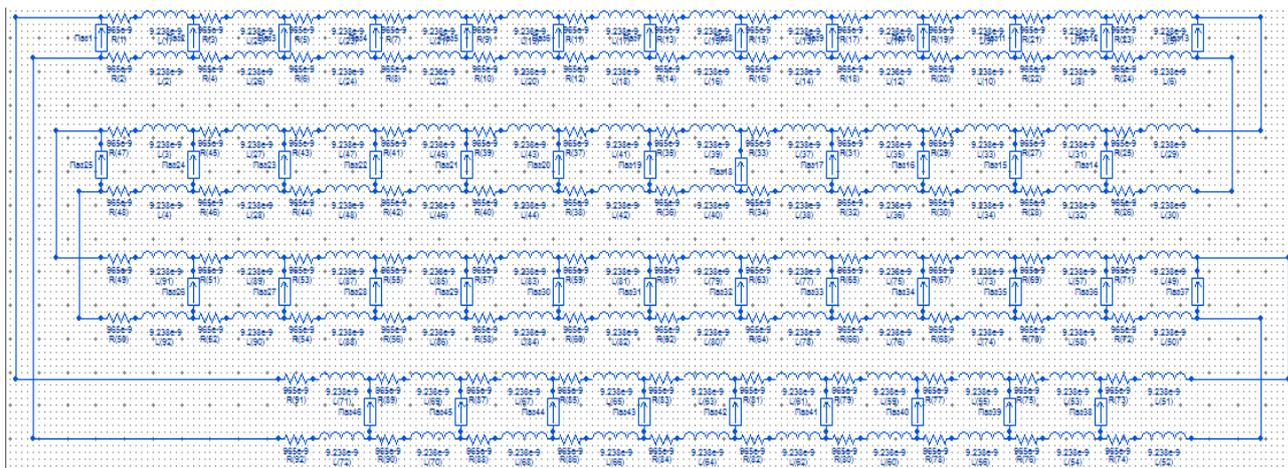


Рисунок 8. Цепная модель торцевой зоны ротора.

Для проведения опыта короткого замыкания необходимо нажать кнопку «2. Вычислить Хар-ку КЗ». После этого произойдет выполнение программного кода, приведенного в Приложении 1 и соответствующего опыту короткого замыкания. Программа автоматически создает файл задачи пакета Elcut, в котором задаются следующие свойства задачи:

- 1) Тип задачи – магнитное поле переменных токов
- 2) Класс задачи – плоско-параллельная
- 3) Система координат – Декартова
- 4) Единицы длины – метры
- 5) Длина модели по оси z – $L_z = l_1 = 0,123$ м
- 6) Частота f – $f = f_1 = 50$ Гц

После создания файла задачи, программа создает файл геометрии магнитной системы электрической машины аналогичный файлу геометрии для задачи магнитостатики, приведенному на рис. 3.

В качестве источников поля выступают катушки обмотки статора при протекающем токе короткого замыкания с учетом насыщения $I_k = 130$ А, аналитически рассчитанный по методике, приведенной в [10]. Для создания вращающегося магнитного поля фазы обмоток статора задаются со сдвигом фаз $\varphi = 120^\circ$. Принятое токораспределение обмотки статора максимально возможно учитывает реальные конструктивные особенности обмотки и рассчитано в

соответствии с данной работой и [10]. Источником поля является плотность тока, вычисленная по формуле (9) и формуле (10):

$$I_k = \sqrt{2} \cdot 130 = 183,84 \text{ А} \quad (35)$$

$$j = 20 \cdot 3 \cdot 183,84 / 264,692 \cdot 10^{-6} = 41674000 \text{ А/мм}^2 \quad (36)$$

В свойствах материалов статора и ротора была задана кривая намагничивания с учетом коэффициента заполнения пакета сталью k_c , приведенная в Таблице 5. Для пазов ротора в свойствах материалов была задана электропроводность для алюминия $\sigma_2 = 23000000 \text{ См/м}$.

Для построения характеристики распределения индуктивных сопротивлений рассеяния проводится расчет 6 точек. В свойствах источников поля изменяется плотность тока относительно тока короткого замыкания I_k . Ток изменяется от 0 до 5 о. е. с шагом 1 о. е. После проведения расчета одного значения поля, программа производит анализ распределения магнитных полей рассеяния. Для этого в полученном решении программа автоматически проводит построение контуров интегрирования для нахождения потоков пазового рассеяния и рассеяния по коронкам зубцов. Для нахождения потоков пазового рассеяния Φ_p контур задается по середине паза для статора и ротора. Для нахождения рассеяния по коронкам зубцов Φ_k контур задается от диаметра статора до середины воздушного зазора. На основании заданного контура, при помощи интегрального калькулятора пакета Elcut, вычисляется магнитный поток. потенциала вдоль контура. В Таблице 7. приведены результаты опыта короткого замыкания.

Таблица 7. Зависимость потоков рассеяния от тока короткого замыкания

I_k	I	Φ_p статора	Φ_k статора	Φ_p ротора	Φ_k ротора
А	о.е.	Вб	Вб	Вб	Вб
0	0	0	0	0	0
26	1	0,00058346	0,00002507	0,001132	0,00002996
52	2	0,00099406	0,00003803	0,0020045	0,00004374

I_k	I	$\Phi_{\text{п статора}}$	$\Phi_{\text{к статора}}$	$\Phi_{\text{п ротора}}$	$\Phi_{\text{к ротора}}$
78	3	0,0013405	0,00004628	0,0027023	0,00005232
104	4	0,0016091	0,00005137	0,0032153	0,00005757
130	5	0,0019041	0,000058792	0,0037968	0,00006346

Нахождения индуктивных сопротивления рассеяния происходило по следующим формулам:

$$x_{\text{п}} = \omega \frac{\Phi_{\text{п}} \cdot w}{i} \frac{I_{\text{н}}}{U_{\text{н}}}, \quad (37)$$

$$x_{\text{к}} = \omega \frac{\Phi_{\text{к}} \cdot w}{i} \frac{I_{\text{н}}}{U_{\text{н}}}, \quad (38)$$

$$X_{\sigma 1} = x_{\text{п1}} + x_{\text{к1}} + x_{\text{д1}} + x_{\text{л1}}, \quad (39)$$

$$X'_{\sigma 2} = x_{\text{п2}} + x_{\text{к2}} + x_{\text{д2}} + x_{\text{л2}}, \quad (40)$$

где i – амплитудное значение тока в обмотке статора/ротора, $x_{\text{д}}$ – индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния, $x_{\text{л}}$ – индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей.

Сумма индуктивных сопротивлений дифференциального рассеяния и рассеяния лобовых частей для статора и ротора была взята из расчета, приведенного в [10].

Для статора $\sum x_{1\text{дл}} = x_{\text{д1}} + x_{\text{л1}} = 0,0563$ о. е.

Для ротора $\sum x_{2\text{дл}} = v(x_{\text{д2}} + x_{\text{л2}}) = 0,0331$ о. е.

где v – коэффициент приведения параметров беличьей клетки к обмотке статора [10]:

$$v = \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{\text{об1}})^2}{Z_2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot (120 \cdot 0,902)^2}{46} = 3060, \quad (41)$$

На основании приведенных выше формул были рассчитаны характеристики изменения индуктивных сопротивлений статора и ротора, представленные в Таблице 8.

Таблица 8.

Характеристики изменения индуктивных сопротивлений рассеяния от тока короткого замыкания

I_k	I_c	I	$X_{\sigma 1}$	$X'_{\sigma 2}$
A	A	о.е.	о.е.	о.е.
0	0	0	0,128069848	0,081797778
26	1868	1	0,128069848	0,081797778
52	3415	2	0,117165193	0,080064199
78	4710	3	0,11082355	0,078901011
104	5756	4	0,105265106	0,077630439
130	7007	5	0,102607583	0,076251059

Пример расчета индуктивных сопротивлений рассеяния для $I_k = 26$ А:

$$x_{п1} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \frac{0,00058346 \cdot 120 \cdot 25,3}{\sqrt{2} \cdot 26} \frac{1}{220} = 0,06879 \text{ о. е.}$$

$$x_{к1} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \frac{0,00002507 \cdot 120 \cdot 25,3}{\sqrt{2} \cdot 26} \frac{1}{220} = 0,00295 \text{ о. е.}$$

$$x_{п2} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \frac{0,001132 \cdot 120 \cdot 25,3}{\sqrt{2} \cdot 1868} \frac{1}{220} \cdot 3060 = 0,04736 \text{ о. е.}$$

$$x_{к2} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \frac{0,00002996 \cdot w \cdot 25,3}{\sqrt{2} \cdot 1868} \frac{1}{220} \cdot 3060 = 0,00125 \text{ о. е.}$$

$$X_{\sigma 1} = 0,06879 + 0,00295 + 0,0563 = 0,128 \text{ о. е.}$$

$$X'_{\sigma 2} = 0,04736 + 0,00125 + 0,0331 = 0,0817 \text{ о. е.}$$

На рисунках 9 – 10 представлены характеристики $X_{\sigma 1}$ и $X'_{\sigma 2}$ – соответственно.

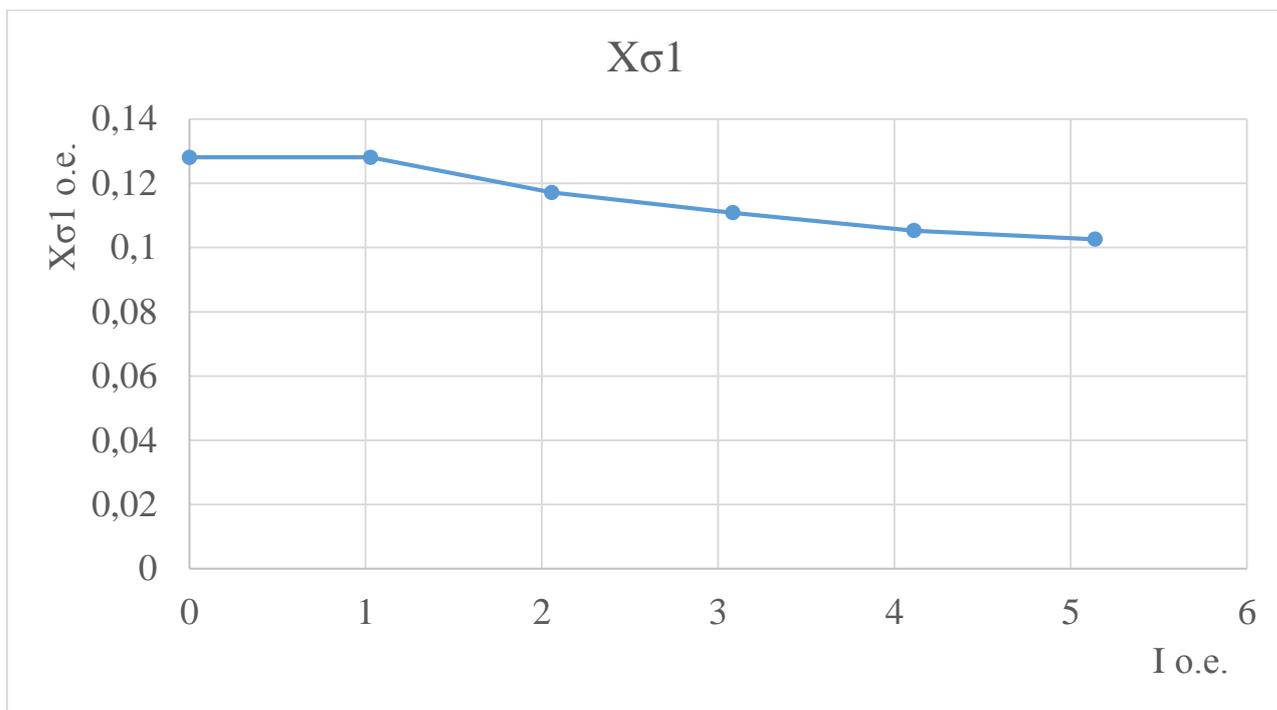


Рисунок 9. Характеристика изменения индуктивного сопротивления рассеяния статора $X_{\sigma 1}$.

