

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

кафедра Электрические машины и электродвигатели

«Допущен к защите»
Заведующий кафедрой _____

(Ф.И.О., ученая степень, звание)

« _____ » _____ 20__ г.

(подпись)

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Моделирование электродвигателей с вентильными преобразователями

Выполнил (а) Жужакибетова А.С. _____ ЭАТК-15-7
(Фамилия и инициалы студента) группа

специальность 5В071800 - электроэнергетика

Научный руководитель Мустафин М.А. д.т.н., профессор
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

М _____ « _____ » _____ 20__ г.
(подпись)

Рецензент: _____
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
« _____ » _____ 20__ г.
(подпись)

_____ « _____ » _____ 20__ г.
(подпись)

Консультанты:

по экономической части:

Жакупов А.А. доцент, к.э.н., профессор
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

А _____ « 21 » _____ мая 20__ 19 г.
(подпись)

по безопасности жизнедеятельности:

Санатова Т.С. доцент, к.т.н.
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Т _____ « 28 » _____ мая 20__ 19 г.
(подпись)

_____ « _____ » _____ 20__ г.
(подпись)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Институт Электроэнергетики и электротехники
Специальность 5В071800 - Электроэнергетика
Кафедра Электрические машины и электропривод

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Студент Бужасбетова Айдана Сериковна
(фамилия, имя, отчество)

Тема работы Моделирование электроприводов с векторными преобразователями

утверждена приказом ректора № 124 от «26» 10 2018 г.

Срок сдачи законченной работы «25» мая 2019 г.

Исходные данные, требуемые параметры результатов и исходные данные

Для составления модели силового трансформатора на базе использованы трансформаторы ТМ-250/35/0,4, ТМ-25/10/0,4. Использована разработанная математическая модель системы «ПЧ-АД» кадровой ЭМЭП.

Перечень вопросов, подлежащих разработке в дипломной работе или краткое содержание:

1. Математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя
2. Моделирование силового трансформатора в математическом приложении «Mathcad»
3. Модель АД при питании от ПЧ
4. Ток асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты
5. Безопасность жизнедеятельности
6. Экологическая часть

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Электромеханической многополюсник
2. Работа с комплексными величинами
3. Прямое и обратное преобразование координат
4. Моделирование силового трансформатора в математическом пространстве Matlab.
5. Модель асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты.
6. Преобразование напряжений преобразователя частоты в синусоидные координаты.
7. Векторы напряжений

Рекомендуемая основная литература

1. Жигочев В.И. Теория электропривода. - 3-е изд., - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 404 с.
2. Жаппан М.И. Электрический привод. - М.: Академия, 2014 - 384 с.
3. Мустафин М.А., Мустафин М.Е. Энергоэффективные системы электропривода центробежных насосных агрегатов. - Алматы, 2009. - 248 с.
4. Л.А. Далин. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие. - 2-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 448 с.
5. Жакупов А.А., Валиева Л.И., Иттиев Р.С. Экономическая часть выпускной работы. - Алматы: АУЭС; 2016 - 38 с.

Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Сроки	Подпись
Экономич. часть	Жакупов А.А.	13.03. - 21.05.19	<i>А.А.</i>
Безопасн. осужер-и	Саматова Т. С.	10.02 - 28.05.19	<i>Т.С.</i>
Основная часть	Мустафин М.А.	15.01 - 25.05.19	<i>М.А.</i>

Аннотация

В дипломной работе представлены результаты разработки математической модели асинхронного электропривода по схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с применением компьютерного приложения «Mathcad».

При моделировании использован векторно-гармонический метод исследования электромагнитных и электромеханических процессов в электромеханических преобразователях. Представлена методика расчета токов и момента в электроприводе с учетом несинусоидальности выходного напряжения преобразователя частоты, расчета мгновенных значений токов и момента асинхронного двигателя. Проведен расчет мгновенных значений напряжений преобразователя частоты и токов асинхронного двигателя на базе математического приложения «Mathcad» разработаны компьютерные модели отдельных элементов электропривода: преобразователя фаз и координат, трансформатора, преобразователя частоты и асинхронного электродвигателя.

Аңдатпа

Дипломдық жұмыста асинхронды электржетектің математикалық моделін "жиілік түрлендіргіш – асинхронды қозғалтқыш" схемасы бойынша "Mathcad" компьютерлік қосымшасын қолдану арқылы өңдеу нәтижелері ұсынылған.

Моделдеу кезінде электрмеханикалық түрлендіргіштерде электромагниттік және электромеханикалық процестерді зерттеудің векторлық-гармоникалық әдісі қолданылады. Электржетегі тогы мен моментін есептеу әдістемесі берілген. токтардың және асинхронды қозғалтқыштың сәтін есептеу. "Mathcad" математикалық қосымшасы негізінде асинхронды қозғалтқыш тогы мен жиілік түрлендіргішінің жылдам кернеулерінің есебі жүргізілді, электржетектің жеке элементтерінің компьютерлік модельдері әзірленді: фазалар мен координаталар түрлендіргіші, трансформатор, жиілік түрлендіргіші және асинхронды электр қозғалтқышы.

Annotation

The thesis presents the results of the development of a mathematical model of an asynchronous electric drive according to the “frequency converter - asynchronous motor” scheme using the “Mathcad” computer application.

The simulation used a vector-harmonic method for studying electromagnetic and electromechanical processes in electromechanical transducers. A method for calculating the currents and the moment in the electric drive, taking into account the non-sinusoidality of the output voltage of the frequency converter, is presented. calculating the instantaneous values of currents and torque of the asynchronous motor. The instantaneous values of the voltage of the frequency converter and currents of the induction motor are calculated on the basis of the mathematical application Mathcad; computer models of individual elements of the electric drive are developed: a phase and coordinate converter, a transformer, a frequency converter and an asynchronous electric motor.

Содержание

	Введение	9
1	Математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя	11
1.1	Теоретические основы	11
1.2	Работа с комплексными величинами и векторное отображение электромагнитных процессов в приложении «Mathcad»	15
1.3	Преобразование координат	20
1.3.1	Модель преобразователя координат и фаз в приложении «Mathcad»	22
2	Моделирование силового трансформатора в математическом приложении Mathcad»	25
2.1	Схема замещения силового трансформатора	25
2.2	Определение параметров схемы замещения	26
2.2.1	Опыт холостого хода	26
2.2.2	Опыт короткого замыкания	28
2.3	Модель силового трансформатора	33
3	Модель асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты	36
3.1	Выходное напряжение преобразователя частоты	36
4	Токи асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты	41
4.1	Преобразование напряжения ПЧ в синхронные координаты	41
4.2	Расчет токов асинхронного двигателя при питании от ПЧ	44
5	Безопасность жизнедеятельности	49
5.1	Анализ сети электропривода с вентильным преобразователем с точки зрения безопасности труда	49
5.2	Разработка мер защиты от поражения электрическим током	51
6	Экономическая часть	56
6.1	Технико-экономическое сравнение вариантов систем регулирования электропривода	56
6.2	Расчет капиталовложений и затрат на эксплуатацию	57
6.3	Расчет капиталовложений и затрат на эксплуатацию (система, представленная в дипломной работе)	61
6.4	Расчет экономической эффективности выбранного варианта	63
	Заключение	65
	Список литературы	66

Введение

В настоящее время завершается этап замены машин постоянного тока в системах регулируемых электроприводов более надежными, дешевыми и компактными асинхронными двигателями. Это определено опережающим развитием элементной базы силовых преобразователей, используемых в электроприводе переменного тока, систем управления с применением самых современных технологий.

Электродвигатель с частотным приводом работает от постоянной частоты линии электропитания, которая преобразуется в преобразователь переменной частоты (ПЧ). Благодаря выходу преобразователя частота двигателя изменяется в зависимости от частоты. В настоящее время различные типы преобразователей частоты используются для контроля частоты устройств переменного тока, принципа их работы, конструкции контура, алгоритмов управления и т. д.

Развитие элементной базы и технологии управления, появление новых датчиков, использование микропроцессорного и компьютерного управления определяют непрерывное совершенствование асинхронных электроприводов.

Преимущества системы ПЧ - АД включают:

- Высокая эффективность в широком диапазоне скоростей регулирования, так как окончательная регулировка работает с небольшим скольжением ротора (минимальные потери скольжения);
- хорошие корректирующие свойства, позволяющие плавно регулировать скорость и формировать необходимые регуляторные характеристики и законы;
- Надежность, используемая в системе при коротких замыканиях.

Недостатком является несинусоидальность напряжений и токов в системе ПЧ-АД, вызванная дискретным принципом формирования напряжения ПЧ.

Фактически преобразователи частоты, используемые с несинусоидальным стабилизатором напряжения привода, ухудшают токи, электромагнитный момент, элементы электропривода и их энергетические характеристики. Высокие гармонические составляющие электрических токов вызывают дополнительные потери двигателя и инверторов, что увеличивает гистерезис и вихревые токи стали. При расчете энергетических показателей потребителей электроэнергии, необходимо учитывать потери мощности от искажающих составляющих токов и напряжений.

Кроме отрицательных энергетических последствий, негативное влияние оказывается на механическую часть насосных агрегатов. Полезной, создающей электромагнитный момент АД, является только первая (основная) гармоника тока. Высшие (искажающие) гармоники тока, кроме дополнительных потерь электрической мощности, создают и паразитные и неконтролируемые составляющие в электромеханическом преобразовании энергии. При определенных (резонансных) соотношениях частот и амплитуд гармоник, в АД возникает нежелательная механическая вибрация ротора.

В связи с этим в работе ставится задача расчета мгновенных значений токов и момента асинхронного двигателя и создание модели электропривода, учитывающей несинусоидальность токов и напряжений.

1 Математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя

1.1 Теоретические основы

Электромеханический преобразователь в электродвигателе представляет собой идеальный двигатель без механической инерции ротора, который не влияет на механический удар и является частью механической составляющей двигателя, которая жестко связана с фактическим ротором. Это условие соответствует представлению двигателя в виде электромеханического многополюсника, показанного на рисунке 1.1. [10]

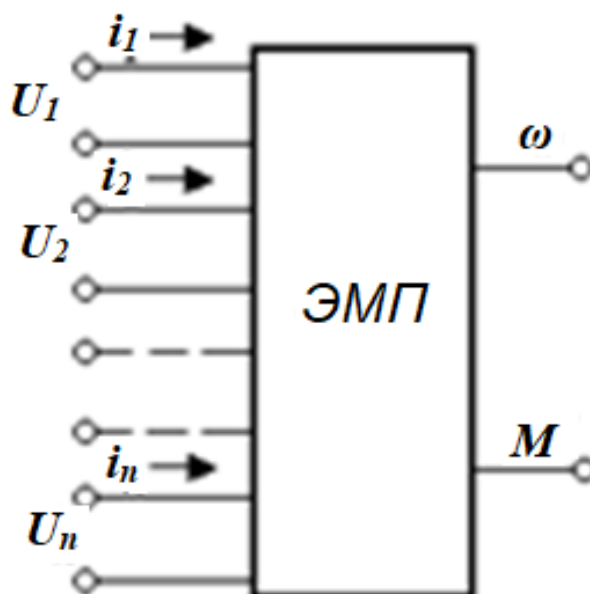


Рисунок 1.1 – Электромеханический многополюсник

Здесь электромеханический преобразователь соответствует электродвигателям, которые начали развивать импульс электродвигателя из-за скорости вращения электромеханической энергии в момент электродвигателя М.

Выводы, подключенные к выводам, соединяют электромеханический преобразователь u_1, u_2, \dots с системой управления приводом. В электромагнитный момент M - выходное значение для ЭДС и механической части привода является входным. Самое быстрое вращение ротора определяется механическими колебаниями условий, но это можно рассматривать как равномерное изменение процесса электромеханического преобразования процесса. Таким образом, механические переменные добавляют к единственной системе взаимодействия с механической частью электромеханического преобразователя ω и M .

Как правило, электродвигатели представляют собой многофазные электрические машины. Эта ситуация усложняет математические характеристики динамических процессов, так как число фаз увеличивается с ростом числа уравнений равновесия, а электромагнитные связи являются

сложными. Вот почему, по возможности, они стараются сократить анализ процессов в многофазной машине для одного и того же анализа процесса по эквивалентной двухфазной модели этой машины.

Согласно теории электродвигателей, любая многофазная электрическая машина с фазной обмоткой статора и n -фазной ротационной обмоткой доказала, что фазы импедансного статора (ротора) могут быть представлены одной и той же двухфазной моделью. Эта замена позволяет обобщенное математическое описание процессов электромеханического преобразования энергии во вращающейся электрической машине на основе двухфазных электромеханических преобразователей. В литературе такого разработчика называют обобщенной электрической машиной.

Обобщенная электрическая машина - это упрощенная модель конкретной машины. В конкретной машине ролики размещаются на пазах статора и ротора, что, в свою очередь, вызывает несинусоидальные обмотки МДС и, с другой стороны, неравномерный воздушный поток. В обобщенных токах концентрированные проводники заменяются слоями синусоидального тока, что эквивалентно первым гармоникам эквивалентных катушек в МДС и является неравномерным из-за пустот. При анализе динамических процессов в обобщенной электрической машине магнитная цепь машины также не насыщена и обладает высокой магнитной проницаемостью.

Возможность приведения многофазного блока в равносторонний двухфазный блок заключается в его симметрии, поэтому суммарное сопротивление ротора неподвижных фаз и ротора обобщенной машины равно. Напряжения передачи могут быть асимметричными, и динамический анализ должен использовать популярный метод симметричных компонентов. Переменный передатчик определяется указанием осей, в зависимости от пакетов общей машины, отражающих стационарную или роторную связь. Жестко связанная система координат фиксируется ротором $-d, q$.

Динамика обобщенной машины - это уравнение электрического равновесия в электрической цепи и уравнение преобразования электромеханической энергии, которое представляет электромагнитный успех как функцию электромеханических координат электромеханической системы.

$$\begin{aligned}
 u_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + d\psi_{1\alpha} / dt \\
 u_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + d\psi_{1\beta} / dt \\
 u_{2d} &= R_2 i_{2d} + d\psi_{2d} / dt \\
 u_{2q} &= R_2 i_{2q} + d\psi_{2q} / dt
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

где R_1 и R_2 – активное сопротивление фазы статора и приведенное активное сопротивление фазы ротора машины.

Уравнение (1.2) однотипны, и их можно записать в обобщенной форме:

$$u_i = R_i i_i + d\psi_i / dt \quad (1.2)$$

где индекс i принимает значения $1\alpha, 1\beta, 2d, 2q$, соответствующие осям, с которыми связаны обмотки. Потокосцепление каждой обмотки в общем виде определяется результирующим действием токов всех обмоток машины:

$$\begin{aligned} \psi_{1\alpha} &= L_{1\alpha,1\alpha} i_{1\alpha} + L_{1\alpha,1\beta} i_{1\beta} + L_{1\alpha,2d} i_{2d} + L_{1\alpha,2q} i_{2q} \\ \psi_{1\beta} &= L_{1\beta,1\alpha} i_{1\alpha} + L_{1\beta,1\beta} i_{1\beta} + L_{1\beta,2d} i_{2d} + L_{1\beta,2q} i_{2q} \\ \psi_{2d} &= L_{2d,1\alpha} i_{1\alpha} + L_{2d,1\beta} i_{1\beta} + L_{2d,2d} i_{2d} + L_{2d,2q} i_{2q} \\ \psi_{2q} &= L_{2q,1\alpha} i_{1\alpha} + L_{2q,1\beta} i_{1\beta} + L_{2q,2d} i_{2d} + L_{2q,2q} i_{2q} \end{aligned} \quad (1.3)$$

В системе уравнений (1.4) для собственных и взаимных индуктивностей обмоток принято одинаковое обозначение L_{ij} с подстрочным индексом.

Принятые в системе (1.1) обозначения и индексы обеспечивают и индексы обеспечивают однотипность всех уравнений, что позволяет прибегнуть к удобной для дальнейшего изложения обобщенной форме записи этой системы:

$$\psi_i = \sum_{j=1\alpha}^{2q} L_{ij} i_j \quad (1.4)$$

Установившееся равновесие и уравнение электромагнитного момента являются математическими характеристиками динамических процессов циркуляции энергии, преобразованными в обычные электронные машины и видимыми фактическими переменными двухфазной модели. Они образуют систему из пяти уравнений, определяющих взаимодействие процессов в механической и электрической частях электромеханической системы. Проявления этих отношений в теории электрической подвижности называются электромеханической связью. Чтобы объяснить смысл этого понятия, мы используем уравнение равновесия. 1 Индукторы L_{ij} зависят от угла поворота ротора при 1 Ph и, следовательно, в момент времени t . Следовательно, после дифференцирования эти уравнения можно выразить в виде

$$u_i = R_i i_i + \sum_{j=1\alpha}^{j=2q} L_{ij} \frac{di_j}{dt} + \omega \sum_{j=1\alpha}^{j=2q} \frac{dL_{ij}}{d\varphi} i_j \quad (1.5)$$

где $\omega = d\varphi/dt$ – угловая скорость ротора машины.

Первый член каждого уравнения означает уменьшение напряжения через активную цепь схемы, а второй является взаимосвязью результирующей индукции электронов и токов обмотки eLi , а третий член указывает на взаимодействие механической и электрической частей электродвигателя, поскольку это ЭДС e_i , в результате движения:

$$e_i = \omega \sum_{j=1}^{j=2q} \frac{dL_{ij}}{d\varphi} i_j \quad (1.6)$$

В зависимости от скорости вращения двигателя (1.6), наличие двигателя будет изменять скорость процесса в механической части машины и изменять ток. Рассматриваемое явление представляет собой электромеханическое соединение в электромеханической системе из-за скорости электрических цепей в зависимости от мощности двигателя. Электромеханические токи являются одной из скоростных функций в электромагнитном моменте.

Электромеханические и механические характеристики - качественные и количественные характеристики электромеханической связи, широко используемые в теории электропривода. Электромеханические характеристики называются характеристиками $i_i = f(\omega)$ или $\omega = f(i_i)$, которые соответствуют статическим или динамическим свойствам. В таких режимах механические свойства, называемые электромагнитным импульсом и скоростью электропривода, аналогичны функциям $M = f(i_i)$ и $i_i = f(M)$.

Система уравнений, которая состоит из электромеханических характеристик и уравнений электромагнитного момента, устанавливает математическую связь между функциями $M(t)$ и $\omega(t)$ во всех режимах, то есть обобщенные математические характеристики механических свойств двигателя. В дальнейшем эти уравнения будут называться уравнениями механических свойств.

Таким образом, система уравнений для механических характеристик двигателя:

$$u_i = R_i i_i + \sum_{j=1}^{j=2q} L_{ij} \frac{di_j}{dt} + \omega \sum_{j=1}^{j=2q} \frac{dL_{ij}}{d\varphi} i_j$$

$$M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{j=2q} i_i \sum_{j=1}^{j=2q} \frac{dL_{ij}}{d\varphi} i_j \quad (1.7)$$

В зависимости от режима работы двигателя совокупность электромеханических и механических характеристик делится на динамические и статические характеристики. Все динамические процессы соответствуют динамическим электромеханическим и механическим характеристикам и статистической статистике.

Электромеханическое соединение объединяет электромеханический преобразователь с механической частью электропривода в единую электромеханическую систему. Фактически из-за отсутствия этого соединения электромагнитный крутящий момент двигателя отвечает за механический процесс и, в свою очередь, влияет на эти процессы. В результате электромеханическая связь определяет важные физические свойства открытых и закрытых электромеханических систем, а характеристики т

еории электропривода являются эффективным средством изучения этих свойств. Необходимые статические и динамические механические свойства электродвигателя, установка силовых агрегатов со следующими требуемыми характеристиками фактически осуществляется.

1.2 Работа с комплексными величинами и векторное отображение электромагнитных процессов в приложении «Mathcad»

Комплексная плоскость, показанная комплексными числами, показана на рисунке 1.2. Комплексное число имеет реальные (реалистичные) и мнимые части. Определенная часть комплексного числа размещается на оси абсцисс комплексной плоскости, а запоминающаяся часть распространяется на ось ординат. Действительные значения оси равны +1, а размеры оси +j ($j=\sqrt{-1}$).

Простейшие функции комплексных чисел, используемые в «Mathcad», приведены на рисунке 1.3. Если z – комплексное число, то:

$|z|$ - определяет модуль комплексного числа z ; функция «абсолютное значение» ($|x|$) находится на инструментальной панели «Калькулятор» - не путать с похожим обозначением матрицы;

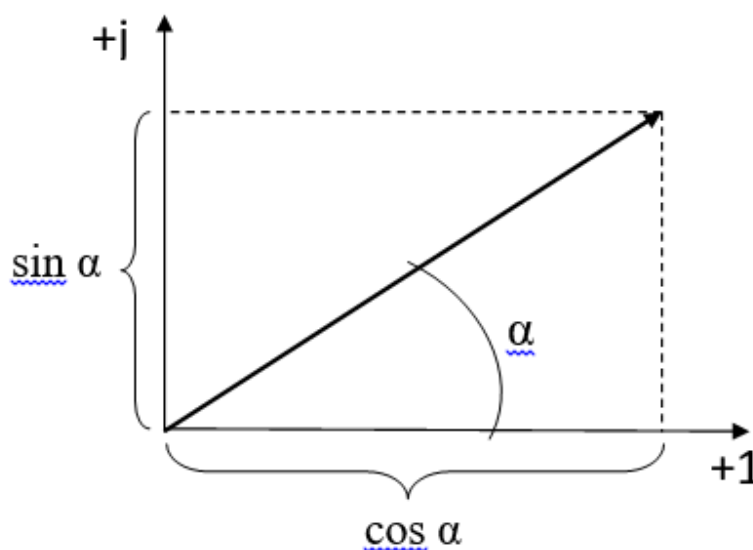


Рисунок 1.2 – Комплексная плоскость

$Re(z)$ – выделяет действительную часть комплексного числа z ;

$Im(z)$ – выделяет мнимую часть комплексного числа z ;

$csgn(z)$ – функция знака комплексного числа;

$csgn(z) = 0$, если $z=0$;

$csgn(z) = 1$, если $Re(z) > 0$ или если $Re(z) = 0$ и $Im(z) > 0$;

$csgn(z) = -1$ в остальных случаях;

$signum(z)$ – равен 1, если $z=0$ и равен $z/|z|$ в противном случае.

$j := \sqrt{-1}$ вводим обозначение мнимой единицы
 $z := 2 + 5 \cdot j$ вводим комплексное число z

Встроенные функции «Mathcad» определяют:

$|z| = 5.385$ модуль z

$\arg(z) = 1.19$ аргумент z

$\operatorname{Re}(z) = 2$ реальная часть z

$\operatorname{Im}(z) = 5$ мнимая часть z

$\operatorname{csgn}(z) = 1$

$\operatorname{signum}(z) = 0.371 + 0.928i$

Рисунок 1.3 – Простейшие функции комплексных чисел

Из курса математики известна формула Эйлера

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha. \quad (1.8)$$

Комплексное число $e^{j\alpha}$ изображают на комплексной плоскости вектором, численно равным единице и составляющим угол α с осью вещественных значений (осью + 1). Угол α отсчитываем против часовой стрелки от оси + 1. Модуль функции

$$|e^{j\alpha}| = \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} = 1. \quad (1.9)$$

Проекция функции $e^{j\alpha}$ на ось + 1 равна $\cos \alpha$, а на ось + j равна $\sin \alpha$. Если вместо функции $e^{j\alpha}$ взять функцию $I_m e^{j\alpha}$, то

$$I_m e^{j\alpha} = I_m \cos \alpha + j I_m \sin \alpha. \quad (1.10)$$

На комплексной плоскости эта функция, так же как и функция $e^{j\alpha}$, изображается под углом α к оси + 1, но длина вектора будет в I_m раз больше.

Угол α может быть любым. Положим, что $\alpha = \omega t + \psi$, т.е. угол α изменяется прямо пропорционально времени.

Тогда

$$I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m \cos(\omega t + \psi) + j I_m \sin(\omega t + \psi). \quad (1.11)$$

Слагаемое $I_m \cos(\omega t + \psi)$ представляет собой действительную часть выражения $I_m e^{j(\omega t + \psi)}$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) = I_m e^{j(\omega t + \psi)} \quad (1.12)$$

Таким образом, синусоидально изменяющийся ток i можно представить как $\text{Im } I_m e^{j(\omega t + \psi)}$ или, что то же самое, как проекцию вращающегося вектора $I_m e^{j(\omega t + \psi)}$ на ось + j.

Комплексная плоскость, на которой можно изобразить комплексные числа, показана на рисунке 1.4.

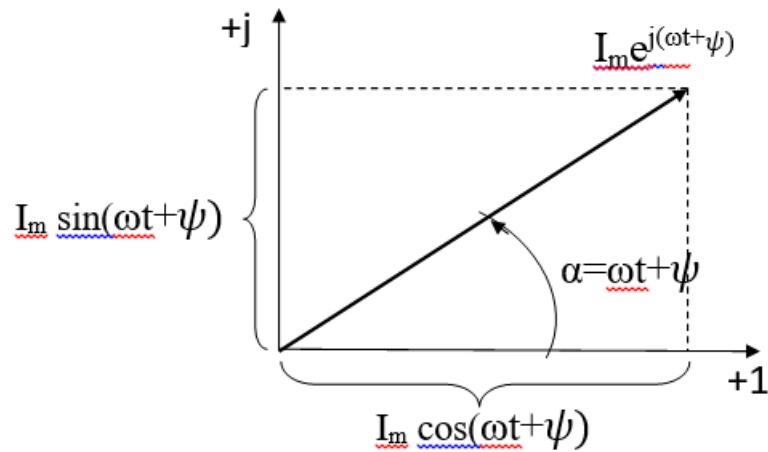


Рисунок 1.4

С целью единообразия принято на комплексной плоскости изображать векторы синусоидально изменяющихся во времени величин для момента времени $\omega t = 0$. При этом вектор

$$I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m e^{j\psi} = I_m \quad (1.13)$$

I_m - комплексная величина, модуль которой равен I_m ; ψ - угол, под которым вектор I_m проведен к оси +1 на комплексной плоскости, равный начальной фазе.

На рисунке 1.5 показано использование еще одной встроенной функции «Mathcad» - complex для реализации формулы Эйлера и графическая интерпретация. На комплексной плоскости функция $I = I_1 \cdot e^{j\omega t}$ представляет собой окружность, которую описывает вектор с абсолютной величиной I_1 , вращающийся с частотой ω . В координатах времени получаем гармонические функции, представляющие реальную $I_1 \cos(\omega t)$ и мнимую $I_1 \sin(\omega t)$ составляющие комплексной функции. [7]

Разработанная японским ученым Сакае Ямамура спирально – векторная теория электрических машин переменного тока позволяет получить математическую модель асинхронной машины, описывающую как установившиеся, так и переходные процессы. Гармонические переменные представляются спиральными векторами, которые являются экспоненциальной функцией времени с комплексным коэффициентом при аргументе

$$i = A \cdot e^{\delta t}, \quad \delta = -\lambda + j \cdot \omega. \quad (1.14)$$

На рисунке 1.5 представлен спиральный вектор на комплексной плоскости и в координатах времени, рассчитанный в приложении «Mathcad».