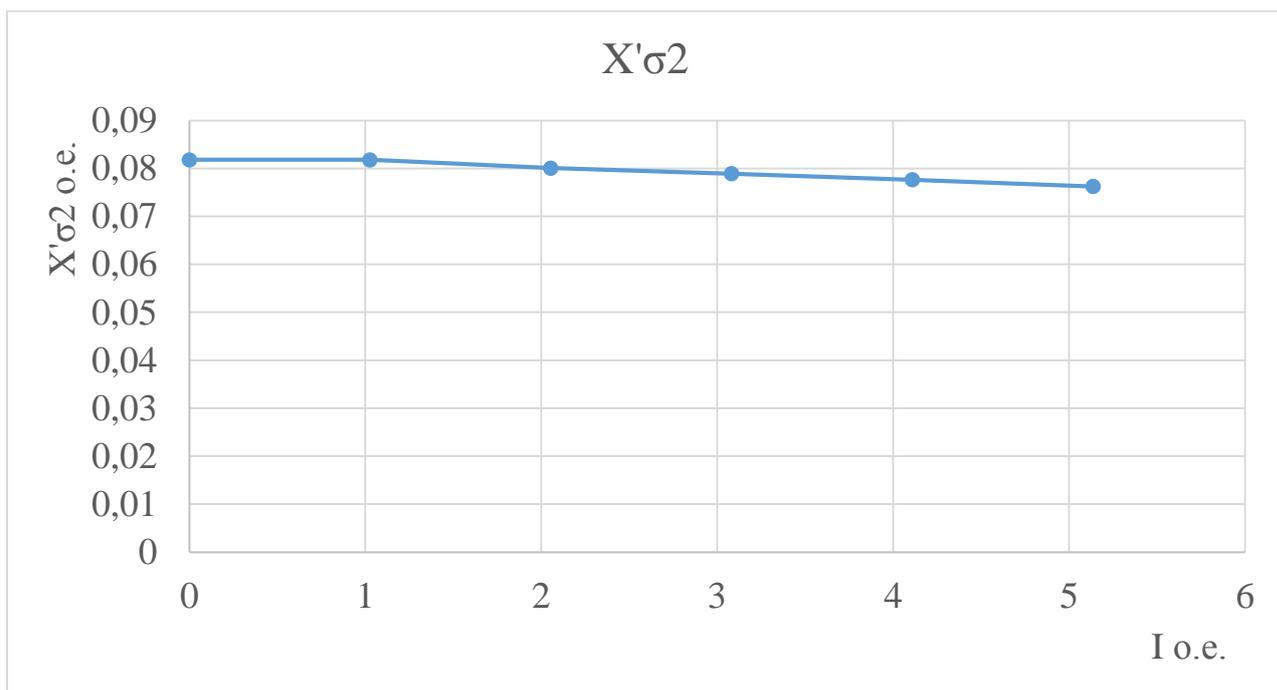


Рисунок 10. Характеристика изменения индуктивного сопротивления рассеяния ротора $X'_{\sigma 2}$.

Изменение характеристик происходит вследствие насыщения усиков пазов и коронок зубцов, вызванного пазовым и дифференциальным полями рассеяния. Вследствие насыщения верхних частей зубцов уменьшается коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния, что в свою очередь влияет на

эквивалентное изменение открытия паза. Так же уменьшается коэффициент проводимости пазового рассеяния вследствие насыщения коронок зубцов.

Таким образом, по результатам опыта короткого замыкания были вычислены индуктивное сопротивление рассеяния статора $X_{\sigma 1}$ и ротора $X'_{\sigma 2}$ асинхронного двигателя с учетом насыщения. В Таблице 9. приведено сравнение результатов, полученных аналитическим методом [10] и при помощи метода численного моделирования.

Таблица 9.

Сравнение результатов

Индуктивные сопротивления рассеяния	Аналитический метод	Численное моделирование	Отклонение %
$X_{\sigma 1}$	0,092	0,128	39,1
$X'_{\sigma 2}$	0,082	0,0818	2,4

Полученные параметры и параметры, взятые из расчета, приведенного в [10], позволяют описать схему замещения асинхронного двигателя. Схема замещения позволяет вычислить рабочие характеристики исследуемой машины, а созданная параметрическая модель ускоряет данный процесс.

3.5 Расчет режимов асинхронного двигателя

По результатам опыта холостого хода и опыта короткого замыкания были получены зависимости индуктивных сопротивлений, необходимых для представления машины в виде схемы замещения, представленной на рис. 11. Такая схема замещения позволяет более точно рассчитать ЭДС по сравнению с традиционной схемой замещения, и, как следствие, учесть влияние насыщения на магнитный поток, наводимый под действием этой ЭДС.

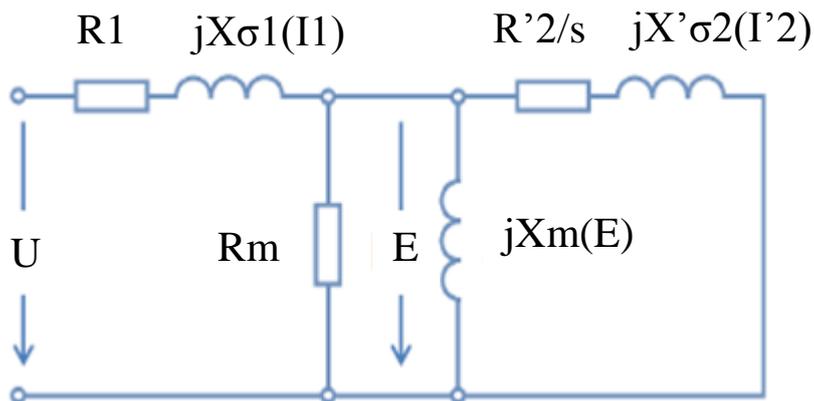


Рисунок 11. Схема замещения асинхронного двигателя для расчета рабочих характеристик

Зависимости индуктивных сопротивлений ротора и статора приведены в предыдущем параграфе. Для нахождения зависимости индуктивного сопротивления взаимной индукции $X_m(U)$ необходимо характеристику $X_\sigma + X_m(U)$ представить в виде зависимости от тока, после этого вычесть значения зависимости $X_{\sigma 1}(I)$, соответствующие значениям тока для характеристики $X_\sigma + X_m(I)$, далее зависимость $X_m(I)$ необходимо представить в зависимости от напряжения. В результате получается зависимость $X_m(U)$, представленная на рисунке 12.

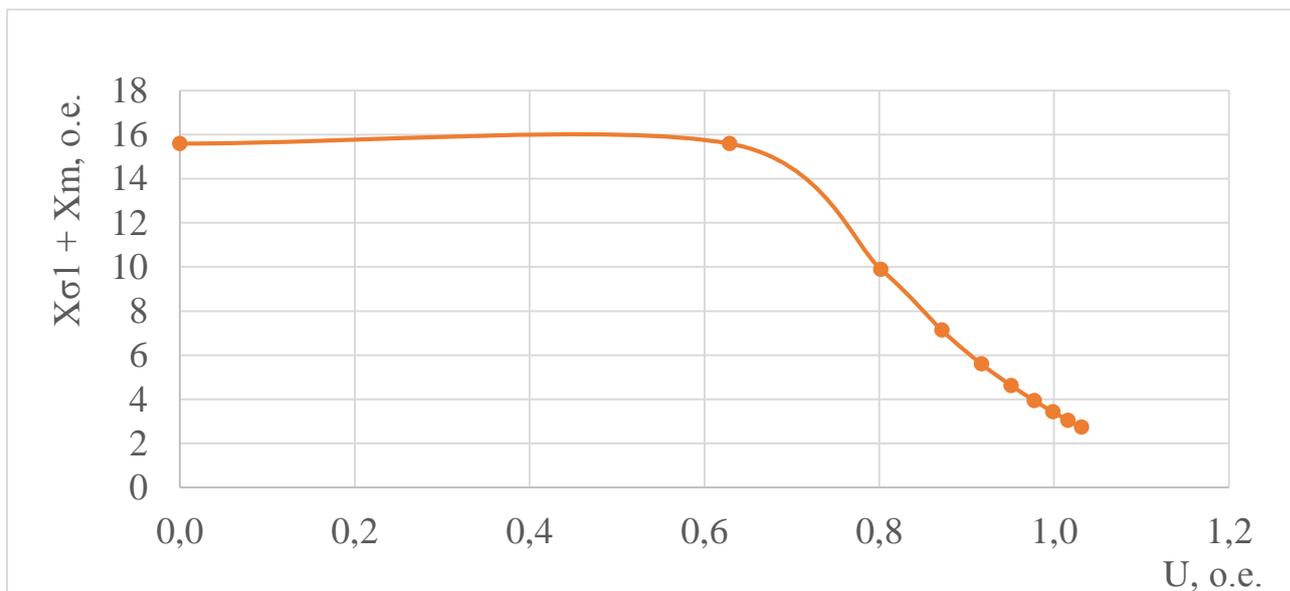


Рисунок 12. Характеристики индуктивного сопротивления взаимной индукции $X_m(U)$.

Активные сопротивления обмотки статора $R_1 = 0,0414$ о.е. и обмотки ротора $R'_2 = 0,0282$ о.е. были взяты из расчета, приведенного в [10]. Для схемы замещения, представленной на рис. 5, сопротивление R_m необходимо выразить из схемы последовательного соединения и привести к параллельному соединению. Схемы соединений приведены на рис. 13.

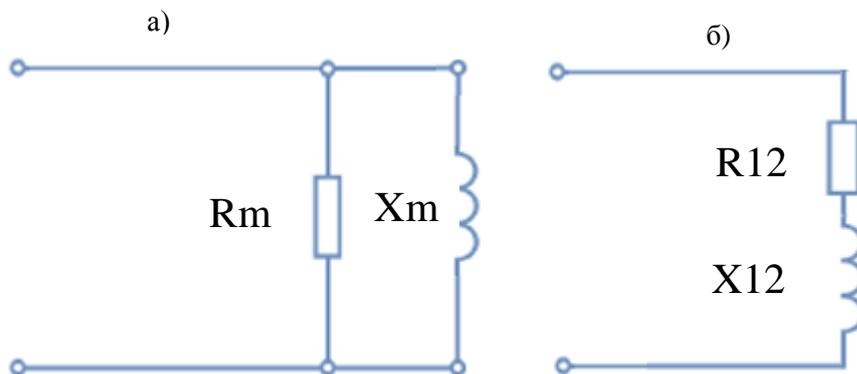


Рисунок 13. а) Параллельное соединение сопротивлений, б) Последовательное соединение сопротивлений.