$e^{j \cdot \alpha}$ complex $\rightarrow \cos(\alpha) + \sin(\alpha) \cdot i$ преобразование Эйлера для единичного вектора

$I \cdot e^{j \cdot \alpha}$ complex $\rightarrow I \cdot \cos(\alpha) + I \cdot \sin(\alpha) \cdot i$ преобразование Эйлера для вектора I

$\underline{I} := 10$ $\underline{\omega} := 314$ задаем значения модуля (амплитуды) и частоты

$$I(t) := \underline{I} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}$$

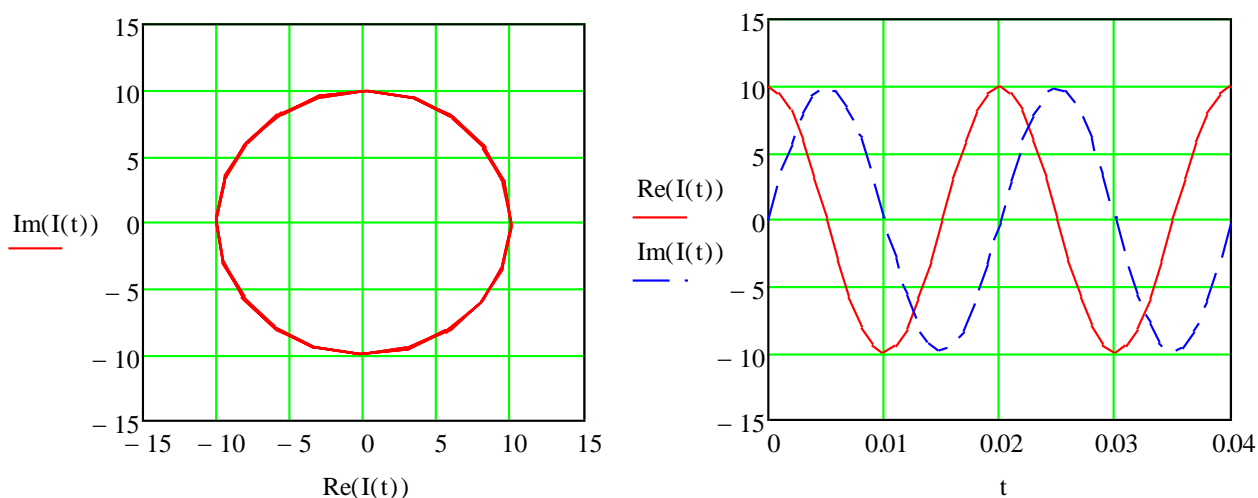


Рисунок 1.5 – Встроенной функции «Mathcad» - complex для реализации формулы Эйлера

В комплексной плоскости эта функция представляет собой циркулирующую спираль, которая соответствует модулю вектора постоянной переменной, в котором $\lambda = 0$ - это процесс демпфирования. Следовательно, этот метод также может отображать константы и переходные процессы в цепочках переменных.

Спиральный вектор вращается против часовой стрелки против часовой стрелки, что определяет частоту в положительном направлении оси координат. Применение этих концепций позволяет классическим методам теоретической электротехники решать уравнения переходных процессов.

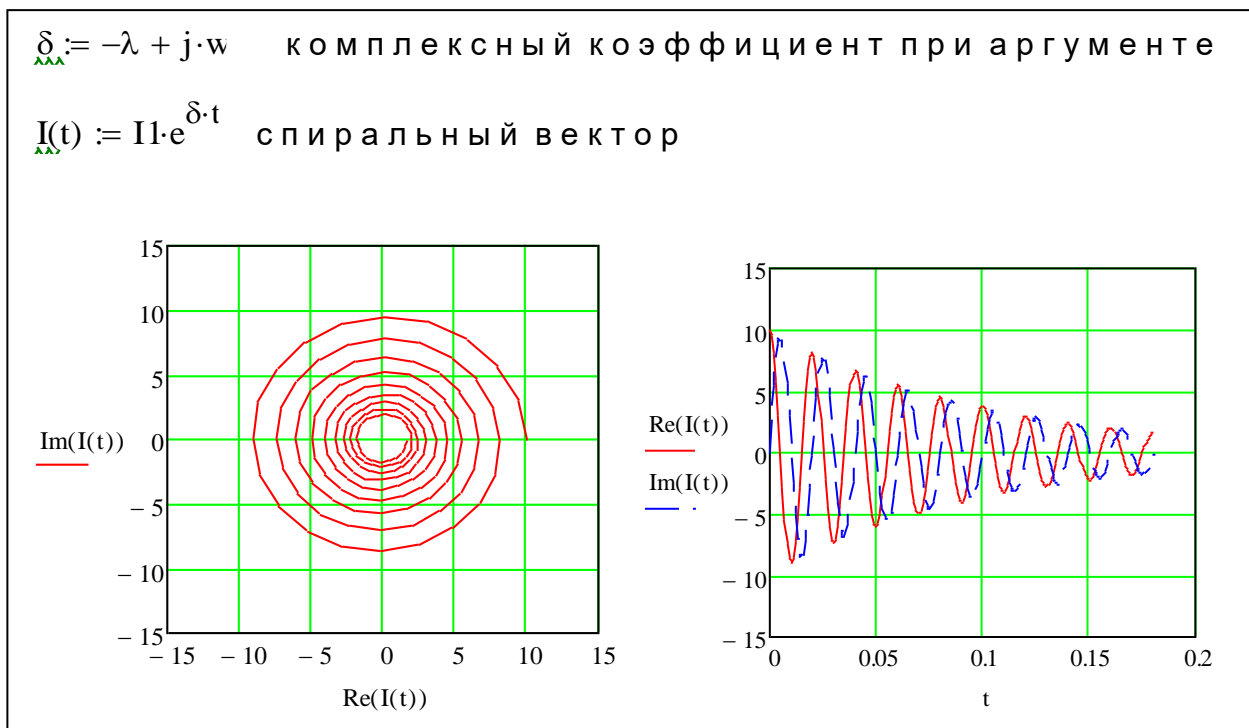


Рисунок 1.6 – Вращение спирального вектора против часовой стрелки на комплексной плоскости

1.3 Преобразование координат

Многие из вопросов, процессов преобразования энергии электромеханических в математическом описании значительное упрощение достигается за счет изменения исходной системы линейных уравнений и переменных конкретного случая в соответствии с математическим описанием физического объекта заменяется новым переменным. Состояние равновесия обычно формируется как инвариантная сила при преобразовании уравнений. Новые предложенные переменные могут быть как истинными, так и сложными, что можно отнести к фактической формуле преобразования переменных, которая обеспечивает неизменность энергии.

Целью преобразования всегда является первым математическим описание динамических тенденций: индуктивности и взаимной индуктивности обмоток для облегчения постепенной ликвидации зависимости от угла поворота ротора, гармонических переменных величин, но их амплитуда и т.д.

Во-первых, статор (а, б) и (д, д) строго определена в системе координат ротора, рассчитанной в соответствии с системой координат переменных физических величин и рассмотрим специфические изменения, которые позволяют переключиться на свободное пространство скорости ωk для формального решения задачи каждый из нас упаковка переменного напряжения, тока, поток потока - это вектор, который строго связан с

соответствующей осью упаковки, а модуль изменяется во времени в соответствии с предлагаемыми переменными.

Рисунок 1,7-1,8 переменные пакетов, которые принадлежат к оси реального значения этой переменной координат соответствующая буква обозначается буквой оси x и α, β , строго связан с относительным положением ротора с осями, а также ортогональной системы координат, свободный относительно фиксированных скоростей статора ω_k .

Для формального решения задачи переменная обмотка, ток, потоки каждой обмотки - в виде векторов, которые строго привязаны к соответствующей оси, а модуль изменяется во времени в соответствии с предлагаемыми переменными.

На рисунках 1,7-1,8 переменные значения, которые принадлежат к оси реального значения этой переменной координат соответствующая буква обозначается буквой оси x и α, β , строго связан с относительным положением ротора с осями, а также ортогональной системы координат, свободный относительно фиксированных скоростей статора ω_k .

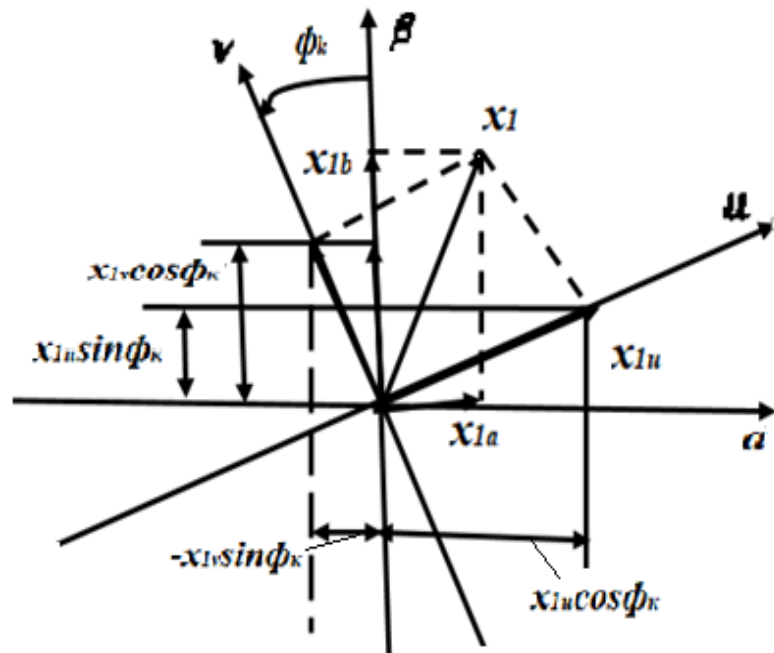


Рисунок 1.7 – Обмоточные переменные обозначены в общем виде

Предполагается, что действительные переменные определяются как сумма проекций действительных переменных на новые оси в соответствующих новых переменных в системе координат u, β (статор) и d, q (оси ротора).

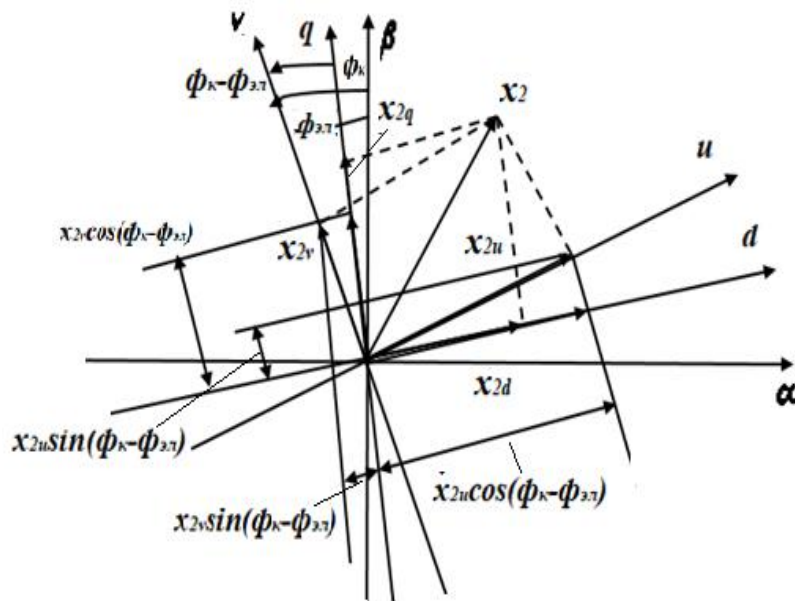


Рисунок 1.8 – Проекций реальных переменных на новые оси

Просуммировав проекции по осям, получим формулы прямого преобразования для статорных переменных в следующем

$$\begin{aligned} x_{1u} &= x_{1\alpha} \cos \varphi_k + x_{1\beta} \sin \varphi_k \\ x_{1v} &= -x_{1\alpha} \sin \varphi_k + x_{1\beta} \cos \varphi_k \end{aligned} \quad (1.15)$$

Следовательно, для роторной переменной формулы преобразования имеют вид

$$\begin{aligned} x_{2u} &= x_{2d} \cos(\varphi_k - \varphi_{эл}) + x_{2q} \sin(\varphi_k - \varphi_{эл}) \\ x_{2v} &= -x_{2d} \sin(\varphi_k - \varphi_{эл}) + x_{2q} \cos(\varphi_k - \varphi_{эл}) \end{aligned} \quad (1.16)$$

1.3.1 Модель преобразователя координат и фаз в приложении «Mathcad»

На рисунках 1.9 и 1.10 представлены программы и расчет систем прямого ($a, b, c \rightarrow \alpha, \beta \rightarrow x, y$) и обратного ($x, y \rightarrow \alpha, \beta \rightarrow a, b, c$) преобразований координат, которые используются при моделировании асинхронного двигателя и преобразователя частоты.

Преобразование координат $a,b,c > \alpha, \beta > x,y$ (Mathcad 15)

Ввод исходных данных

$\omega := 100\pi$ угловая частота напряжения статора, рад/с

$U_p := 380$ действующее значение напряжения статора, В

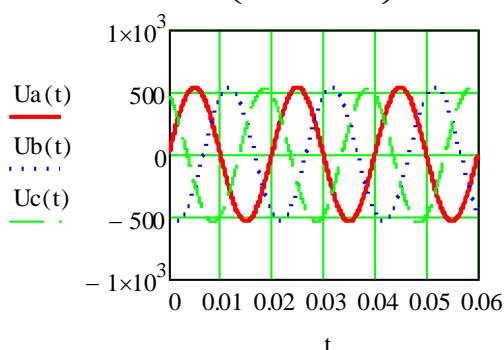
Расчет

Амплитуда напряжения статора:

$$U_m := \sqrt{2} \cdot U_p \quad U_m = 537.401$$

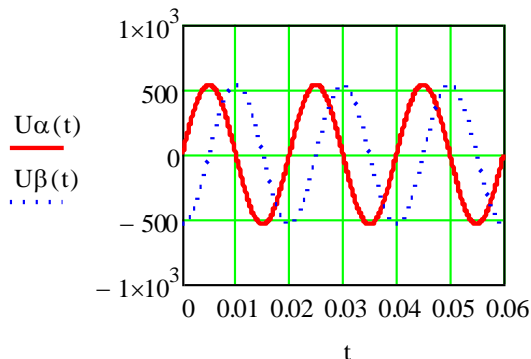
Трехфазная система напряжений

$$U_a(t) := U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad U_b(t) := U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \quad U_c(t) := U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$



Напряжение статора в осях α, β :

$$U_\alpha(t) := \frac{2}{3} \left[U_a(t) - \frac{(U_b(t) + U_c(t))}{2} \right] \quad U_\beta(t) := \frac{(U_b(t) - U_c(t))}{\sqrt{3}}$$



Формулы преобразования напряжения статора в координаты x, y

$$U_x(t) := U_\alpha(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) + U_\beta(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad U_y(t) := U_\beta(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) - U_\alpha(t) \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

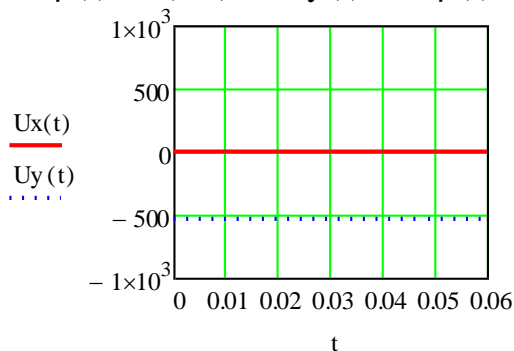


Рисунок 1.9 – Расчет систем прямого преобразования координат

Обратное преобразование координат $x, y \rightarrow \alpha, \beta$ (Mathcad 15)

Ввод исходных данных

$\omega_1 := 100\pi$ угловая частота напряжения статора, рад/с

$U_{p1} := 380$ действующее значение напряжения статора, В

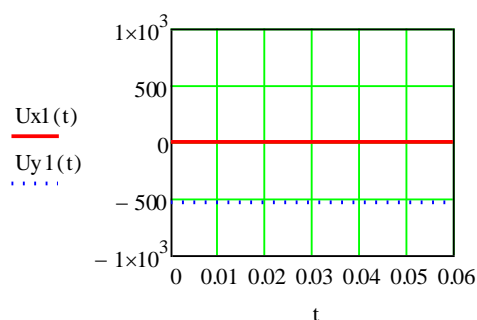
Расчет

Амплитуда напряжения статора:

$$U_{m1} := \sqrt{2} \cdot U_{p1} \quad U_{m1} = 537.401$$

Напряжение статора в осях x, y :

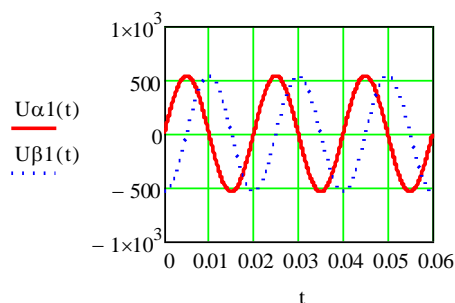
$$U_{x1}(t) := 0 \quad U_{y1}(t) := -U_{m1}$$



Напряжение статора в осях α, β :

$$U_{\alpha 1}(t) := U_{x1}(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) - U_{y1}(t) \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$U_{\beta 1}(t) := U_{y1}(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) + U_{x1}(t) \cdot \sin(\omega \cdot t)$$



Трехфазная система напряжений

$$U_{a1}(t) := U_{\alpha 1}(t) \quad U_{b1}(t) := \frac{-1}{2} U_{\alpha 1}(t) + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\beta 1}(t) \quad U_{c1}(t) := \frac{-1}{2} U_{\alpha 1}(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\beta 1}(t)$$

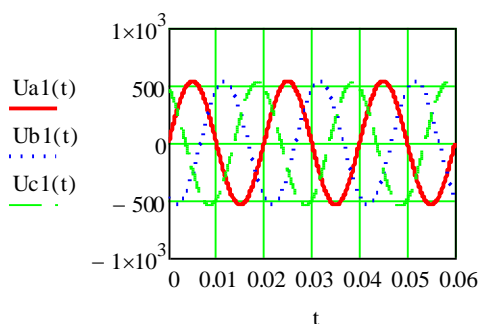


Рисунок 1.10 – Расчет систем обратного преобразования координат

2 Моделирование силового трансформатора в математическом приложении Mathcad»

2.1 Схема замещения силового трансформатора

Составление схемы замещения. Систему уравнений, описывающую электромагнитные процессы в трансформаторе, можно свести к одному уравнению, если учесть, что $E_1 = nE_2$, и положить

$$\dot{E} = \dot{I}_{10} Z_0 = \dot{I}_{10} (R_0 + jX_0) \quad (2.1)$$

При этом параметры R_0 и X_0 следует выбирать так, чтобы в режиме холостого хода, когда ЭДС E_1 практически равна номинальному напряжению U_1 , ток

$$\begin{aligned} I_{10} E_1 \cos \varphi_{10} &= I_{10}^2 R_0 \\ \dot{I}_{10} &= \frac{\dot{E}_1}{R_0 + jX_0} = \frac{\dot{E}_1}{Z_0} \end{aligned} \quad (2.2)$$

по модулю равнялся бы действующему значению тока холостого хода, а мощность— мощности, забираемой трансформатором из сети при холостом ходе.

Решим систему уравнений относительно первичного тока

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_0(n^2 Z_H + n^2 Z_2) / [Z_0 + (n^2 Z_H + n^2 Z_2)]} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{\text{экв.}}} \quad (2.3)$$

Трансформатор можно заменить электрической схемой, по которой можно определить токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , мощность P_1 , забираемую из сети, мощность ΔP потерь и т.д. Такую электрическую схему называют схемой замещения трансформатора (рисунок 2.1).

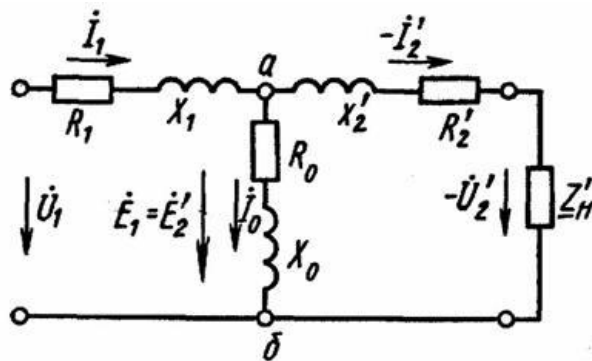


Рисунок 2.1— Схема замещения трансформатора

Эквивалентное сопротивление этой схемы

$$Z_{\text{экв}} = Z_1 + [Z_0(Z'_n + Z'_2)] / [Z_0 + (Z'_n + Z'_2)] \quad (2.4)$$

где $Z_1 = R_1 + jX_1$;
 $Z_0 = R_0 + jX_0$;
 $Z'_2 = n^2 Z_2 = n^2 (R_2 + jX_2)$;
 $Z'_n = n^2 Z_n$.

Чередующаяся цепь трансформатора - комбинация двух чередующихся цепей - соединенных между собой первичной и вторичной обмоток в точках а и в. Начальная цепь намотки содержит помехи R_1 и X_1 , а вторая цепь намотки содержит барьеры R'_2 и X'_2 . Часть переменного тока между током а и в указывает ток I_{10} , называемый цепью намагничивания. Напряжение U_1 подается на входную цепь переменного тока, а переменный импеданс нагрузки Z подключается к выходному напряжению U_2 .

Сопротивления Z'_2 (и его составляющие $R'_2 = R_2 n^2$ и $X'_2 = X_2 n^2$), а также Z'_n называют соответственно сопротивлениями вторичной обмотки и нагрузки, приведенными к первичной обмотке. Аналогично приведенными называют значения ЭДС и тока: $E'_2 = nE_2$; $I'_2 = I_2/n$.

Полная мощность приведенного контура вторичной обмотки в схеме замещения равна мощности вторичной обмотки реального трансформатора: $I'_2 E'_2 = (I_2/n) E_2 n = E_2 I_2$, а мощность электрических потерь в приведенном вторичном контуре этой схемы равна мощности потерь во вторичной обмотке реального трансформатора: $I'_2 R'_2 = (I_2/n)^2 R_2 n^2 = I_2 R_2$.

Относительные падения напряжений в активном и индуктивном сопротивлениях приведенного вторичного контура также остаются неизменными, как и в реальном трансформаторе:

$$\begin{aligned} I'_2 R'_2 / E'_2 &= (I_2/n) n^2 R_2 / (nE_2) = I_2 R_2 / E_2; \\ I'_2 X'_2 / E'_2 &= (I_2/n) n^2 X_2 / (nE_2) = I_2 X_2 / E_2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.2 Определение параметров схемы замещения

Параметры схемы замещения для любого трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода (рисунок 2.2) и короткого замыкания (рисунок 2.3).

2.2.1 Опыт холостого хода

В опыте холостого хода (рисунок 2.2) вторичная обмотка трансформатора разомкнута, а к первичной подводится номинальное напряжение $U_{1н} = U_{10}$.

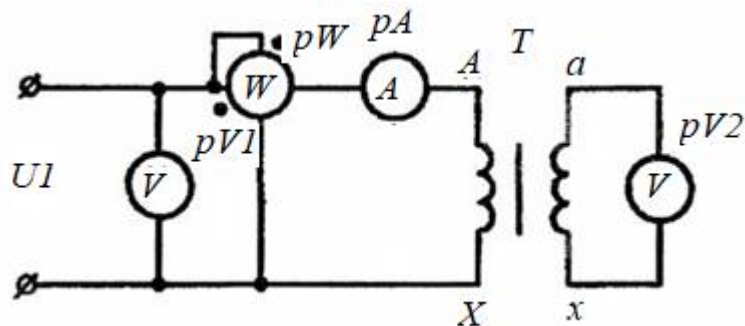


Рисунок 2.2 – Опыт холостого хода

Схема замещения трансформатора (рисунок 2.1) для режима холостого хода ($I_2=0$) примет вид (рисунок 2.3).

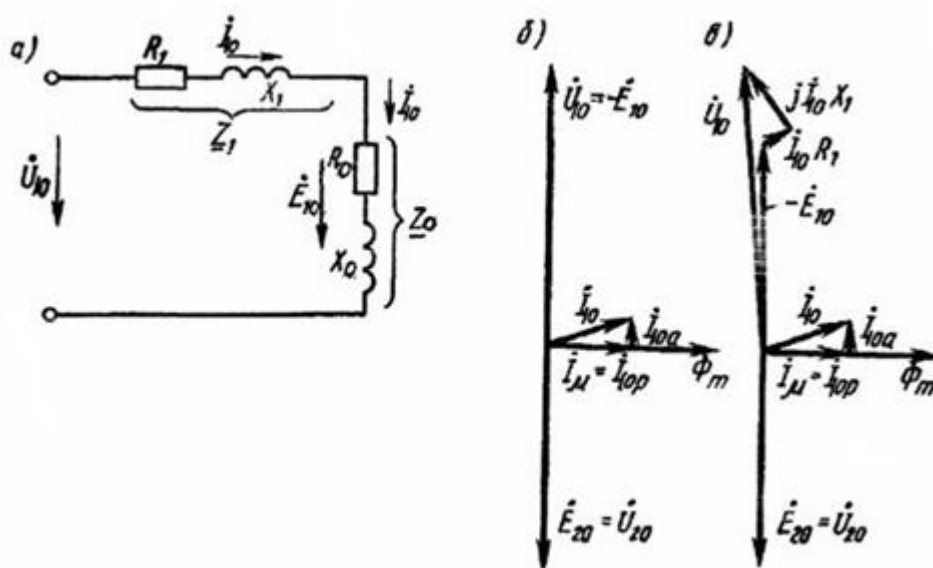


Рисунок 2.3 – Схема замещения трансформатора для режима холостого хода

Измерив ток холостого хода I_{10} и мощность P_{10} , потребляемую трансформатором, согласно схеме замещения (рисунок 2.3, а) находим

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{вх}x} &= U_{10} / I_{10}; \\
 R_1 + R_0 &= P_{10} / I_{10}^2; \\
 X_1 + X_0 &= \sqrt{Z_{\text{вх}x}^2 - (R_1 + R_0)^2},
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

где: $Z_{\text{вх}x}$ – входное сопротивление трансформатора при опыте холостого хода.

Так как ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током трансформатора, электрическими потерями $\Delta P_{\text{эл1}} = I_{10}^2 R_1$ пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором, расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали магнитопровода. При этом

$$P_{10} = I_{10}^2(R_1 + R_0) \approx I_{10}^2 R_0, \quad (2.7)$$

откуда $R_0 = P_{10} / I_{10}^2$.

Аналогично считают, что $X_1 + X_0 \approx X_0$, так как сопротивление X_0 определяется основным потоком трансформатора Φ (потоком взаимоиндукции), а X_1 – потоком рассеяния $\Phi_{\Delta 1}$, который во много раз меньше Φ . Поэтому с большой степенью точности полагают, что

$$\begin{aligned} Z_0 &= U_{10} / I_{10}; \\ X_0 &= \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Измерив напряжения U_{10} и U_{20} первичной и вторичной обмоток, определяют коэффициент трансформации

$$n = \frac{U_{10}}{U_{20}}. \quad (2.9)$$

Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода, построенная исходя из указанных выше допущений, изображена на рисунке 2.3, б. В действительности ток \dot{I}_{10} создает в первичной обмотке падения напряжения $\dot{I}_{10} R_1$ и $j \dot{I}_{10} X_1$, поэтому $U_{10} = -E_{10} + I_{10}R_1 + jI_{10}X_1$.

Соответствующая векторная диаграмма показана на рисунке 2.3, в.

2.2.2 Опыт короткого замыкания

Второй вал зафиксирован с коэффициентом $Z_n = 0$, а второй импульс равен или равен току через номинальный ток. В трансформаторах U значение U_k падает с 5 до 15% от номинального значения. В трансформаторах малой мощности напряжение U_k может достигать 25-50% от $U_{ном}$.