Для расчета сопротивления R_m применялись следующие формулы:

$$Z_{\text{пар}} = \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{j \cdot X_m} \right)^{-1}, \quad (42)$$

$$Z_{\text{пос}} = R_{12} + j \cdot X_{12}, \quad (43)$$

$$Z_{\text{пар}} = \frac{1}{Z_{\text{пос}}}, \quad (44)$$

Из формул (43) – (45) после алгебраических преобразований были получены сопротивления R_m и X_m :

$$R_m = \frac{R_{12}^2 + X_{12}^2}{R_{12}}, \quad (45)$$

$$X_m = \frac{R_{12}^2 + X_{12}^2}{R_{12}}, \quad (46)$$

Значения сопротивлений $R_{12} = 0,207$ о.е и $X_{12} = 3,36$ о.е. были взяты из расчета, приведенного в [10].

$$R_m = \frac{0,207^2 + 3,36^2}{0,207} = 54,746 \text{ о.е.}$$

Таким образом, были найдены все параметры схемы замещения. После этого дальнейшие расчеты ведутся в файле приложения *Mathcad*. В файл заносятся характеристики, полученные из опыта холостого хода и опыта короткого замыкания. На основании этих данных при помощи функции кубической сплайн-интерполяции (*pspline*) и функции интерполяции (*interp*) формируются зависимости $X_m(U)$, $X_{\sigma 1}(I)$ и $X'_{\sigma 2}(I)$. Далее на основе законов Кирхгофа формируется система нелинейных уравнений в комплексной форме, приведенная ниже, для схемы замещения асинхронного двигателя, приведенной на рис. 5.

$$\dot{I}_1 \cdot (R1 + j \cdot X\sigma 1(|\dot{I}_1|)) + \dot{I}_{mr} \cdot Rm = \dot{U}, \quad (47)$$

$$\dot{I}_{mr} \cdot Rm = \dot{I}_{mx} \cdot j \cdot Xm(|\dot{U} - \dot{I}_1 \cdot (R1 + j \cdot X\sigma 1(|\dot{I}_1|))|), \quad (48)$$

$$\dot{I}_{mr} \cdot Rm = \dot{I}'_2 \cdot \left(\frac{R'2}{s} + j \cdot X'\sigma 2(|\dot{I}'_2|) \right), \quad (49)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_{mr} + \dot{I}_{mx}, \quad (50)$$

При помощи функции *Given...Find* было найдено решение данной системы нелинейных уравнений, а именно зависимости тока статора $\dot{I}_1(s)$ и приведенного тока ротора $\dot{I}'_2(s)$ от скольжения s . Зависимости тока статора $\dot{I}_1(s)$ и приведенного тока ротора $\dot{I}'_2(s)$ приведены на рисунке 14.

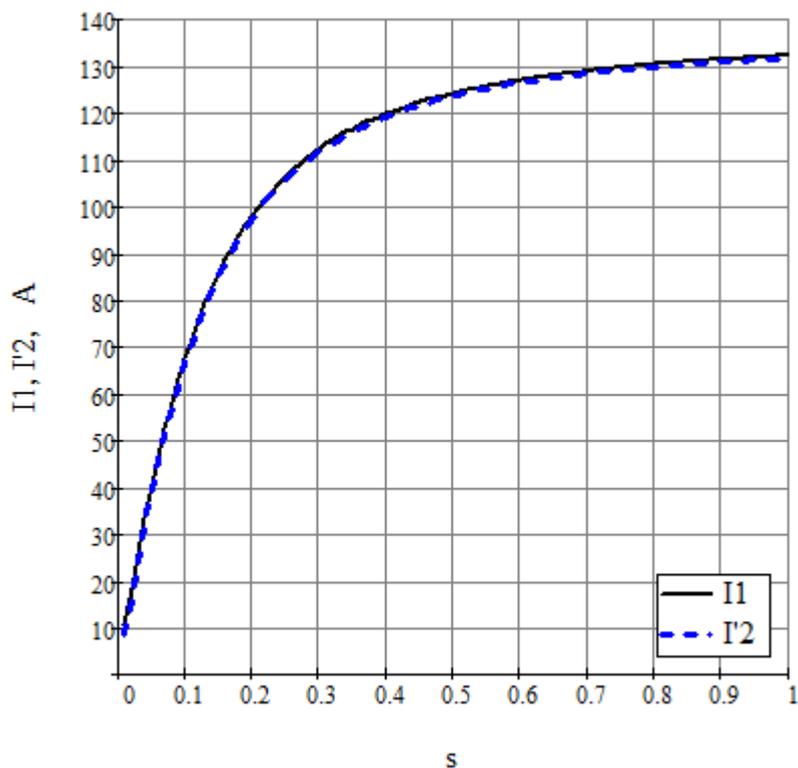


Рисунок 14. Зависимости тока статора $I_1(s)$ и приведенного тока ротора $I'_2(s)$ от скольжения s .

Далее были определены рабочие характеристики асинхронного двигателя $I_1, \eta, \cos \varphi, s = f(P_2)$, представленные в приложении 2. Расчет был произведен по следующим формулам:

$$\dot{S}(s) = U_H \cdot \dot{I}_1(s) \cdot m, \quad (51)$$

$$P_1(s) = \operatorname{Re}(\dot{S}(s)), \quad (52)$$

$$\cos \varphi(s) = \frac{\operatorname{Re}(P_1(s))}{|\dot{S}(s)|}, \quad (53)$$

$$\dot{E}(s) = U_H - \dot{I}_1(s) \cdot (R1 + j \cdot X\sigma1(|\dot{I}_1(s)|)), \quad (54)$$

$$\dot{S}_{\text{эм}}(s) = m \cdot \dot{E}(s) \cdot \overline{\dot{I}'_2(s)}, \quad (55)$$

$$P_{\text{эм}}(s) = \operatorname{Re}(\dot{S}_{\text{эм}}(s)), \quad (56)$$

$$M_{\text{эм}}(s) = \frac{P_{\text{эм}}(s) \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (57)$$

$$P_{\text{эл1}}(s) = m \cdot (|\dot{I}_1(s)|)^2 \cdot R1, \quad (58)$$

$$P_{эл2}(s) = m \cdot (|I'_2(s)|)^2 \cdot R'_2, \quad (59)$$

$$P_{доб}(s) = 0,005 \cdot P_1(s), \quad (60)$$

$$P_{\Sigma P}(s) = P_{ст} + P_{мех} + P_{доб}(s) + P_{эл1}(s) + P_{эл2}(s), \quad (61)$$

$$P_2(s) = P_1(s) - P_{\Sigma P}(s), \quad (62)$$

$$\eta(s) = 1 - \frac{P_{\Sigma P}(s)}{P_1(s)}, \quad (63)$$

где $\dot{S}(s)$ – полная мощность, $P_1(s)$ – входная мощность, $\cos \varphi(s)$ – коэффициент мощности, $\dot{E}(s)$ – Э.Д.С., $\dot{S}_{эм}(s)$ – электромагнитная мощность, $P_{эм}(s)$ – активная составляющая электромагнитной мощности, $M_{эм}(s)$ – электромагнитный момент, $P_{эл1}(s)$ – электрические потери в обмотке статора, $P_{эл2}(s)$ – электрические потери в обмотке ротора, $P_{доб}(s)$ – добавочные потери, $P_{ст} = 0,34 \cdot 10^3$ Вт – основные потери в стали по [10], $P_{мех} = 0,1 \cdot 10^3$ Вт – механические потери по [10], $P_2(s)$ – полезная мощность, $\eta(s)$ – К.П.Д. асинхронного двигателя.

При помощи функции *Given...Find* было найдено для номинальной мощности $P_H = 13 \cdot 10^3$ Вт номинальное скольжение $s_H = 2,698$ %. На основании значения номинального скольжения s_H были определены номинальные величины, соответствующие номинальной мощности P_H .

$$I_1 = |\dot{I}_1(s_H)| = 23,526 \text{ A}$$

$$I'_2 = |\dot{I}'_2(s_H)| = 22,35 \text{ A}$$

$$\cos \varphi(s_H) = 0,932$$

$$\eta(s_H) = 0,8979$$

Далее приведены зависимости рабочих характеристик асинхронного двигателя. Характеристики были рассчитаны для значений скольжения $s = (0 \div 2 \text{ о. е.})s_H$.

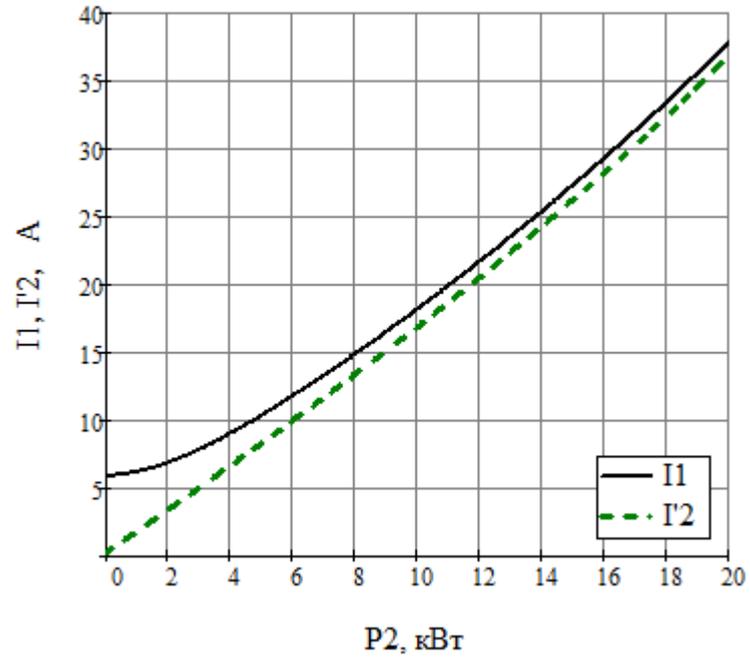


Рисунок 15. Зависимость тока статора I_1 и приведенного тока ротора I'_2 от полезной мощности P_2 .

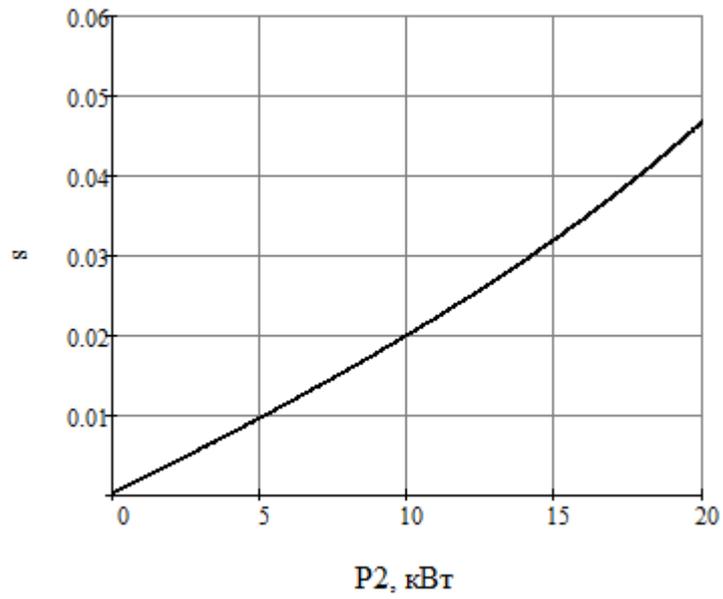


Рисунок 16. Зависимость скольжения s от полезной мощности P_2 .

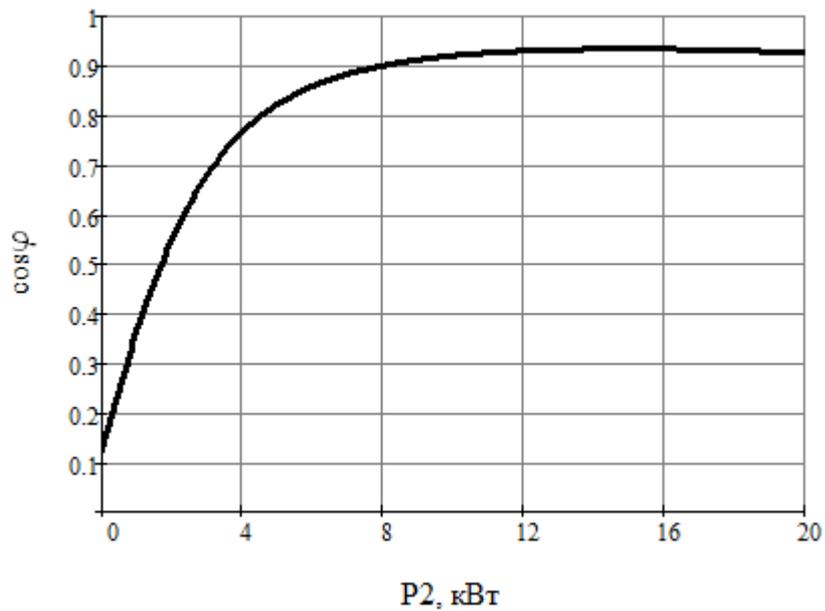


Рисунок 17. Зависимость $\cos \varphi$ от полезной мощности P_2

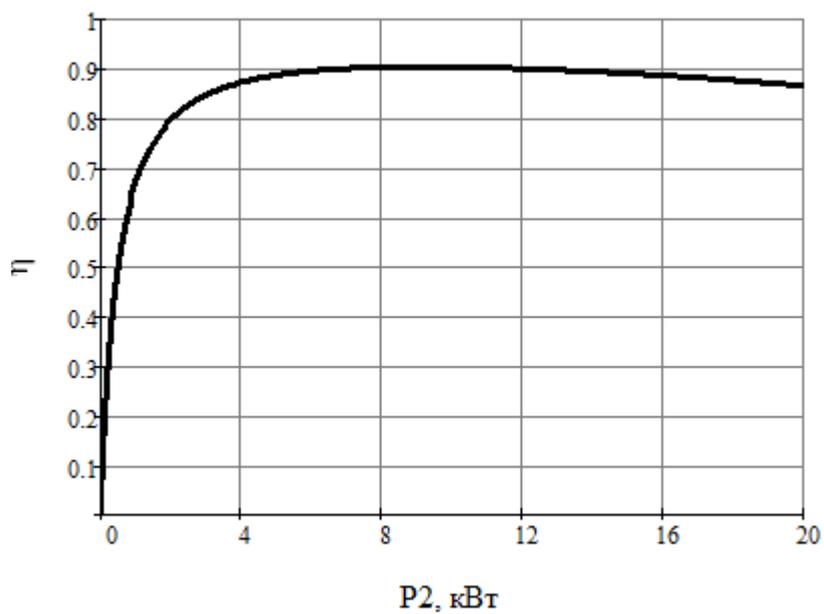


Рисунок 18. Зависимость η от полезной мощности P_2

4. Заключение

В ходе данной работы был разработан программный комплекс. Были исследованы электромагнитные процессы в асинхронном двигателе, а также влияние насыщения магнитопровода статора и ротора на индуктивные сопротивления рассеяния и взаимной индукции. В результате выполнения расчета при помощи разработанного программного обеспечения были найдены зависимости индуктивных сопротивлений рассеяния статора $X_{\sigma 1}(I)$, ротора $X'_{\sigma 2}(I)$ и взаимной индукции $X_m(U)$. Полученные параметры схемы замещения асинхронного двигателя позволили найти зависимости рабочих характеристик $I_1, \eta, \cos \varphi, s = f(P_2)$, а так же номинальные величины, соответствующие номинальной мощности P_n .

Анализ результатов расчета численным моделированием в пакете Elcut и результатов аналитического расчета, приведенного в [10], свидетельствует о корректности параметрической модели исследуемой машины. Результаты приведены в таблице 10.

Таблица 10.

Сравнение результатов

Номинальные величины	Аналитический метод	Численное моделирование	Отклонение %
s_n	2,72 %	2,698 %	0,796
I_1	25 А	23,526 А	5,896
I'_2	22,7 А	22,35 А	1,543
$\cos \varphi$	0,885	0,932	5,3576
η	0,89	0,8979	0,892

Различие результатов обусловлено исследованием в данной работе общего магнитного потока электрической машины и влияния насыщения на параметры схемы замещения. В реальности процессы в машине гораздо сложнее, чем процессы моделируемые такой схемой замещения.

В целом можно сделать заключение о том, что разработанное программное обеспечение позволяет производить параметрический расчет асинхронных двигателей с учетом насыщения. А дальнейшее усовершенствование программы позволит расширить спектр исследуемых электрических машин, что, в свою очередь, положительно скажется на возможности практического применения разработанной программы при конструировании электрических машин.

Список использованных источников

1. Черных И.В. Решение полевых задач с помощью программы ELCUT 4.2. Методические указания/ И.В. Черных–. Екатеринбург: Изд-во УГТУ -УПИ, 2002.–23 с.
2. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.0. Руководство пользователя. –Санкт-Петербург: ООО ТОР–2013г.–295с.
3. Сочава М.В. Решение полевых задач с помощью программы ELCUT6.0. Задачи магнитостатики и магнитного поля переменных токов/Сочава М.В.– Учебное пособие.–СПб., 2014. 38с.
4. <http://active.elcut.ru/HTML/Welcome.htm> - справка по технологии ActiveField.
5. http://elcut.ru/dcmag_r.htm - справка по модулю магнитостатика.
6. http://elcut.ru/acmag_r.htm - справка по модулю магнитного поля переменных токов.
7. Джон Уокенбах. Excel 2013: профессиональное программирование на VBA = Excel 2013 Power Programming with VBA. — М.: «Диалектика», 2014. — 960 с
8. Джон Уокенбах. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA = Excel 2010 Power Programming with VBA. — М.: «Диалектика», 2011. — С. 944.
9. Стивен Буллен, Роб Боуви, Джон Грин. Excel и VBA: Профессиональная разработка приложений — М.: «Диалектика», 2007. — С736
10. Сергеев С.П. «Проектирование электрических машин». Изд. 3-е, переработ. и доп. М., “Энергия” 1970 г., 632 ст
11. Вольдек А.И. Зависимость между энергией магнитного поля и индуктивностями многофазных обмоток. – Труды ЛПИ №241. – Л., – с. 18 – 22.
12. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Издание третье, переработанное / А. И. Вольдек. – Ленинград: Энергия, 1978. – 832 с.
13. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.
14. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И. И. Трещев. Л.: Энергия: Ленинград. отд-ние, 1980. – 344 с.
15. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для элктротехн. и эннергет. спец. Вузов / И. П. Копылов. 3-е изд., перераб. И доп. М.: Высшая школа. 2001. – 327 с.

16. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под редакцией И.П. Копылова. - М.: Энергия, 1980-496 с

17. Гольдберга О.Д. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / Под ред. О.Д. Гольдберга.-М.: Высш. шк., 1984-431 с.

18. Усольцев А.А. Определение параметров схемы замещения АД по справочным данным. - Электронный ресурс : http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf . – 4 с.

19. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. - №4/98. - 1998. - С. 38-42.

20. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2003. – 448 с.

Приложение 1. Код программного модуля VBA

```
Option Explicit
Const pi = 3.1415926
Public prb As ELCUT.Problem
Public ELC As ELCUT.Application
Public mdl As ELCUT.Model
Public shp As ELCUT.ShapeRange
Public res As ELCUT.Result
Public prbN As ELCUT.Problem
Public m As Double
Public p As Double
' Исходные данные статора
Public Da As Double
Public Dст As Double
Public lст As Double
Public Zст As Double
Public uп1 As Double
Public hп1 As Double
Public bп1 As Double
Public bп12 As Double
Public hк As Double
Public hш As Double
Public bш As Double
Public Im As Double
Public nэф As Double
Public Ik As Double
'Исходные данные ротора
Public Dр As Double
Public Dв As Double
Public Zр As Double
Public hп2 As Double
Public h2 As Double
Public bп2 As Double
Public hш2 As Double
Public bш2 As Double
Public j As Double
Public jM As Double
```

```

Public Jmax As Double
Public Aampl As Double
Public sp As Double
Public sp2 As Double
Public In As Double

Public Sub CommandButton1_Click()
'Код програмы расчета характеристики холостого хода
LoadData 'Загрузка данных
CreateTask 'Создание задачи
CreateGeometry 'Создание геометрии
GetSp 'Задание шага сетки, построение сетки
Spacing
Dim i As Integer
For i = 0 To 10
    j = i * Jmax / 10
        SetProperty 'Задача физических свойств
        GetResult 'Решение задачи
        With ThisWorkbook
            .Names("KeeperPos1").RefersToRange.Offset(i + 1, 0).Value = Aampl
        End With
    Next i
End Sub

Public Sub LoadData()
With ThisWorkbook
'Тех. данные
m = Cells(7, 2)
p = Cells(9, 2)
F = Cells(10, 2)
In = Cells(11, 2)
'статор
Da = Cells(5, 5)
Dст = Cells(6, 5)
lст = Cells(7, 5)
Zст = Cells(8, 5)
un1 = Cells(9, 5)
hn1 = Cells(10, 5)