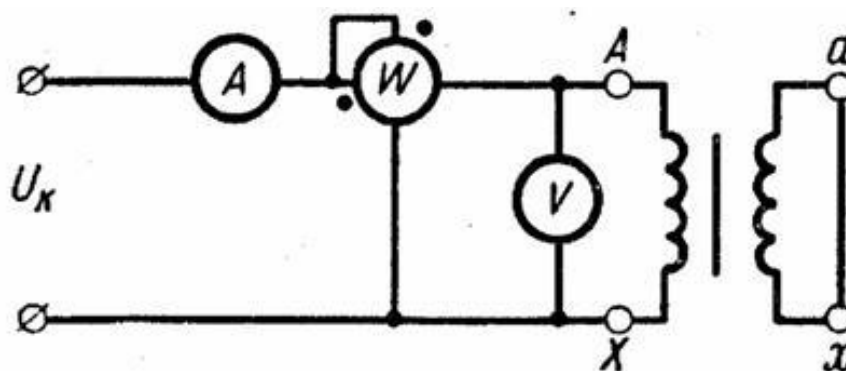


Рисунок 2.4 – Опыт короткого замыкания

В зависимости от напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора, протекающего вдоль магнитного магнитопровода, и магнитные потери пропорциональны квадрату индукции, то есть магнитному потоку стали и току нагрузки, с учетом величины магнитного потока в квадрате. В этом случае сопротивления R_0 и X_0 выводятся из общей схемы

эквивалентности трансформатора и преобразуют ее в схему, показанную в 2.3, а). Параметры этого графика определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} Z_k &= U_k / I_{ном}; \\ R_k &= R_1 + R_2' = P_k / I_{ном}^2; \\ X_k &= X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

Ниже приведен расчет параметров схемы замещения силовых трансформаторов ТМ – 250/35 и ТМ – 25/10/0,4. Исходные данные приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1– Параметры трансформатора

Наименование	Обозначение	Единица измерения	ТМ – 250/35/0,4	ТМ – 25/10/0,4
Номинальная мощность	S _н	МВА	0,25	0,025
Номинальное напряжение ВН	U _н	кВ	35	10
НН			0,4	0,4
Напряжение короткого замыкания	U _к	%	6,5	4,5
Потери короткого замыкания	ΔP _к	Вт	3700	600
Потери холостого хода	ΔP _х	Вт	1000	130
Ток холостого хода	I _х	%	2,3	3,2
Активное сопротивление	R _Г	Ом	72	0,154
Индуктивное сопротивление	X _Г	Ом	318	0,244

1. Расчет параметров схемы замещения трансформатора ТМ – 250/35/0,4
Напряжение короткого замыкания:

$$U_{1к} = \frac{U_k}{100} \cdot U_{ном} = 0,065 \cdot 35000 = 2275 \text{ В.} \quad (2.10)$$

Ток короткого замыкания:

$$I_{1к} = I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 35000} = 4,1 \text{ А.} \quad (2.11)$$

Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot I_{1к}} = \frac{3700}{\sqrt{3} \cdot 2275 \cdot 4,1} = 0,229. \quad (2.12)$$

Полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{\sqrt{3} \cdot I_{1k}} = \frac{2275}{\sqrt{3} \cdot 4,1} = 320 \text{ Ом.} \quad (2.13)$$

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания:

$$r_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k = 320 \cdot 0,229 = 73 \text{ Ом.} \quad (2.14)$$

Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания:

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{320^2 - 73^2} = 312 \text{ Ом.} \quad (2.15)$$

Активные и индуктивные сопротивления Т – образной схемы замещения трансформатора:

$$\begin{aligned} r_k = r'_2 &= \frac{73}{2} = 36,5 \text{ Ом;} \\ x_1 = x'_2 &= \frac{312}{2} = 156 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Фактические (неприведенные) значения сопротивлений вторичной обмотки трансформатора:

$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{r'_2}{k_{mp}^2} = \frac{36,5}{(35000 / 400)^2} = 0,005 \text{ Ом;} \\ x_2 &= \frac{x'_2}{k_{mp}^2} = \frac{156}{(35000 / 400)^2} = 0,02 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Ток холостого хода:

$$I_{0ном} = \frac{i_0}{100} \cdot I_{1ном} = 0,023 \cdot 4,1 = 0,0943 \text{ А.} \quad (2.18)$$

Коэффициент мощности в режиме холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{0ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{0ном} \cdot U_{1ном}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 0,0943 \cdot 35000} = 0,175. \quad (2.19)$$

Полное сопротивление ветви намагничивания Т – образной схемы замещения трансформатора:

$$Z_0 = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{0ном}} = \frac{35000}{\sqrt{3} \cdot 0,0943} = 214287 \text{ Ом.} \quad (2.20)$$

Активная и индуктивная составляющие ветви намагничивания:

$$\begin{aligned}
 r_0 &= Z_0 \cdot \cos \varphi_0 = 214287 \cdot 0,175 = 37500 \text{ Ом}; \\
 x_0 &= \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{214287^2 - 37500^2} = 210980 \text{ Ом}.
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

2. Расчет параметров схемы замещения трансформатора ТМ– 25/10/0,4
 Напряжение короткого замыкания по формуле (2.10):

$$U_{1k} = \frac{U_k}{100} \cdot U_{1ном} = 0,045 \cdot 10000 = 450 \text{ В.}$$

Ток короткого замыкания по формуле (2.11):

$$I_{1k} = I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 1,44 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания по формуле (2.12):

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном} \cdot I_{1к}} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 1,44} = 0,035.$$

Полное сопротивление короткого замыкания по формуле (2.13):

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{\sqrt{3} \cdot I_{1k}} = \frac{450}{\sqrt{3} \cdot 1,44} = 180,64 \text{ Ом.}$$

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания по формуле (2.14):

$$r_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k = 180,64 \cdot 0,035 = 6,32 \text{ Ом.}$$

Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания по формуле (2.15):

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{180,64^2 - 6,32^2} = 180,52 \text{ Ом.}$$

Активные и индуктивные сопротивления Т – образной схемы замещения трансформатора по формуле (2.16):

$$\begin{aligned}
 r_k &= r'_2 = \frac{6,32}{2} = 3,16 \text{ Ом}; \\
 x_1 &= x'_2 = \frac{180,52}{2} = 90,26 \text{ Ом.}
 \end{aligned}$$

Фактические (неприведенные) значения сопротивлений вторичной обмотки трансформатора по формуле (2.17):

$$r_2 = \frac{r_2'}{k_{mp}^2} = \frac{3,16}{(10000 / 400)^2} = 0,005 \text{ Ом};$$
$$x_2 = \frac{x_2'}{k_{mp}^2} = \frac{90,26}{(10000 / 400)^2} = 0,144 \text{ Ом}.$$

Ток холостого хода по формуле (2.18):

$$I_{0ном} = \frac{i_0}{100} \cdot I_{1ном} = 0,032 \cdot 1,44 = 0,046 \text{ А}.$$

Коэффициент мощности в режиме холостого хода по формуле (2.19):

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{0ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{0ном} \cdot U_{1ном}} = \frac{130}{\sqrt{3} \cdot 0,046 \cdot 10000} = 0,163.$$

Полное сопротивление ветви намагничивания Т – образной схемы замещения трансформатора по формуле (2.20):

$$Z_0 = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{0ном}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 0,046} = 125659 \text{ Ом}.$$

Активная и индуктивная составляющие ветви намагничивания по формуле (2.21):

$$r_0 = Z_0 \cdot \cos \varphi_0 = 125659 \cdot 0,163 = 20482 \text{ Ом};$$
$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{125659^2 - 20482^2} = 123978 \text{ Ом}.$$

2.3 Модель силового трансформатора

Расчет режима короткого замыкания модифицированным методом Эйлера

Ввод исходных данных

$$r1 := 36.4$$

активное сопротивление первичной обмотки

$$x1 := 156$$

индуктивное сопротивление первичной обмотки

$$r0 := 37500$$

активное сопротивление ветви намагничивания

$$x0 := 210980$$

индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$$r2 := 36.4$$

активное сопротивление первичной обмотки

$$x2 := 156$$

индуктивное сопротивление первичной обмотки

$$u := 35000$$

номинальное напряжение первичной обмотки

$$uk := 227.4$$

напряжение короткого замыкания

Решение

$$R := r1 + r2$$

$$R = 73$$

активное сопротивление КЗ

$$I1 := \frac{x1}{314}$$

$$I1 = 0.497$$

индуктивность первичной обмотки

$$I2 := \frac{x2}{314}$$

$$I2 = 0.497$$

индуктивность первичной обмотки

$$I0 := \frac{x0}{314}$$

$$I0 = 671.911$$

индуктивность ветви намагничивания

$$L := I1 + I2$$

$$L = 0.994$$

индуктивность цепи КЗ

$$h := 0.001$$

$$N := 500$$

шаг и количество точек решения

$$\frac{d}{dt} i - \frac{1}{L} \cdot (uk - R \cdot i)$$

решаемое уравнение

$$f(t, i) := \frac{1}{L} \cdot (uk - R \cdot i)$$

функция в нормированном виде

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ i_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.5 – Расчет режима короткого замыкания

вектор начальных условий

$n := 1..N$

цикл вычислений рекуррентные формулы модифицированного метода Эйлера в векторной форме

$$\begin{pmatrix} t_n \\ i_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} t_{n-1} + h \\ i_{n-1} + h \cdot f\left(t_{n-1} + \frac{h}{2}, i_{n-1} + h \cdot \frac{f(t_{n-1}, i_{n-1})}{2}\right) \end{pmatrix}$$

Вывод результатов в табличном и графическом виде

$t^T =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$...

$i^T =$	0	1	2	3	4	5	6	7	
	0	0	2.205	4.255	6.159	7.929	9.573	11.101	...

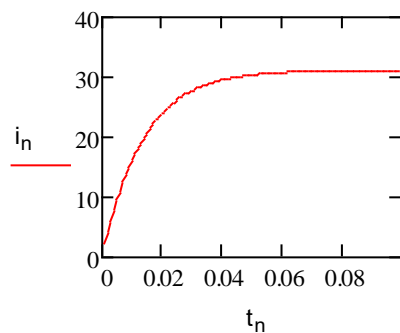


Рисунок 2.6 – Расчет режима короткого замыкания (продолжение)

Расчет режима холостого хода модифицированным методом Эйлера

Ввод исходных данных

$r1 := 36.5$

активное сопротивление первичной обмотки

$x1 := 156$

индуктивное сопротивление первичной обмотки

$r0 := 37500$

активное сопротивление ветви намагничивания

$x0 := 210980$

индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$u := 3500$

номинальное напряжение первичной обмотки

Решение

$R := r1 + r0$

$R = 3.754 \times 10^4$

активное сопротивление ХХ

$l1 := \frac{x1}{314}$

$l1 = 0.497$

Рисунок 2.7 – Расчет режима холостого хода

$$l1 := \frac{x1}{314}$$

$$l1 = 0.497$$

индуктивность первичной обмотки

$$l0 := \frac{x0}{314}$$

$$l0 = 671.911$$

индуктивность ветви намагничивания

$$L := l1 + l0$$

$$L = 672.408$$

индуктивность цепи ХХ

$$h := 0.001$$

$$N := 500$$

шаг и количество точек решения

$$\frac{d}{dt} i - \frac{1}{L} \cdot (u - R \cdot i)$$

решаемое уравнение

$$f(t, i) := \frac{1}{L} \cdot (u - R \cdot i)$$

функция в нормированном виде

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ i_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

вектор начальных условий

$$n := 1..N$$

цикл вычислений

рекуррентные формулы модифицированного метода Эйлера в векторной форме

$$\begin{pmatrix} t_n \\ i_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} t_{n-1} + h \\ i_{n-1} + h \cdot f\left(t_{n-1} + \frac{h}{2}, i_{n-1} + h \cdot \frac{f(t_{n-1}, i_{n-1})}{2}\right) \end{pmatrix}$$

Вывод результатов в табличном и графическом виде

$t^T =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$...

$i^T =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	0.051	0.098	0.144	0.187	0.227	0.265	0.301	0.336	...

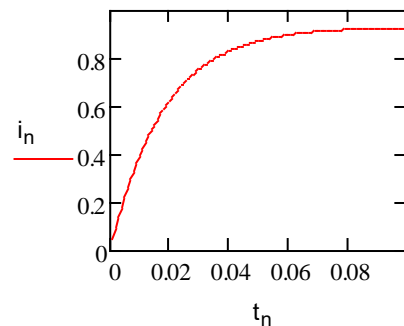


Рисунок 2.8 – Расчет режима холостого хода (продолжение)

3 Модель асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты

3.1 Выходное напряжение преобразователя частоты

В настоящее время для контроля частоты устройств переменного тока, принципа их работы, конструкции контура, алгоритмов управления и т. д. используются разные передатчики частоты.

Широко применяются при частотном управлении ПЧ с управляемым выпрямителем и автономными инверторами напряжения или тока (ПЧ с АИ – рисунок 3.1), которые и будут рассмотрены в данной работе.

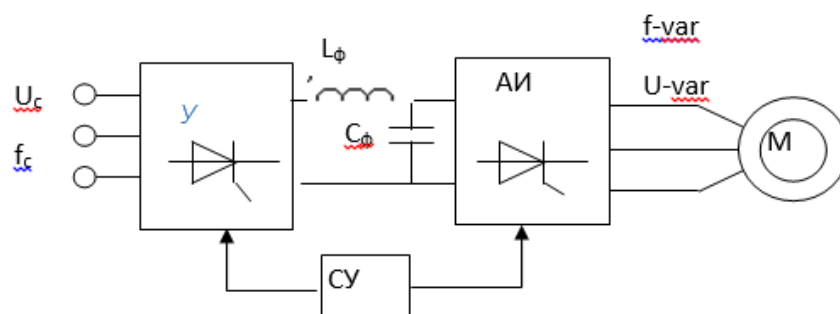


Рисунок 3.1– ПЧ с управляемым выпрямителем и автономными инверторами напряжения

Передатчик имеет достаточно хорошие схемы схемотехнических решений, которые используются с АИ4 - обычно это трехфазная классическая мостовая схема. Схемы многофазной коррекции используются для снижения высокого напряжения цепи питания и отрегулированного напряжения. Поскольку значительное увеличение пульсаций преобразователей (18, 24 импульсных схем) связано с увеличением их стоимости и структурными трудностями, они обычно ограничены двенадцатью импульсными цепями или параллельными соединениями двух 6-импульсных цепей.

Рассмотрим принцип действия АИ без учета электромагнитных коммутационных процессов, считая тиристоры идеальными ключами (рисунок 3.2). Для построения алгоритма учитывается, что сдвиг фаз между напряжениями U_a, U_b, U_c составляет $2\pi/3$.

Последовательность коммутации соответствующих тиристоров $V1-V6$ следующая. На первом интервале ($0-2\pi/3$) открыты ключи $V1$ анодной группы и (поочередно) $V6$ и $V2$ катодной группы. Ток протекает по цепи «+»→ $V1$ →фаза «а» (начало) → «0» статора→фаза «b» (фаза «с») → $V6(V2)$ →«-». К фазе «а» статора будет приложено напряжение $U_{II}/2$.

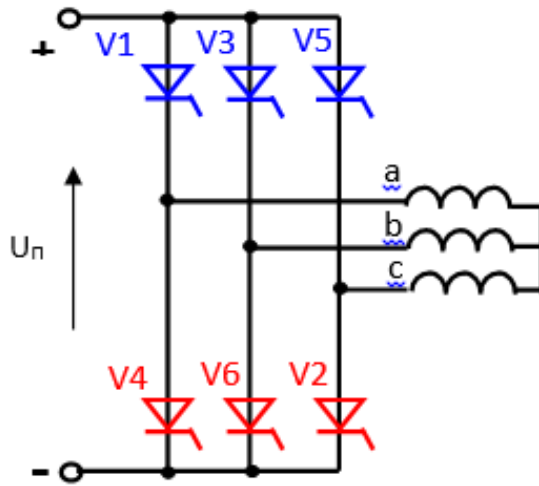


Рисунок 3.2 – АИ без учета электромагнитных коммутационных процессов

В промежуточной ($2\pi / 3 - \pi$) анодной группе V3 и катодной группе V2 открыты. Ток тока проходит через «+» → V3 → фаза «b» (пуск) → статор «0» → фаза «с» → V2 → «-». Напряжение не распространяется на фазу статора «a». В интервале ($\pi - 5\pi / 3$) аналоговая группа V3, V5 (поочередно) и кодированная группа V4 открыты. Ток проходит через токовую цепь «+» → V3 (V5), фаза «b» (фаза «с») → статор «0» → фаза → a → V4 → «-». Напряжение « $U_n / 2$ » подается на фазу «a» статора.

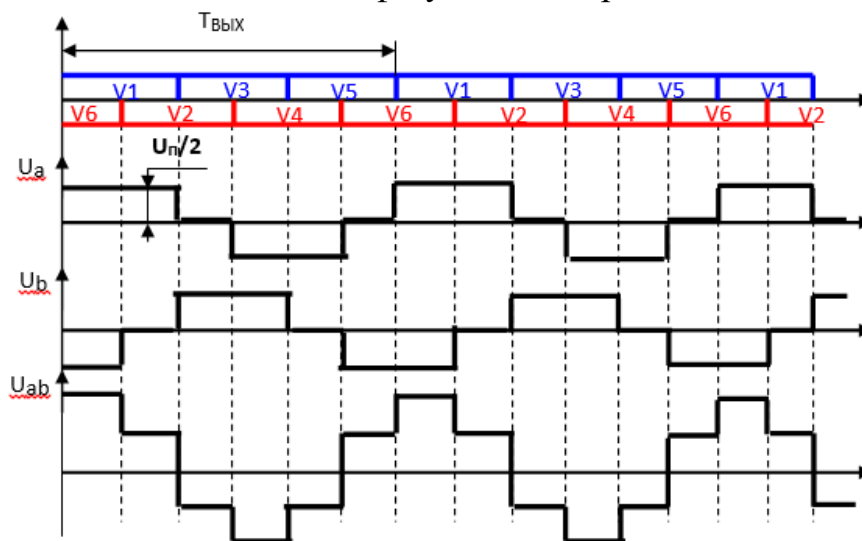


Рисунок 3.3 – График последовательности коммутации соответствующих тиристоров V1-V6

Линейное напряжение $U_{ab} = U_a - U_b$. Тип полученного напряжения (рисунок 3.3) указывает на то, что напряжение напряжения значительно отличается от синусоиды. Подобная структура других фаз указывает, что трехфазная система прямоугольных или пошаговых напряжений формируется и перемещается друг к другу на 120 эл. градусов.

Известно, что любую периодическую несинусоидальную кривую можно представить в виде суммы гармонических составляющих, то есть разложить в ряд Фурье. Поскольку выходное напряжение преобразователей частоты соответствует этим определениям, его также можно разложить в ряд Фурье. На рисунке 3.4 приведен пример такой операции для ступенчатой периодической функции, выполненный в системе «Mathcad». Для наглядности на рисунке показаны кривые первой, пятой и седьмой гармонических составляющих

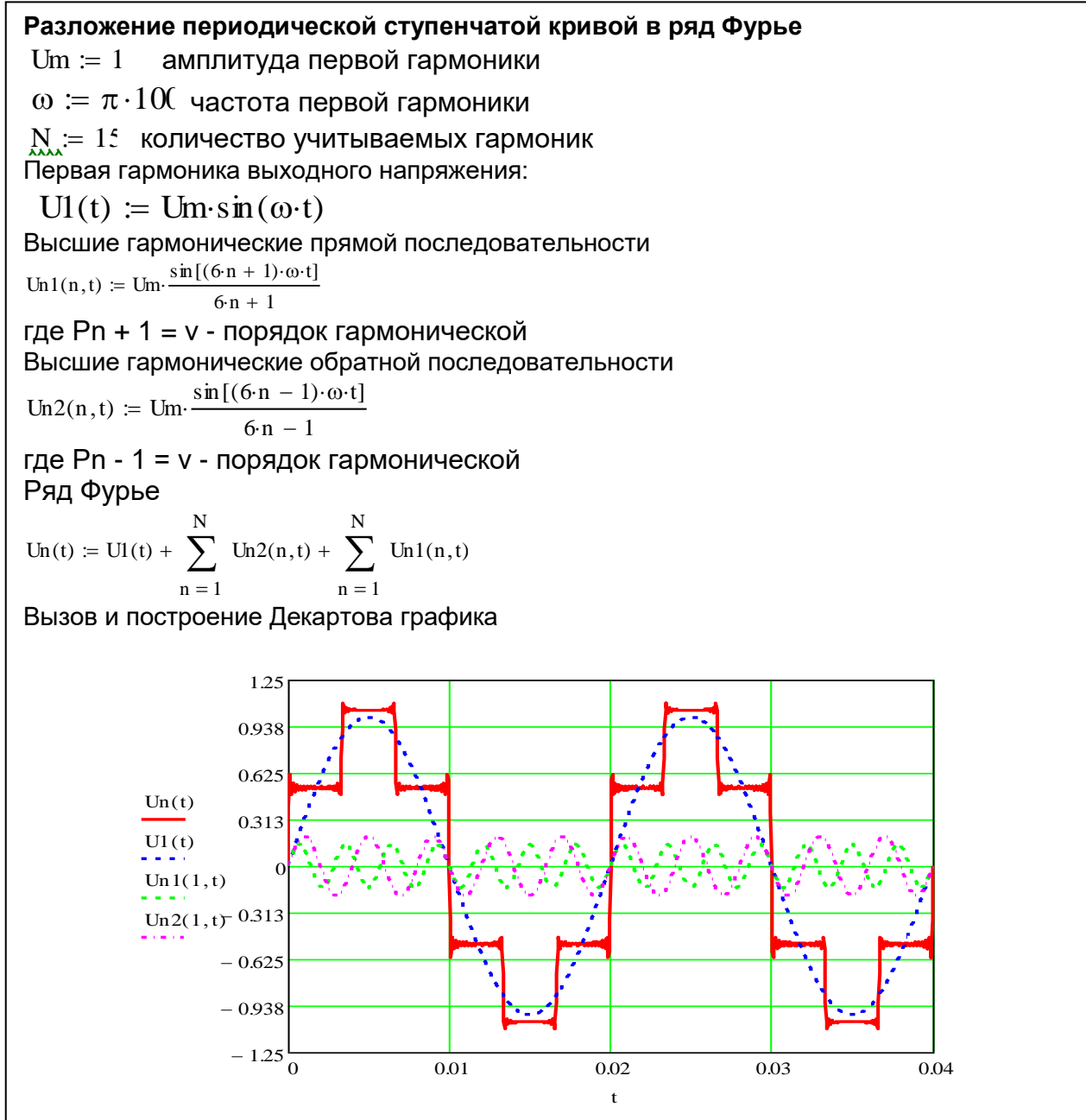


Рисунок 3.4 – Разложение периодической ступенчатой кривой в ряд Фурье

Проведем анализ выходного напряжения систем ПЧ-АИ.

Ступенчатая кривая выходного напряжения может быть разложена в ряд Фурье, как

$$U_c = \frac{4}{\pi} U_m r \left[\sin \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(Pn \pm 1)\omega t}{Pn \pm 1} \right], \quad (3.1)$$

где r - глубина регулирования напряжения;

U_m - амплитуда анодного напряжения;

ω - угловая частота выходного напряжения;

P - пульсность схемы ПЧ;

$Pn \pm 1 = \nu$ – порядок гармонической.

В (3.1) знак «+» соответствует высшим гармоническим прямой последовательности, «-» - высшим гармоническим обратной последовательности.

Выходное напряжение прямоугольной формы описывается, как

$$U_{II} = \frac{4}{\pi} U_m r \left[\sin \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin(Pn \pm 1)\omega t}{Pn \pm 1} \right]. \quad (3.2)$$

На рисунке 3.5 приведены программа и расчет кривой выходного напряжения автономного инвертора, выполненные в математическом приложении «Mathcad» и кривые выходного напряжения, синтезированные по формулам (3.1), (3.2). Программа универсальна в смысле расчета напряжения для ПЧ с любой пульсностью P .

Ввод исходных данных

Преобразователь частоты

$$\omega := 100\pi$$

угловая частота выходного напряжения ПЧ, рад/с:

$$U_p := 380$$

напряжение ПЧ, В

$$N := 10$$

количество учитываемых гармоник

Расчет выходного напряжения преобразователя частоты

Амплитуда анодного напряжения:

$$U_m := \sqrt{2} \cdot U_p \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$U_m = 422.074$$

Глубина регулирования напряжения:

$$r(s) := \frac{1-s}{1-0.02s}$$

$$r(s_n) = 1$$

Первая гармоника выходного напряжения:

$$U_1(s, t) := \frac{4}{\pi} \cdot U_m \cdot r(s) \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Высшие гармонические прямой последовательности

$$U_{n1}(P, s, n, t) := \frac{4}{\pi} \cdot U_m \cdot r(s) \cdot \frac{\sin[(P \cdot n + 1) \cdot \omega \cdot t]}{P \cdot n + 1}$$

где $P \cdot n + 1 = v$ - порядок гармонической

P - пульсность ПЧ

Высшие гармонические обратной последовательности

$$U_{n2}(P, s, n, t) := \frac{4}{\pi} \cdot U_m \cdot r(s) \cdot \frac{\sin[(P \cdot n - 1) \cdot \omega \cdot t]}{P \cdot n - 1}$$

где $P \cdot n - 1 = v$ - порядок гармонической

Выходное напряжение ПЧ

$$U_n(P, s, t) := U_1(s, t) + \sum_{n=1}^N U_{n2}(P, s, n, t) + \sum_{n=1}^N U_{n1}(P, s, n, t)$$

Вызов и построение Декартова графика

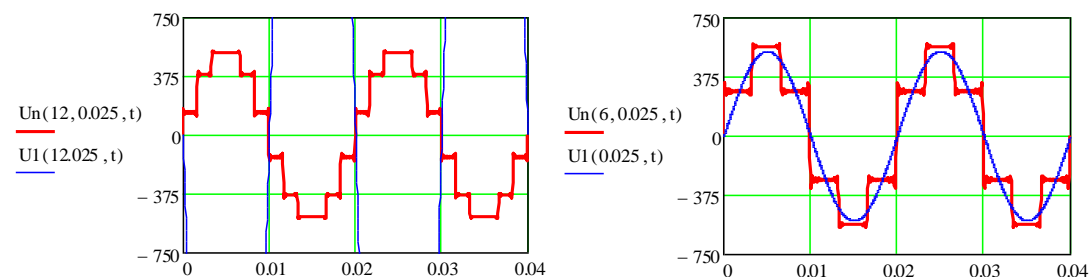


Рисунок 3.5 – Расчет кривой выходного напряжения автономного инвертора

4 Токи асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты

4.1 Преобразование напряжения ПЧ в синхронные координаты

На кафедре ЭМЭП АУЭС разработана математическая модель системы «ПЧ-АД», выполненная в математическом приложении «Mathcad». Алгоритмы этой модели можно использовать для расчета мгновенных значений токов АД. Для этого необходимо записать выражения выходного напряжения ПЧ с УВ (1, 2) в ортогональной системе координат x, y , вращающейся с частотой электромагнитного поля статора.

В этом документе, статор (а, б), а ротор с системой координат (д, д) и координатных значений переменной, соответствующей обнаруженным изменениям в физических переменных, которые позволяют переключать ωk каждой обмотки переменного напряжения, ток, в соответствии с этой упаковкой рекомендуется в качестве вектора был строго связан с осью координат и время модуля в соответствии с предлагаемым изменением переменных изменений.