```

```

bn1 = Cells(11, 5)
bn12 = Cells(12, 5)
hk = Cells(13, 5)
hш = Cells(14, 5)
bш = Cells(15, 5)
Im = Cells(16, 5)
nэф = Cells(17, 5)
Ik = Cells(21, 5)

'погор
Dp = Cells(5, 8)
Dв = Cells(6, 8)
Zp = Cells(7, 8)
hn2 = Cells(8, 8)
h2 = Cells(9, 8)
bn2 = Cells(10, 8)
hn2 = Cells(11, 8)
bn2 = Cells(12, 8)

End With

End Sub

Public Sub CreateTask()
Set ELC = CreateObject("ELCUT.Application")
ELC.DefaultFilePath = "C:\ELCUT"
ELC.MainWindow.Visible = True
' создание задачи
Set prb = ELC.Problems.Add
With prb
' задаем свойства задачи
.ProblemType = qfMagnetostatics
.Class = qfPlaneParallel
.LengthUnits = qfMeters
.Coordinates = qfCartesian
.ZLength = lсг
.ReferencedFile(qfModelFile) = "СергеевзадачаXX.mod"
.ReferencedFile(qfDataFile) = "СергеевзадачаXX.dms"
.SaveAs "СергеевзадачаXX.pbm" 'Save the new problem
End With

```

```
prb.SaveAs "СергеевзадачаXX.pbm"
```

```
End Sub
```

```
Public Sub CreateGeometry()
```

```
prb.LoadModel
```

```
'построение геометрии
```

```
Set mdl = prb.Model
```

```
With mdl.Shapes
```

```
'статор
```

```
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Dст / 2, 0), _
```

```
    ELC.PointXY(-Dст / 2, 0), pi)
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(-Dст / 2, 0), _
```

```
    ELC.PointXY(Dст / 2, 0), pi
```

```
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Da / 2, 0), _
```

```
    ELC.PointXY(-Da / 2, 0), pi)
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(-Da / 2, 0), _
```

```
    ELC.PointXY(Da / 2, 0), pi
```

```
.Boundary(qfOuterOnly).Label = "Zero"
```

```
'пазы статора
```

```
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(бш * 0.001 / 2, Dст / 2 - 0.000025), _
```

```
    ELC.PointXY(бш * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001))
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(-бп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001), _
```

```
    ELC.PointXY(бп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001)
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(бп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001), _
```

```
    ELC.PointXY(бп12 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hп1 * 0.001)
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(бп12 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hп1 * 0.001), _
```

```
    ELC.PointXY(-бп12 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hп1 * 0.001)
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(-бп12 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hп1 * 0.001), _
```

```
    ELC.PointXY(-бп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001)
```

```
'построение проводников в пазу
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(-((бп12 * 0.001 / 2 - бп1 * 0.001 / 2) * ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.607) / (hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001)) - бп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.607)), _
```

```
    ELC.PointXY(((бп12 * 0.001 / 2 - бп1 * 0.001 / 2) * ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.607) / (hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001)) + бп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.607))
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(бш * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001), _
```

```
    ELC.PointXY(бп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001)
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(-бш * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001), _
```

```

    ELC.PointXY(-bш * 0.001 / 2, DсТ / 2 - 0.000025)
    .AddEdge ELC.PointXY(-bш1 * 0.001 / 2, DсТ / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001), _
    ELC.PointXY(-bш * 0.001 / 2, DсТ / 2 + hш * 0.001)
    shp.Left.Label = "Air"
    End With

mdl.Shapes.Select False

mdl.Shapes.InRectangle(ELC.PointXY(-bш12 * 0.001 / 2 - 0.01, DсТ / 2 - 0.01), ELC.PointXY(bш12 * 0.001 / 2 + 0.01,
DсТ / 2 + hш1 * 0.001 + 0.01)).Select

mdl.Selection.Duplicate qfRotation, ELC.PointXY(0, 0), 360 / ZсТ * pi / 180, ZсТ

mdl.Shapes.Select False

With mdl.Shapes
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Da / 2, 0), _
    ELC.PointXY(-Da / 2, 0), pi)
.AddEdge ELC.PointXY(-Da / 2, 0), _
    ELC.PointXY(Da / 2, 0), pi
shp.Left.Label = "Староп"
End With

'потоп
With mdl.Shapes
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Dp / 2, 0), _
    ELC.PointXY(-Dp / 2, 0), pi)
.AddEdge ELC.PointXY(-Dp / 2, 0), _
    ELC.PointXY(Dp / 2, 0), pi
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Dв / 2, 0), _
    ELC.PointXY(-Dв / 2, 0), pi)
.AddEdge ELC.PointXY(-Dв / 2, 0), _
    ELC.PointXY(Dв / 2, 0), pi
shp.Right.Label = "Потоп"

'пазы ротора
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(-bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001 - ((hш2 * 0.001 - hш2 * 0.001 -
h2 * 0.001) / 2)), _
    ELC.PointXY(-bш2 / 2 * 0.001 * 0.75, Dp / 2 - hш2 * 0.001))
.AddEdge ELC.PointXY(-bш2 / 2 * 0.001 * 0.75, Dp / 2 - hш2 * 0.001), _
    ELC.PointXY(bш2 / 2 * 0.001 * 0.75, Dp / 2 - hш2 * 0.001)
.AddEdge ELC.PointXY(bш2 / 2 * 0.001 * 0.75, Dp / 2 - hш2 * 0.001), _
    ELC.PointXY(bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001 - ((hш2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2))
.AddEdge ELC.PointXY(bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001 - ((hш2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 *
0.001) / 2)), _

```

```

    ELC.PointXY(bπ2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - ((hπ2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2))
.AddEdge ELC.PointXY(bπ2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - ((hπ2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _
    ELC.PointXY(-bπ2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - ((hπ2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2))
.AddEdge ELC.PointXY(-bπ2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - ((hπ2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _
    ELC.PointXY(-bπ2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001 - ((hπ2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001) /
2))
    shp.Left.Label = "Пазы ротора"
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 + 0.000025), _
    ELC.PointXY(bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001))
    .AddEdge ELC.PointXY(bπ2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - ((hπ2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _
    ELC.PointXY(bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001)
.AddEdge ELC.PointXY(-bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 + 0.000025), _
    ELC.PointXY(-bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001)
.AddEdge ELC.PointXY(-bπ2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001 - ((hπ2 * 0.001 - hш2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _
    ELC.PointXY(-bш2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hш2 * 0.001)
    shp.Right.Label = "Air"

End With

mdl.Shapes.Select False

mdl.Shapes.InRectangle(ELC.PointXY(-bπ2 / 2 * 0.001 * 1.1, Dcr / 2 - (hπ2 * 0.001 * 1.1)), ELC.PointXY(bπ2 / 2 *
0.001 * 1.1, Dcr / 2 + hш2 * 0.001 * 0.5)).Select

mdl.Selection.Duplicate qfRotation, ELC.PointXY(0, 0), 360 / Zp * pi / 180, Zp

mdl.Shapes.Select False

With mdl.Shapes
    Dim i As Double
    Dim Z As Double
    Dim q As Double
    Dim angle As Double
    Dim angle2 As Double
    q = Zcr / (m * 2 * p)
    For i = 1 To q
        angle = i * 360 / Zcr * pi / 180
        'myLabel = "A "
        .Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hπ1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "A"
        angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
        .Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hπ1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "A"
    Next i
    For i = 4 / q * q To 2 * q
        angle = i * 360 / Zcr * pi / 180

```

```

'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "Y"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "Y"
Next i
For i = 7 / q * q To 3 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "C"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "C"
Next i
For i = 10 / q * q To 4 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "X"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "X"
Next i
For i = 13 / q * q To 5 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "B"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "B"
Next i
For i = 16 / q * q To 6 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "Z"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "Z"
Next i
For i = 1 To 1
angle = 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Db / 2 - 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "вал"

```

Next i

$$q = Z_{CT} / (m * 2 * p)$$

For i = 1 To q

$$\text{angle} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

'myLabel = "A "

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "A"

$$\text{angle2} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "A"

Next i

For i = 4 / q * q To 2 * q

$$\text{angle} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

'myLabel = "A " & Z

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "Y"

$$\text{angle2} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "Y"

Next i

For i = 7 / q * q To 3 * q

$$\text{angle} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

'myLabel = "A " & Z

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "C"

$$\text{angle2} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "C"

Next i

For i = 10 / q * q To 4 * q

$$\text{angle} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

'myLabel = "A " & Z

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "X"

$$\text{angle2} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "X"

Next i

For i = 13 / q * q To 5 * q

$$\text{angle} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

'myLabel = "A " & Z

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "B"

$$\text{angle2} = i * 360 / Z_{CT} * \pi / 180 + 180 * \pi / 180 + 180 / 18 * 2 * \pi / 180$$

.Nearest(ELC.PointRA(D_{CT} / 2 + ((h_{π1} * 0.001 - h_{π3} * 0.001 - h_κ * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "B"

Next i

```

For i = 16 / q * q To 6 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "Z"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "Z"
Next i
End With

Dim win As ELCUT.ModelWindow
Set win = mdl.Windows(1)
win.WindowState = qfNormal + 20
win.Height = win.Width + 20
win.Zoom
End Sub

Public Sub SetProperty()
Dim lab As ELCUT.Label
Dim elem As Variant
Dim cntBlock As ELCUT.LabelBlockMS
For Each elem In prb.Labels(qfBlock)
Set lab = elem
Set cntBlock = lab.Content
Select Case lab.Name
Case "Air", "вал"
cntBlock.Kxx = 1
cntBlock.Kyy = 1
Case "Пазы ротора"
cntBlock.Kxx = 1
cntBlock.Kyy = 1
Case "A"
cntBlock.Kxx = 1
cntBlock.Kyy = 1
cntBlock.TotalCurrent = False
cntBlock.LoadingEx = j
Case "X"
cntBlock.Kxx = 1
cntBlock.Kyy = 1

```

```
cntBlock.TotalCurrent = False
```

```
cntBlock.LoadingEx = -j
```

```
Case "Y", "Z"
```

```
cntBlock.Kxx = 1
```

```
cntBlock.Kyy = 1
```

```
cntBlock.TotalCurrent = False
```

```
cntBlock.LoadingEx = j / 2
```

```
Case "C", "B"
```

```
cntBlock.Kxx = 1
```

```
cntBlock.Kyy = 1
```

```
cntBlock.TotalCurrent = False
```

```
cntBlock.LoadingEx = -j / 2
```

```
Dim spl As ELCUT.Spline
```

```
Case "Статоп", "Ротоп"
```

```
Set spl = cntBlock.CreateBHCurve
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(5, 10), Cells(5, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(6, 10), Cells(6, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(7, 10), Cells(7, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(8, 10), Cells(8, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(9, 10), Cells(9, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(10, 10), Cells(10, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(11, 10), Cells(11, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(12, 10), Cells(12, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(13, 10), Cells(13, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(14, 10), Cells(14, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(15, 10), Cells(15, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(16, 10), Cells(16, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(17, 10), Cells(17, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(18, 10), Cells(18, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(19, 10), Cells(19, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(20, 10), Cells(20, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(21, 10), Cells(21, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(22, 10), Cells(22, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(23, 10), Cells(23, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(24, 10), Cells(24, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(25, 10), Cells(25, 12))
```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(26, 10), Cells(26, 12))
```

```

spl.Add ELC.PointXY(Cells(27, 10), Cells(27, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(28, 10), Cells(28, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(29, 10), Cells(29, 12))
cntBlock.Spline = spl
End Select
lab.Content = cntBlock

Next
Dim cntEdge As ELCUT.LabelEdgeMS
Set cntEdge = prb.Labels(qfEdge).Item("Zero").Content
cntEdge.Dirichlet = 0
prb.Labels(qfEdge).Item("Zero").Content = cntEdge
End Sub