Сортировка переменных в переменной конкретной координатной соответствующий индекс обозначается буквой x оси и поворотные строго связаны оси a, p положение; ш, б (статор) и D, Q (ротор) оси конкретных переменные, U, V системы новых значений переменных координаты можно считать свободными от ортогональной системы координат, новая ось, чтобы определить конкретные переменные определяет как количество выступов.

Просуммировав проекции по осям, в получены формулы прямого преобразования для статорных переменных в следующем виде

$$\begin{aligned}x_{1u} &= x_{1\alpha} \cos \varphi_k + x_{1\beta} \sin \varphi_k \\x_{1v} &= -x_{1\alpha} \sin \varphi_k + x_{1\beta} \cos \varphi_k\end{aligned}\quad (4.1)$$

Следовательно, для роторной переменной формулы преобразования имеют вид

$$\begin{aligned}x_{2u} &= x_{2d} \cos(\varphi_k - \varphi_{эл}) + x_{2q} \sin(\varphi_k - \varphi_{эл}) \\x_{2v} &= -x_{2d} \sin(\varphi_k - \varphi_{эл}) + x_{2q} \cos(\varphi_k - \varphi_{эл})\end{aligned}\quad (4.2)$$

Используя известные формулы преобразований, и переходя к ортогональным системам координат, получим проекции векторов высших гармонических на оси α, β , жестко связанные со статором АД. При ступенчатой форме выходного напряжения ПЧ-АИ

$$U_{\alpha} = \frac{4}{\pi} U_m r \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(Pn \pm 1)\omega t}{Pn \pm 1};$$

$$U_{\beta} = \frac{4}{\pi} U_m r (1 \pm \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(Pn \pm 1)\omega t}{Pn \pm 1}),$$
(4.3)

где знак «+» соответствует гармоническим прямой последовательности;
«-» соответствует гармоническим обратной последовательности.
Так как уравнения АД записаны в синхронных осях, представим $U_{\text{блх}}$ в осях x, y :

$$U_{1x} = U_{1\alpha} \cos \omega t + U_{1\beta} \sin \omega t;$$

$$U_{1y} = -U_{1\alpha} \sin \omega t + U_{1\beta} \cos \omega t.$$
(4.4)

Тогда в синхронной системе координат x, y проекции обобщенного вектора напряжения определяются, как

$$U_{1x} = \frac{4}{\pi} U_m r \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin pn\omega t}{pn \pm 1}$$

$$U_{1y} = \frac{4}{\pi} U_m r (1 \pm \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos pn\omega t}{pn \pm 1})$$
(4.5)

Выходное напряжение прямоугольной формы описывается в виде рядов Фурье, как

$$U_{\text{блх}} = \frac{4}{\pi} U_m r (\sin \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin(pn \pm 1)\omega t}{pn \pm 1})$$
(4.6)

Проекция $U_{\text{блх}}$ на синхронные оси координат x, y , в соответствии с (4.6)

$$U_{\text{блхх}} = \frac{4}{\pi} U_m r \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin pn\omega t}{pn \pm 1}$$

$$U_{\text{блху}} = -\frac{4}{\pi} U_m r (1 \pm \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\cos pn\omega t}{pn \pm 1})$$
(4.7)

Гармонический состав прямоугольного выходного напряжения аналогичен ступенчатой форме $U_{вых}$. Отличие заключается только в направлении вращения векторов высших гармонических.

На рисунке 4.1 представлены программа и расчет представления выходного напряжения ПЧ в ортогональной системе координат x, y , вращающейся с частотой электромагнитного поля статора.

<p>Преобразование координат</p> <p>Проекция 1-ой гармоники на синхронную ось X</p> $U_{x1}(s, t) := \frac{4 \cdot r(s) \cdot U_m}{\pi}$ <p>Проекция 1-ой гармоники на синхронную ось Y</p> $U_{y1}(s, t) := 0$ <p>Проекция v-ой гармоники на ось X</p> $U_{xv}(P, s, t, n) := \frac{4}{\pi} \cdot r(s) \cdot U_m \cdot \left(\frac{1}{P \cdot n - 1} + \frac{1}{P \cdot n + 1} \right) \cdot \sin(P \cdot n \cdot \omega \cdot t)$ <p>Проекция v-ой гармоники на ось Y</p> $U_{yv}(P, s, t, n) := \frac{4}{\pi} \cdot r(s) \cdot U_m \cdot \left(\frac{-1}{P \cdot n - 1} + \frac{1}{P \cdot n + 1} \right) \cdot \cos(P \cdot n \cdot \omega \cdot t)$ <p>Сумма проекций высших гармоник на ось X и Y</p> $U_{xv\Sigma}(P, s, t) := \frac{4}{\pi} \cdot r(s) \cdot U_m \cdot \left[\sum_{n=1}^5 \left[\left(\frac{1}{P \cdot n - 1} + \frac{1}{P \cdot n + 1} \right) \cdot \sin(P \cdot n \cdot \omega \cdot t) \right] \right]$ $U_{yv\Sigma}(P, s, t) := \frac{4}{\pi} \cdot r(s) \cdot U_m \cdot \left[\sum_{n=1}^5 \left[\left(\frac{-1}{P \cdot n - 1} + \frac{1}{P \cdot n + 1} \right) \cdot \cos(P \cdot n \cdot \omega \cdot t) \right] \right]$

Рисунок 4.1 – Программа и расчет выходного напряжения ПЧ

Для проверки верности расчета, проведем обратное преобразование координат (рисунок 4.2)

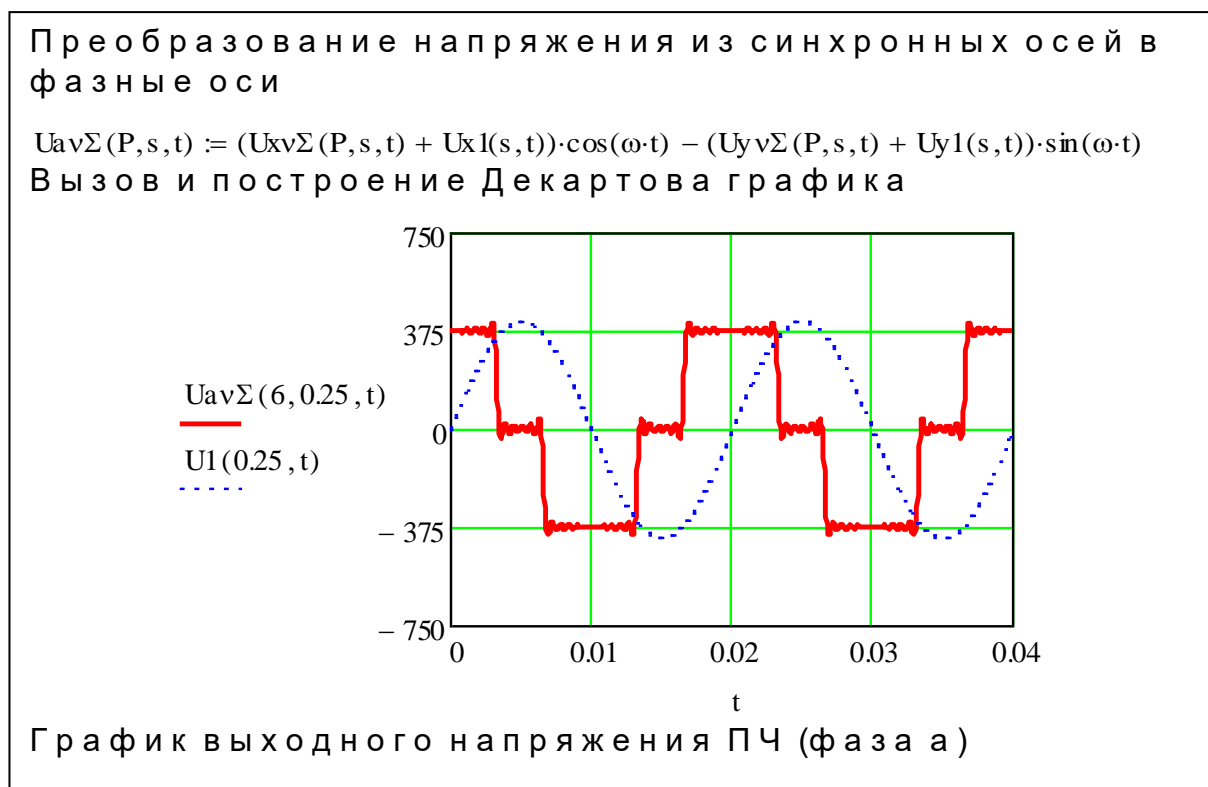


Рисунок 4.2 – Преобразование напряжения из синхронных осей в фазные оси

4.2 Расчет токов асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты

Исходная компьютерная модель представляет собой математическое описание и программ решения систем дифференциальных уравнений обобщенного электромеханического преобразователя (ОЭМП). Система «ПЧ-АД» является частным случаем ОЭМП.

При частотном управлении источник высших гармоник токов включен в цепь статора АД. Уравнения асинхронной машины (4.8) в установившемся режиме ($p = 0$) принимают вид

Высшие гармонические составляющие напряжений и токов можно, как и первые гармоники, представлять векторами, вращающимися с частотой, кратной порядку гармоник, и, следовательно, проводить их преобразования в различных системах координат.

Это позволяет использовать для расчетов искажающих составляющих токов двигателей те же алгоритмы и формулы, что и для расчета электромагнитных процессов в АД по первым гармоникам.

$$\begin{vmatrix} U_{1xv} \\ U_{1yv} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 & -\omega_v(l_1 + l_m) & 0 & -\omega_v l_m \\ \omega_v(l_1 + l_m) & r_1 & \omega_v l_m & 0 \\ 0 & -\omega_v s l_m & r_2 & -\omega_v s(l_2 + l_m) \\ \omega_v s l_m & 0 & \omega_v s(l_2 + l_m) & r_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{1xv} \\ I_{1yv} \\ I_{2xv} \\ I_{2yv} \end{vmatrix} \quad (4.8)$$

где u_1 – напряжение, приложенное к статорной цепи АД;
 i_1, i_2 – токи статора и ротора АД;
 l_1, l_2 – индуктивности рассеяния фазы статора и ротора;
 l_m – индуктивность контура намагничивания;
 ω – угловая частота вращения ротора;
 r_1, r_2 – активные сопротивления фазы статора и ротора;
 ν – порядковый номер гармонической составляющей тока и напряжения;

ω_ν – частота вращения ν – ой гармонической составляющей.

На рисунках 4.3 – 4.5 приведены программа и расчет кривых фазного тока асинхронного двигателя с учетом несинусоидальности выходного напряжения ПЧ.

Ввод исходных данных

Преобразователь частоты

$$\omega := 100\pi$$

угловая частота выходного напряжения ПЧ, рад/с:

$$U_p := 380$$

напряжение ПЧ, В

$$N_h := 10$$

количество учитываемых гармоник

Асинхронный двигатель

$$r_1 := 0.012$$

активное сопротивление статора:

$$r_2 := 0.046$$

активное сопротивление ротора:

$$l_1 := 0.020$$

индуктивность фазы статора:

$$l_2 := 0.020$$

индуктивность фазы ротора:

$$l_3 := 0.019$$

индуктивность контура намагничивания:

$$s_n := 0.02$$

номинальное скольжение АД

Расчет токов АД при питании от преобразователя частоты

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma := 1 - \frac{l_3^2}{l_1 \cdot l_2}$$

Индуктивное сопротивление статора высшей гармоники:

$$x_1(P, n) := \omega \cdot l_1 \cdot P \cdot n$$

Индуктивное сопротивление ротора высшей гармоники:

$$x_2(P, n) := \omega \cdot l_2 \cdot P \cdot n$$

Индуктивное сопротивление намагничивания высшей гармоники:

$$x_3(P, n) := \omega \cdot l_3 \cdot P \cdot n$$

Скольжение высшей гармоники:

$$s_n(P, s, n) := \frac{P \cdot n - s}{P \cdot n + 1}$$

Сопротивление статора для v-ой гармонической тока

$$Z_1(P, s, n) := r_2^2 + x_2(P, n)^2 \cdot s_n(P, s, n)^2 + \frac{x_3(P, n)^2 \cdot s_n(P, s, n) \cdot r_2}{r_1}$$

Сопротивление ротора для v-ой гармонической тока

$$Z_2(P, s, n) := r_2^2 + x_2(P, n)^2 \cdot s_n(P, s, n)^2 - \frac{x_3(P, n)^2}{x_1(P, n)} \cdot x_2(P, n) \cdot s_n(P, s, n)^2$$

Сопротивление намагничивающей цепи для v-ой гармонической тока

$$Z_3(P, s, n) := r_2 \cdot r_1 - x_1(P, n) \cdot x_2(P, n) \cdot s_n(P, s, n) \cdot \sigma$$

Рисунок 4.3 – Программа и расчет кривых фазного тока асинхронного двигателя (начало)

Сопrotивление намагничивающей цепи для v -ой гармонической тока

$$Z4(P, s, n) := sn(P, s, n) \cdot x\lambda(P, n) \cdot r1 + r2 \cdot x1(P, n)$$

Суммарное сопротивление для v -ой гармонической цепи

$$Z5(P, s, n) := r1^2 \cdot Z1(P, s, n) + x1(P, n)^2 \cdot Z2(P, s, n) + x\lambda(P, n)^2 \cdot sn(P, s, n) \cdot Z3(P, s, n)$$