Public Sub Spacing()
With mdl.Shapes
' Set Spacing
.RemoveMesh
Dim sp As Double
sp = (Dcr - Dp) / 2 / 4
.LabeledAs(Block:="Air").Spacing = sp
.LabeledAs(Block:="вал").Spacing = 0.004
.LabeledAs(Block:="A").Spacing = 0.0008
.LabeledAs(Block:="B").Spacing = 0.0008
.LabeledAs(Block:="C").Spacing = 0.0008
.LabeledAs(Block:="X").Spacing = 0.0008
.LabeledAs(Block:="Y").Spacing = 0.0008
.LabeledAs(Block:="Z").Spacing = 0.0008
.LabeledAs(Block:="Пазы ротора").Spacing = 0.0006
.LabeledAs(Edge:="Zero").Spacing = 0.008
' Generate the mesh
.BuildMesh
End With
End Sub

Private Sub GetResult()
Гармонический анализатор
Dim force As Double
force = CalculateForce()

```

```

Const pi = 3.1415926535
Dim X(1 To 361) As Variant
Dim Y(1 To 361) As Variant
Dim F(1 To 361) As Variant
Dim U(1 To 361) As Variant
Dim VP(1 To 361) As Variant
Dim a(1 To 360) As Variant
Dim B(1 To 360) As Variant
Dim C(1 To 360) As Variant
Dim Af(1 To 60) As Variant
Dim alf(1 To 360) As Variant
Dim dAlf(1 To 360) As Variant
Dim Ass(1 To 60) As Variant
Dim i, j, k As Integer
For i = 1 To 361
  X(i) = Range("O" & i).Value
  Y(i) = Range("P" & i).Value
  If Y(i) = 0 Then
    Y(i) = Y(i) + 0.00001
  Else
    Y(i) = Y(i)
  End If
  F(i) = Atn(X(i) / Y(i))
Next i
For i = 1 To 361
  U(i) = F(i)
  VP(i) = Range("Q" & i).Value
Next i
For j = 1 To 360
  alf(j) = U(j + 1)
  a(j) = VP(j + 1)
  dAlf(j) = U(j + 1) - U(j) 'нахождение дельты угла
Next j
For k = 1 To 60
  B(k) = 0
  C(k) = 0
  For j = 1 To 360

```

```

B(k) = B(k) + (2 / pi) * a(j) * Sin(k * 2 * alf(j)) * dAlf(j)
C(k) = C(k) + (2 / pi) * a(j) * Cos(k * 2 * alf(j)) * dAlf(j)
Next j
Ass(k) = Sqr((B(k) ^ 2 + (C(k) ^ 2)
Next k
Aampl = Ass(1)
Range("A22").Value = Aampl
End Sub

Function CalculateForce() As Double
If prb.CanSolve Then prb.SolveProblem
If prb.Solved Then prb.AnalyzeResults
    Set res = prb.Result
    If res Is Nothing Then Exit Function
        Dim win As ELCUT.FieldWindow
        Set win = res.Windows(1)
        With win.Contour
            .AddLineTo ELC.PointXY((Dct - Dp) / 4 + (Dp / 2), 0)
            .AddLineTo ELC.PointXY(-(Dct - Dp) / 4 - (Dp / 2), 0), pi
        End With
' Создание таблицы
Dim i As Double
Dim X1 As ELCUT.TableColumn
Dim X As ELCUT.TableColumn
Dim Y As ELCUT.TableColumn
Dim a As ELCUT.TableColumn
Dim table As ELCUT.TableWindow
Set table = res.GetTable(win.Contour)
    ' Включение показа описания величины в заголовке таблицы
table.Columns.ShowDescription = True
    ' Создание таблицы в 361 строк
table.Rows.TabulateNumber 361
table.Columns.SetWidth (qfByHeader)
For i = 1 To 18
    Set X1 = table.Columns(1)
    If Not X1 Is Nothing Then
        table.Columns.Remove X1    ' и его удаление
    End If

```

Next

Set X = table.Columns.Add(qfCoordX)

Set Y = table.Columns.Add(qfCoordY)

Set a = table.Columns.Add(qfPotential)

table.Rows.Select 1, 361

table.GetData ' copy table

ThisWorkbook.Sheets.Item(1).Select ' выделить второй лист

ThisWorkbook.Sheets.Item(1).Range("O1").Select ' выбрать ячейку

ThisWorkbook.Sheets.Item(1).Paste

End Function

Public Sub SetProperties0()

Dim lab As ELCUT.Label

Dim elem As Variant

Dim cntBlock As ELCUT.LabelBlockMS

For Each elem In prb.Labels(qfBlock)

Set lab = elem

Set cntBlock = lab.Content

Select Case lab.Name

Case "Air", "вал"

cntBlock.Kxx = 1

cntBlock.Kyy = 1

Case "Статор", "Ротор"

cntBlock.Kxx = 1

cntBlock.Kyy = 1

Case "Пазы ротора"

cntBlock.Kxx = 1

cntBlock.Kyy = 1

Case "A"

cntBlock.Kxx = 1

cntBlock.Kyy = 1

cntBlock.TotalCurrent = False

cntBlock.LoadingEx = 0

Case "X"

cntBlock.Kxx = 1

cntBlock.Kyy = 1

cntBlock.TotalCurrent = False

cntBlock.LoadingEx = 0

```

Case "Y", "Z"
    cntBlock.Kxx = 1
    cntBlock.Kyy = 1
    cntBlock.TotalCurrent = False
    cntBlock.LoadingEx = 0
Case "C", "B"
    cntBlock.Kxx = 1
    cntBlock.Kyy = 1
    cntBlock.TotalCurrent = False
    cntBlock.LoadingEx = 0
End Select
lab.Content = cntBlock
Next
Dim cntEdge As ELCUT.LabelEdgeMS
Set cntEdge = prb.Labels(qfEdge).Item("Zero").Content
cntEdge.Dirichlet = 0
prb.Labels(qfEdge).Item("Zero").Content = cntEdge
End Sub

Public Sub GetSp()
Dim q As Double
Dim ang As Double
SetProperties0
Spacing
With mdl.Shapes
    .BuildMesh
End With
Dim res As ELCUT.Result
If Not prb.Solved Then
    prb.SolveProblem
End If
prb.AnalyzeResults      ' Загрузка результатов решения
Set res = prb.Result    ' Получение объекта Result
Dim Plosch As Double
Dim win As ELCUT.FieldWindow
Set win = res.Windows(1)
With win.Contour

```

```

.AddLineTo ELC.PointXY( $b_{\pi 1} * 0.001 / 2, D_{cT} / 2 + h_{\pi\pi} * 0.001 + h_{\kappa} * 0.001$ )
.AddLineTo ELC.PointXY( $b_{\pi 2} * 0.001 / 2, D_{cT} / 2 + h_{\pi 1} * 0.001$ ), 0
.AddLineTo ELC.PointXY( $-b_{\pi 2} * 0.001 / 2, D_{cT} / 2 + h_{\pi 1} * 0.001$ ), 0
.AddLineTo ELC.PointXY( $-b_{\pi 1} * 0.001 / 2, D_{cT} / 2 + h_{\pi\pi} * 0.001 + h_{\kappa} * 0.001$ ), 0
.AddLineTo ELC.PointXY( $b_{\pi 1} * 0.001 / 2, D_{cT} / 2 + h_{\pi\pi} * 0.001 + h_{\kappa} * 0.001$ ), 0
Plosch = .Square
.Delete True
End With
sp = Plosch
Cells(1, 1) = sp
Dim Plosch2 As Double
With win.Contour
.AddLineTo ELC.PointXY( $-b_{\pi 2} / 2 * 0.001, D_p / 2 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - h_2 * 0.001 - ((h_{\pi 2} * 0.001 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - h_2 * 0.001) / 2)$ )
.AddLineTo ELC.PointXY( $-b_{\pi 2} / 2 * 0.001 * 0.75, D_p / 2 - h_{\pi 2} * 0.001$ ), 0
.AddLineTo ELC.PointXY( $b_{\pi 2} / 2 * 0.001 * 0.75, D_p / 2 - h_{\pi 2} * 0.001$ ), 0
.AddLineTo ELC.PointXY( $b_{\pi 2} / 2 * 0.001, D_p / 2 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - h_2 * 0.001 - ((h_{\pi 2} * 0.001 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - h_2 * 0.001) / 2)$ ), 0
.AddLineTo ELC.PointXY( $b_{\pi 2} / 2 * 0.001, D_p / 2 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - ((h_{\pi 2} * 0.001 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - h_2 * 0.001) / 2)$ ), 0
.AddLineTo ELC.PointXY( $-b_{\pi 2} / 2 * 0.001, D_p / 2 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - ((h_{\pi 2} * 0.001 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - h_2 * 0.001) / 2)$ ), 0
.AddLineTo ELC.PointXY( $-b_{\pi 2} / 2 * 0.001, D_p / 2 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - h_2 * 0.001 - ((h_{\pi 2} * 0.001 - h_{\pi\pi 2} * 0.001 - h_2 * 0.001) / 2)$ ), 0
Plosch2 = .Square
End With
sp2 = Plosch2
Cells(2, 1) = sp2
jM =  $(u_{\pi 1} * n_{\text{эф}} * (I_{\text{н}} * 0.4) * 2^{(1/2)}) / (sp / 2)$ 
Jmax = jM
End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()
'код программы расчета опыта короткого замыкания
LoadData
CreateTaskKZ
CreateGeometryKZ
SetPropertiesKZ
SpacingKZ

```

```
GetResult2
```

```
End Sub
```

```
Public Sub CreateTaskKZ()
```

```
Set ELC = CreateObject("ELCUT.Application")
```

```
ELC.DefaultFilePath = "C:\ELCUT"
```

```
ELC.MainWindow.Visible = True
```

```
' создание задачи
```

```
Set prb = ELC.Problems.Add
```

```
With prb
```

```
' задаем свойства задачи
```

```
.ProblemType = qfTimeHarmonicMagnetics
```

```
.Class = qfPlaneParallel
```

```
.LengthUnits = qfMeters
```

```
.Coordinates = qfCartesian
```

```
.ZLength = lct
```

```
' ZFrequency = Cells(10, 2)
```

```
.ReferencedFile(qfModelFile) = "СергеевзадачаКЗ.mod"
```

```
.ReferencedFile(qfDataFile) = "СергеевзадачаКЗ.dms"
```

```
.ReferencedFile(qfCircuitFile) = "кзцепь.qcr"
```

```
.SaveAs "СергеевзадачаКЗ.pbm"
```

```
End With
```

```
prb.SaveAs "СергеевзадачаКЗ.pbm"
```

```
End Sub
```

```
Public Sub CreateGeometryKZ()
```

```
prb.LoadModel
```

```
' построение геометрии
```

```
Set mdl = prb.Model
```

```
With mdl.Shapes
```

```
' статор
```

```
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Dct / 2, 0), _
```

```
ELC.PointXY(-Dct / 2, 0), pi)
```

```
.AddEdge ELC.PointXY(-Dct / 2, 0), _
```

```
ELC.PointXY(Dct / 2, 0), pi)
```

```
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Da / 2, 0), _
```

```
ELC.PointXY(-Da / 2, 0), pi)
```

```

.AddEdge ELC.PointXY(-Da / 2, 0), _
    ELC.PointXY(Da / 2, 0), pi
.Boundary(qfOuterOnly).Label = "Zero"
'пазы статора
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(bш * 0.001 / 2, Dст / 2 - 0.000025), _
ELC.PointXY(bш * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001))
.AddEdge ELC.PointXY(-bп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001), _
    ELC.PointXY(bп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001)
.AddEdge ELC.PointXY(bп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001), _
    ELC.PointXY(bп12 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hп1 * 0.001)
.AddEdge ELC.PointXY(bп12 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hп1 * 0.001), _
    ELC.PointXY(-bп12 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hп1 * 0.001)
.AddEdge ELC.PointXY(-bп12 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hп1 * 0.001), _
    ELC.PointXY(-bп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001)
'построение проводников в пазу
.AddEdge ELC.PointXY(-((bп12 * 0.001 / 2 - bп1 * 0.001 / 2) * ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.607) / (hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001)) - bп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.607)),
-
    ELC.PointXY(((bп12 * 0.001 / 2 - bп1 * 0.001 / 2) * ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.607) / (hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001)) + bп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.607))
.AddEdge ELC.PointXY(bш * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001), _
    ELC.PointXY(bп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001)
.AddEdge ELC.PointXY(-bш * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001), _
    ELC.PointXY(-bш * 0.001 / 2, Dст / 2 - 0.000025)
.AddEdge ELC.PointXY(-bп1 * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001 + hк * 0.001), _
    ELC.PointXY(-bш * 0.001 / 2, Dст / 2 + hш * 0.001)
shp.Left.Label = "Air"
End With
mdl.Shapes.Select False
mdl.Shapes.InRectangle(ELC.PointXY(-bп12 * 0.001 / 2 - 0.01, Dст / 2 - 0.01), ELC.PointXY(bп12 * 0.001 / 2 + 0.01, Dст / 2 + hп1 * 0.001 + 0.01)).Select
mdl.Selection.Duplicate qfRotation, ELC.PointXY(0, 0), 360 / Zст * pi / 180, Zст
mdl.Shapes.Select False
With mdl.Shapes
Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Da / 2, 0), _
    ELC.PointXY(-Da / 2, 0), pi)
.AddEdge ELC.PointXY(-Da / 2, 0), _
    ELC.PointXY(Da / 2, 0), pi
shp.Left.Label = "Статор"

```

End With

'ротор

With mdl.Shapes

Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Dp / 2, 0), _

ELC.PointXY(-Dp / 2, 0), pi)

.AddEdge ELC.PointXY(-Dp / 2, 0), _

ELC.PointXY(Dp / 2, 0), pi

Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(Db / 2, 0), _

ELC.PointXY(-Db / 2, 0), pi)

.AddEdge ELC.PointXY(-Db / 2, 0), _

ELC.PointXY(Db / 2, 0), pi

shp.Right.Label = "Ротор"

'пазы ротора

Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(-bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _

ELC.PointXY(-bn2 / 2 * 0.001 * 0.75, Dp / 2 - hm2 * 0.001))

.AddEdge ELC.PointXY(-bn2 / 2 * 0.001 * 0.75, Dp / 2 - hm2 * 0.001), _

ELC.PointXY(bn2 / 2 * 0.001 * 0.75, Dp / 2 - hm2 * 0.001)

.AddEdge ELC.PointXY(bn2 / 2 * 0.001 * 0.75, Dp / 2 - hm2 * 0.001), _

ELC.PointXY(bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2))

.AddEdge ELC.PointXY(bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _

ELC.PointXY(bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2))

.AddEdge ELC.PointXY(bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _

ELC.PointXY(-bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2))

.AddEdge ELC.PointXY(-bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _

ELC.PointXY(-bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2))

'shp.Left.Label = "Пазы ротора"

Set shp = .AddEdge(ELC.PointXY(bm2 / 2 * 0.001, Dp / 2 + 0.000025), _

ELC.PointXY(bm2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001))

.AddEdge ELC.PointXY(bm2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _

ELC.PointXY(bm2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001)

.AddEdge ELC.PointXY(-bm2 / 2 * 0.001, Dp / 2 + 0.000025), _

ELC.PointXY(-bm2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001)

.AddEdge ELC.PointXY(-bn2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001 - ((hn2 * 0.001 - hm2 * 0.001 - h2 * 0.001) / 2)), _

ELC.PointXY(-bm2 / 2 * 0.001, Dp / 2 - hm2 * 0.001)

shp.Right.Label = "Air"

End With

mdl.Shapes.Select False

mdl.Shapes.InRectangle(ELC.PointXY(-bπ2 / 2 * 0.001 * 1.1, Dcτ / 2 - (hπ2 * 0.001 * 1.1)), ELC.PointXY(bπ2 / 2 * 0.001 * 1.1, Dcτ / 2 + hπ2 * 0.001 * 0.5)).Select

mdl.Selection.Duplicate qfRotation, ELC.PointXY(0, 0), 360 / Zp * pi / 180, Zp

mdl.Shapes.Select False

With mdl.Shapes

Dim i As Double

Dim a As Double

Dim Z As Double

Dim q As Double

Dim angle As Double

Dim angle2 As Double

Dim angle3 As Double

For a = 1 To Zp

angle3 = a * 360 / Zp * pi / 180

.Nearest(ELC.PointRA(Dp / 2 - hπ2 / 2 * 0.001, angle3 + 90 * pi / 180)).Blocks.Item(1).Label = "Πα3" & a

Next a

q = Zcτ / (m * 2 * p)

For i = 1 To q

angle = i * 360 / Zcτ * pi / 180

'myLabel = "A "

.Nearest(ELC.PointRA(Dcτ / 2 + hπ1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "A"

angle2 = i * 360 / Zcτ * pi / 180 + 180 * pi / 180

.Nearest(ELC.PointRA(Dcτ / 2 + hπ1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "A"

Next i

For i = 4 / q * q To 2 * q

angle = i * 360 / Zcτ * pi / 180

'myLabel = "A " & Z

.Nearest(ELC.PointRA(Dcτ / 2 + hπ1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "Y"

angle2 = i * 360 / Zcτ * pi / 180 + 180 * pi / 180

.Nearest(ELC.PointRA(Dcτ / 2 + hπ1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "Y"

Next i

For i = 7 / q * q To 3 * q

angle = i * 360 / Zcτ * pi / 180

'myLabel = "A " & Z

.Nearest(ELC.PointRA(Dcτ / 2 + hπ1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "C"

angle2 = i * 360 / Zcτ * pi / 180 + 180 * pi / 180

```

.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "C"
Next i
For i = 10 / q * q To 4 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "X"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "X"
Next i
For i = 13 / q * q To 5 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "B"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "B"
Next i
For i = 16 / q * q To 6 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "Z"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + hp1 / 2 * 0.001, angle2)).Blocks.Item(1).Label = "Z"
Next i
For i = 1 To 1
angle = 360 / Zcr * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Db / 2 - 0.001, angle)).Blocks.Item(1).Label = "вал"
Next i
q = Zcr / (m * 2 * p)
For i = 1 To q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
'myLabel = "A "
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hp1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "A"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hp1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "A"
Next i
For i = 4 / q * q To 2 * q

```

```

angle = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "Y"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "Y"
Next i
For i = 7 / q * q To 3 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "C"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "C"
Next i
For i = 10 / q * q To 4 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "X"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "X"
Next i
For i = 13 / q * q To 5 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "B"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "B"
Next i
For i = 16 / q * q To 6 * q
angle = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
'myLabel = "A " & Z
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle)).Blocks.Item(1).Label = "Z"
angle2 = i * 360 / Zcr * pi / 180 + 180 * pi / 180 + 180 / 18 * 2 * pi / 180
.Nearest(ELC.PointRA(Dcr / 2 + ((hп1 * 0.001 - hш * 0.001 - hк * 0.001) * 0.8), angle2)).Blocks.Item(1).Label = "Z"
Next i
End With
Dim win As ELCUT.ModelWindow
Set win = mdl.Windows(1)

```

```

win.WindowState = qfNormal + 20
    win.Height = win.Width + 20
win.Zoom
End Sub

Public Sub SpacingKZ()
With mdl.Shapes
' Задание шака дискретизации
    .RemoveMesh
    Dim i As Double
    Dim sp As Double
    sp = Dct - Dp
    .LabeledAs(Block:="Air").Spacing = sp
    .LabeledAs(Block:="вал").Spacing = 0.008
    .LabeledAs(Block:="A").Spacing = 0.0008
    .LabeledAs(Block:="B").Spacing = 0.0008
    .LabeledAs(Block:="C").Spacing = 0.0008
    .LabeledAs(Block:="X").Spacing = 0.0008
    .LabeledAs(Block:="Y").Spacing = 0.0008
    .LabeledAs(Block:="Z").Spacing = 0.0008
    For i = 1 To Zp
        .LabeledAs(Block:="Паз" & i).Spacing = 0.0006
    Next i
    .LabeledAs(Edge:="Zero").Spacing = 0.01
    ' Generate the mesh
    .BuildMesh
End With
End Sub

Public Sub SetPropertiesKZ()
Dim lab As ELCUT.Label
Dim elem As Variant
Dim spsp1 As Double
Dim Ik As Double
Dim j As Currency
Dim i As Integer
i = Zp

```

```

spsp1 = ThisWorkbook.Names("spsp1").RefersToRange.Value
Ik = ThisWorkbook.Names("Ik").RefersToRange.Value
j = (un1 * nφ * Ik * 2 ^ (1 / 2)) / (spsp1 / 2)
Dim cntBlock As ELCUT.LabelBlockHE
For Each elem In prb.Labels(qfBlock)
    Set lab = elem
    Set cntBlock = lab.Content
Select Case lab.Name
    Case "Air", "вал"
        cntBlock.Kxx = 1
        cntBlock.Kyy = 1

    Case "A"
        cntBlock.Kxx = 1
        cntBlock.Kyy = 1
        cntBlock.TotalCurrent = False
        cntBlock.Loading = j
        cntBlock.LoadingPhase = 0

    Case "B"
        cntBlock.Kxx = 1
        cntBlock.Kyy = 1
        cntBlock.TotalCurrent = False
        cntBlock.Loading = j
        cntBlock.LoadingPhase = 120

    Case "C"
        cntBlock.Kxx = 1
        cntBlock.Kyy = 1
        cntBlock.TotalCurrent = False
        cntBlock.Loading = j
        cntBlock.LoadingPhase = 240

    Case "X"
        cntBlock.Kxx = 1
        cntBlock.Kyy = 1
        cntBlock.TotalCurrent = False
        cntBlock.Loading = -j
        cntBlock.LoadingPhase = 0

    Case "Y"

```

```

cntBlock.Kxx = 1
cntBlock.Kyy = 1
cntBlock.TotalCurrent = False
cntBlock.Loading = -j
cntBlock.LoadingPhase = 120

```

Case "Z"

```

cntBlock.Kxx = 1
cntBlock.Kyy = 1
cntBlock.TotalCurrent = False
cntBlock.Loading = -j
cntBlock.LoadingPhase = 240

```

Case "Па31" To "Па3i"

```

cntBlock.Kxx = 1
cntBlock.Kyy = 1
cntBlock.Conductivity = 23000000

```

Dim spl As ELCUT.Spline

Case "Староп", "Пороп"

```

Set spl = cntBlock.CreateBHCurve
spl.Add ELC.PointXY(Cells(5, 10), Cells(5, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(6, 10), Cells(6, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(7, 10), Cells(7, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(8, 10), Cells(8, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(9, 10), Cells(9, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(10, 10), Cells(10, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(11, 10), Cells(11, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(12, 10), Cells(12, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(13, 10), Cells(13, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(14, 10), Cells(14, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(15, 10), Cells(15, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(16, 10), Cells(16, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(17, 10), Cells(17, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(18, 10), Cells(18, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(19, 10), Cells(19, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(20, 10), Cells(20, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(21, 10), Cells(21, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(22, 10), Cells(22, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(23, 10), Cells(23, 12))

```

```
spl.Add ELC.PointXY(Cells(24, 10), Cells(24, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(25, 10), Cells(25, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(26, 10), Cells(26, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(27, 10), Cells(27, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(28, 10), Cells(28, 12))
spl.Add ELC.PointXY(Cells(29, 10), Cells(29, 12))
cntBlock.PutDCSpline spl, F
End Select
lab.Content = cntBlock
Next
Dim cntEdge As ELCUT.LabelEdgeHE
Set cntEdge = prb.Labels(qfEdge).Item("Zero").Content
cntEdge.Dirichlet = 0
prb.Labels(qfEdge).Item("Zero").Content = cntEdge
End Sub

Private Sub GetResult2()
Dim res As ELCUT.Result
If Not prb.Solved Then
    prb.SolveProblem
End If
prb.AnalyzeResults      ' Загрузка результатов решения
Set res = prb.Result    ' Получение объекта Result
End Sub
```

Приложение 2. Расчет режимов асинхронного двигателя

79

$$\begin{array}{l}
 U_o := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.6289 \\ 0.8019 \\ 0.8717 \\ 0.9169 \\ 0.9510 \\ 0.9774 \\ 0.9986 \\ 1.0161 \\ 1.0314 \end{pmatrix} \\
 X_{mo} := \begin{pmatrix} 15.5908 \\ 15.5908 \\ 9.8961 \\ 7.1358 \\ 5.6027 \\ 4.6270 \\ 3.9445 \\ 3.4384 \\ 3.0473 \\ 2.7368 \end{pmatrix} \\
 I_{1o} := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix} \\
 X_{s1o} := \begin{pmatrix} 0.128069848 \\ 0.128069848 \\ 0.117165193 \\ 0.11082355 \\ 0.105265106 \\ 0.102607583 \end{pmatrix} \\
 I_{2o} := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix} \\
 X_{s2o} := \begin{pmatrix} 0.081797778 \\ 0.081797778 \\ 0.080064199 \\ 0.078901011 \\ 0.077630439 \\ 0.076251059 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

$$Xm1 := \text{pspline}(U_o, X_{mo}) \quad X_m(U1) := \text{interp}(Xm1, U_o, X_{mo}, U1)$$

$$Xs11 := \text{pspline}(I_{1o}, X_{s1o}) \quad X_{s1}(I11) := \text{interp}(Xs11, I_{1o}, X_{s1o}, I11)$$

$$Xs21 := \text{pspline}(I_{2o}, X_{s2o}) \quad X_{s2}(I21) := \text{interp}(Xs21, I_{2o}, X_{s2o}, I21)$$

$$r12 := 0.207 \quad x12 := 3.36 \quad \text{o . e.}$$

$$r_m := \frac{r12^2 + x12^2}{r12} = 54.746 \quad \text{o . e.}$$

$$j := \sqrt{-1}$$

$$R1 := 0.0414 \quad R2 := 0.0282 \quad R_m := r_m = 54.746$$

$$U := 1 \quad s := 0.01, 0.02 \dots 1$$

$$I_1 := 1 \quad I_2 := 0 \quad I_{mr} := 0 \quad I_{mx} := 0$$

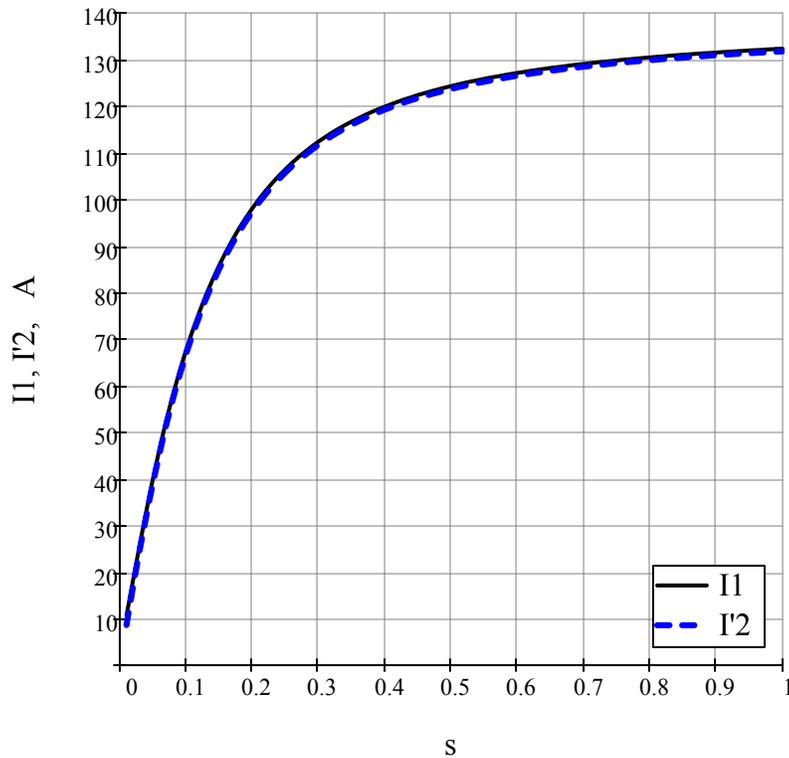
Given

$$I_1 \cdot (R1 + j \cdot X_{s1}(|I_1|)) + I_{mr} \cdot R_m = U \quad I_{mr} \cdot R_m = I_{mx} \cdot j \cdot X_m[|U - I_1 \cdot (R1 + j \cdot X_{s1}(|I_1|))|]$$

$$I_{mr} \cdot R_m = I_2 \cdot \left(\frac{R2}{s} + j \cdot X_{s2}(|I_2|) \right) \quad I_1 = I_2 + I_{mr} + I_{mx}$$

$$A(s) := \text{Find}(I_1, I_2, I_{mr}, I_{mx})$$

$$aI1(s) := |A(s)_0| \quad aI2(s) := |A(s)_1| \quad aI_{mr}(s) := |A(s)_2| \quad aI_{mx}(s) := |A(s)_3|$$



$$U_{\text{H}\phi} := 220 \text{ B} \quad I_{\text{H}} := 25.3 \text{ A} \quad m := 3 \quad p := 2 \quad f_c := 50 \quad R_1 := 0.0414 \quad R_2 := 0.0282$$

$$a_{11}(s) \quad a_{12}(s)$$

$$x_1(s) := X_{s1}(a_{11}(s)) \cdot \frac{U_{\text{H}\phi}}{I_{\text{H}}} \quad x_2(s) := X_{s2}(a_{12}(s)) \cdot \frac{U_{\text{H}\phi}}{I_{\text{H}}}$$

$$I_1(s) := A(s)_0 \cdot I_{\text{H}} \quad I'_2(s) := A(s)_1 \cdot I_{\text{H}} \quad r_1 := R_1 \cdot \frac{U_{\text{H}\phi}}{I_{\text{H}}} = 0.36 \quad r'_2 := R_2 \cdot \frac{U_{\text{H}\phi}}{I_{\text{H}}} = 0.245$$

$$S(s) := U_{\text{H}\phi} \cdot I_1(s) \cdot m$$

$$P_1(s) := \text{Re}(S(s))$$

$$\cos(s) := \frac{\text{Re}(P_1(s))}{|S(s)|}$$

$$E(s) := U_{\text{H}\phi} - I_1(s) \cdot (r_1 + j \cdot x_1(s))$$

$$S_{\text{эм}}(s) := m \cdot E(s) \cdot \overline{I'_2(s)} \quad \text{- электромагнитная мощность}$$

$$P_{\text{ЭМ}}(s) := \operatorname{Re}(S_{\text{ЭМ}}(s))$$

$$M_{\text{ЭМ}}(s) := \frac{P_{\text{ЭМ}}(s) \cdot p}{2 \cdot f_c} \quad - \text{ электромагнитный момент}$$

$$P_{\text{эл1}}(s) := m \cdot (|I_1(s)|)^2 \cdot r_1 \quad P_{\text{ст}} := 0.34 \cdot 10^3 = 340 \quad \text{кВ}$$

$$P_{\text{эл2}}(s) := m \cdot (|I'_2(s)|)^2 \cdot r'_2 \quad P_{\text{мех}} := 0.1 \cdot 10^3 = 100 \quad \text{кВ}$$

$$P_{\text{доб}}(s) := 0.005 \cdot P_1(s) \quad - \text{ добавочные потери} \quad P_2 := 13 \cdot 10^3 = 1.3 \times 10^4 \quad \text{кВ}$$

$$P(s) := P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}(s) + P_{\text{эл1}}(s) + P_{\text{эл2}}(s)$$

$$P_{2H} := P_2 = 1.3 \times 10^4$$

$$P_2(s) := P_1(s) - P(s) \quad - \text{ полезная мощность}$$

$$\eta(s) := 1 - \frac{P(s)}{P_1(s)} \quad - \text{ КПД двигателя}$$

$$s := 0.05$$

Given

$$P_2(s) = P_{2H}$$

$$s_H := \operatorname{Find}(s) = 0.02698 \quad \text{по книге } s_H = 0.0272 \quad \left(1 - \frac{s_H}{0.0272}\right) \cdot 100 = 0.796$$

$$(s_H) = 0.8979 \quad \text{по книге } (s_H) = 0.89$$

$$\cos(s_H) = 0.932 \quad \text{по книге } \cos(s_H) = 0.885 \quad \left(1 - \frac{(s_H)}{0.89}\right) \cdot 100 = -0.892$$

$$|I_1(s_H)| = 23.526 \quad \text{по книге } I_1(s_H) = 25$$

$$|I'_2(s_H)| = 22.35 \quad \text{по книге } I'_2(s_H) = 22.7$$

$$\left[1 - \frac{(\cos(s_H))}{0.885}\right] \cdot 100 = -5.357$$

$$s := 0, 0.0001 .. 0.05$$

$$M_{\text{ЭМ}}(s_H) = 86.697$$

$$\left(1 - \frac{|I_1(s_H)|}{25}\right) \cdot 100 = 5.896$$

$$\left(1 - \frac{|I'_2(s_H)|}{22.7}\right) \cdot 100 = 1.543$$