Проекция высших гармоник токов статора и ротора на синхронные оси

$$ix1(P, s, t, n) := \frac{Uxv(P, s, t, n) \cdot r1 \cdot Z1(P, s, n) + Uyv(P, s, t, n) \cdot x1(P, n) \cdot Z2(P, s, n)}{Z5(P, s, n)}$$

$$iy1(P, s, t, n) := \frac{Uyv(P, s, t, n) \cdot r1 \cdot Z1(P, s, n) - Uxv(P, s, t, n) \cdot x1(P, n) \cdot Z2(P, s, n)}{Z5(P, s, n)}$$

$$ix2(P, s, t, n) := \frac{-sn(P, s, n) \cdot x\lambda(P, n) \cdot (Uxv(P, s, t, n) \cdot Z4(P, s, n) - Uyv(P, s, t, n) \cdot Z3(P, s, n))}{Z5(P, s, n)}$$

$$iy2(P, s, t, n) := \frac{-sn(P, s, n) \cdot x\lambda(P, n) \cdot (Uyv(P, s, t, n) \cdot Z3(P, s, n) - Uxv(P, s, t, n) \cdot Z4(P, s, n))}{Z5(P, s, n)}$$

Преобразование высших гармоник тока статора в фазные оси

$$ila(P, s, t) := ix1(P, s, t, 1) \cdot \cos(\omega \cdot t) - iy1(P, s, t, 1) \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Сумма проекции высших гармоник токов на синхронные оси

$$ix1\Sigma(P, s, t) := \sum_{n=1}^5 ix1(P, s, t, n)$$

$$iy1\Sigma(P, s, t) := \sum_{n=1}^5 iy1(P, s, t, n)$$

$$ix2\Sigma(P, s, t) := \sum_{n=1}^5 ix2(P, s, t, n)$$

$$iy2\Sigma(P, s, t) := \sum_{n=1}^5 iy2(P, s, t, n)$$

Индуктивное сопротивление статора первой гармоники

$$x11 := \omega \cdot l1$$

Индуктивное сопротивление ротора первой гармоники

$$x21 := \omega \cdot l2$$

Индуктивное сопротивление намагничивающей первой гармоники

$$x31 := \omega \cdot l3$$

Сопротивление статора первой гармоники тока

$$Z11(s) := r2^2 + x21^2 \cdot s^2 + \frac{x31^2 \cdot s \cdot r2}{r1}$$

Сопротивление ротора первой гармоники тока

$$Z21(s) := r2^2 + x21^2 \cdot s^2 - \frac{x31^2}{x11} \cdot x21 \cdot s^2$$

Сопротивление намагничивающей первой гармоники тока

$$Z31(s) := r2 \cdot r1 - x11 \cdot x21 \cdot s \cdot \sigma$$

Сопротивление намагничивающей первой гармоники тока

$$Z41(s) := s \cdot x21 \cdot r1 + r2 \cdot x11$$

Рисунок 4.4 – Программа и расчет кривых фазного тока асинхронного двигателя (продолжение)

Суммарное сопротивление первой гармоники

$$Z_{51}(s) := r_1^2 \cdot Z_{11}(s) + x_1^2 \cdot Z_{21}(s) + x_3^2 \cdot s \cdot Z_{31}(s)$$

Проекция первых гармоник токов статора и ротора на синхронные оси

$$I_{x1}(s) := \frac{4 \cdot U_m \cdot r(s) \cdot r_1 \cdot Z_{11}(s)}{\pi \cdot Z_{51}(s)}$$

$$I_{y1}(s) := \frac{-4 \cdot U_m \cdot r(s) \cdot x_1 \cdot Z_{21}(s)}{\pi \cdot Z_{51}(s)}$$

$$I_{x2}(s) := \frac{-4 \cdot U_m \cdot r(s) \cdot s \cdot x_3 \cdot Z_{41}(s)}{\pi \cdot Z_{51}(s)}$$

$$I_{y2}(s) := \frac{-4 \cdot U_m \cdot r(s) \cdot s \cdot x_3 \cdot Z_{31}(s)}{\pi \cdot Z_{51}(s)}$$

Токи статора и ротора первой гармоники

$$I_{11}(s) := \frac{4 \cdot U_m \cdot r(s) \cdot \sqrt{x_1^2 \cdot Z_{21}(s)^2 + r_1^2 \cdot Z_{11}(s)^2}}{\pi \cdot Z_{51}(s)}$$

$$I_{21}(s) := \frac{4 \cdot U_m \cdot r(s) \cdot s \cdot x_3 \cdot \sqrt{Z_{31}(s)^2 + Z_{41}(s)^2}}{\pi \cdot Z_{51}(s)}$$

$$I_{11}(0.025) = 288.863$$

$$I_{21}(0.025) = 266.178$$

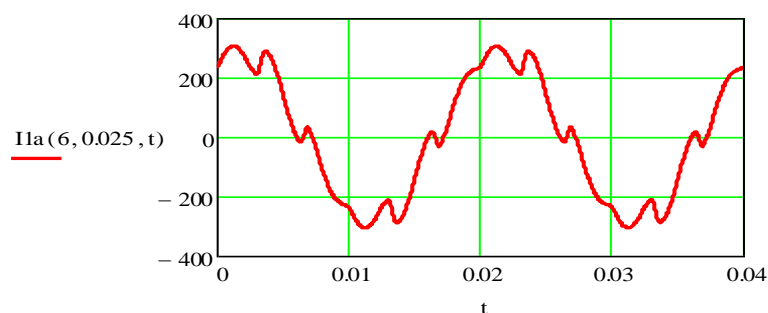
Суммарные проекции токов первой гармоники на синхронные оси

$$I_{x\Sigma}(P, s, t) := i_{x1\Sigma}(P, s, t) + I_{x1}(s)$$

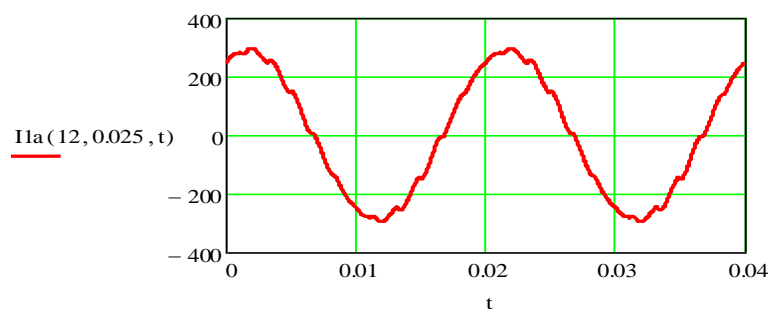
$$I_{y\Sigma}(P, s, t) := i_{y1\Sigma}(P, s, t) + I_{y1}(s)$$

Преобразование тока в фазные оси

$$I_{1a}(P, s, t) := I_{x\Sigma}(P, s, t) \cdot \cos(\omega \cdot t) - I_{y\Sigma}(P, s, t) \cdot \sin(\omega \cdot t)$$



Ток статора при $s=0.025$, $P=6$



Ток статора при $s=0.025$, $P=12$

Рисунок 4.5 – Программа и расчет кривых фазного тока асинхронного двигателя (окончание)

5 Безопасность жизнедеятельности

5.1 Анализ сети электропривода с вентильным преобразователем с точки зрения безопасности труда

Полупроводниковые приборы широко используются в двигателях, двигателях с приводом от клапанов. В промышленности используется серийное производство комплектных преобразователей и комплектных усилителей.

В этом случае число людей, занятых во вновь установленных технологических блоках, а также для установки, запуска и эксплуатации приводов, значительно увеличилось. В большинстве энергетических систем и систем преобразователя клапанов является одним из основных типов грузовых автомобилей. Преобразователь представляет собой нелинейный пакет для сети, и его работа влияет на режимы работы сети, особенно если передатчик имеет одинаковую мощность и сеть.

В данном дипломном проекте произведем анализ сети, определим величину тока, проходящего через тело человека, затем сравним с пороговыми значениями.

Выделены пороговые значения электрического тока: пороговый ощутимый ток – 0,6...1,5 мА при переменном токе частотой 50 Гц и 5... 7 мА при постоянном токе; пороговый неотпускающий ток (ток, вызывающий при прохождении через человека непреодолимые судорожные сокращения мышц руки, в которой зажат проводник) – 10...15 мА при 50 Гц и 50...80 мА при постоянном токе; пороговый фибрилляционный ток (ток, вызывающий при прохождении через организм фибрилляцию сердца) – 100 мА при 50 Гц и 300 мА при постоянном электрическом токе.

Расчетная часть

Для выполнения расчета исходные данные приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 –Исходные данные.

Показатели	Значения
$U_H, В$	380
$R_0, Ом$	4
$R_{из}, кОм$	40
$C_\phi, мкФ$	0,03
$R_h, Ом$	600

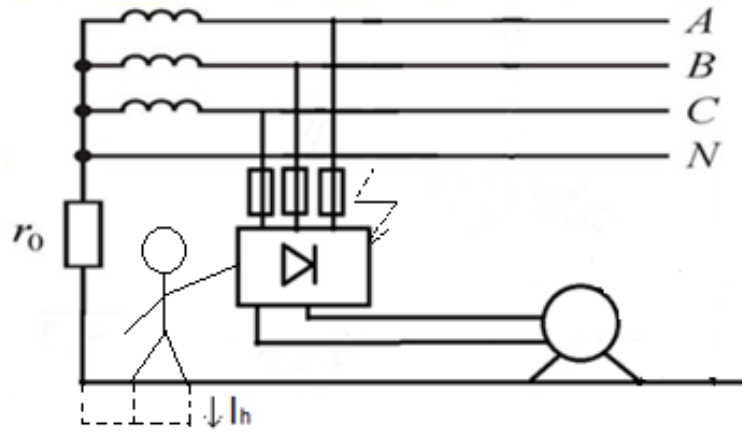


Рисунок 5.1 – Схема трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью при замыкании на корпус ВП

При замыкании на корпус ВП ток через тело человека будет равен:

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_{\phi}}{R_0 + R_{\text{пола}} + R_{\text{об}} + R_{\text{чел}} + R_{\phi}} = \frac{220}{4 + 100 + 500 + 1000 + 0,032} = 0,137 \text{ A} \quad (5.1)$$

Значение тока является фибрилляционным, что опасно для жизни человека.

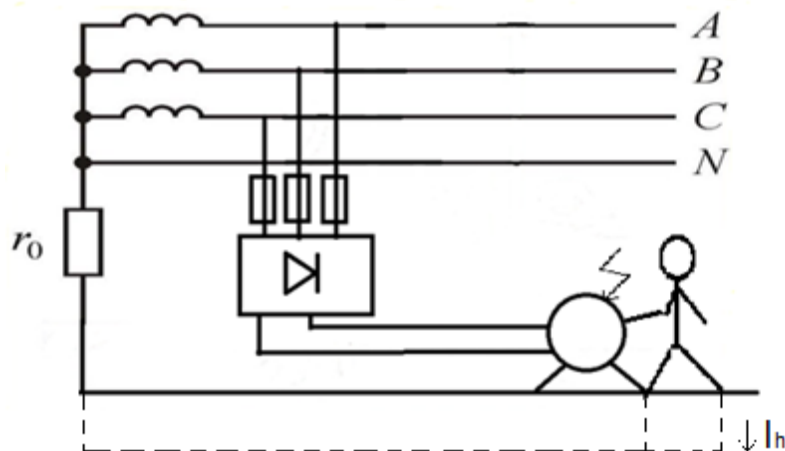


Рисунок 5.2 – Схема трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью при замыкании на корпус ЭД

При замыкании на корпус ЭД ток через тело человека будет равен:

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_c}{R_0 + R_h} = \frac{380}{4 + 600} = 0,63 \text{ A} \quad (5.2)$$

Значение тока является фибрилляционным, что опасно для жизни человека.

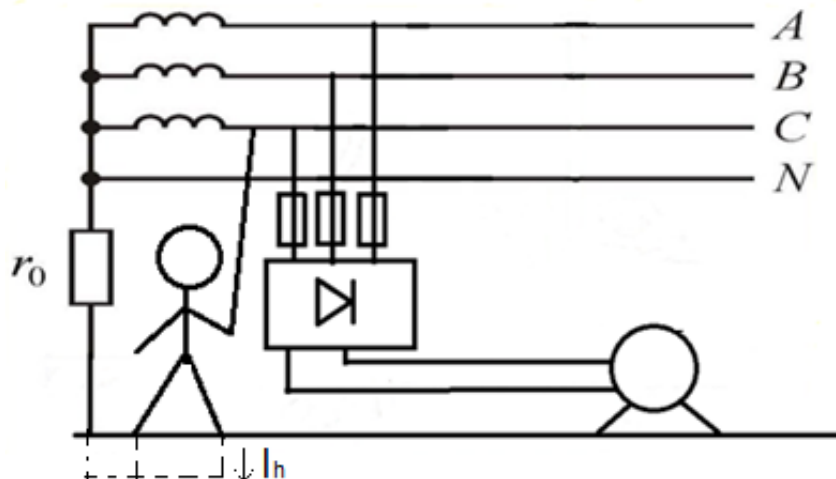


Рисунок 5.3 – Схема трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью при прикосновении человека к фазному проводу

При прикосновении к фазному проводу ток через человека будет равен:

$$I_{\text{чел}} = \frac{U_{\phi}}{R_0 + R_{\text{пола}} + R_{\text{об}} + R_{\text{чел}}} = \frac{220}{4 + 100 + 500 + 1000} = 0,138 \text{ A}, \quad (5.3)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение (в данном проекте 380 В);

R_0 – сопротивление заземления нейтрали (для сети с глухозаземленной нейтралью принимается равным 4 Ом);

$R_{\text{пола}}$ – сопротивление пола (для бетонного пола принимается равным 0,1 кОм);

$R_{\text{об}}$ – сопротивление обуви (принимается равным 0,5 кОм);

$R_{\text{чел}}$ – сопротивление тела человека (принимается равным 1 кОм).

Значение тока является фибрилляционным, что также опасно для жизни человека

В результате расчета выяснилось, что во всех случаях ток через тело человека является смертельно опасным для жизни человека, в связи с этим необходимо разработка дополнительной защиты. В сетях с глухозаземленной нейтралью основным средством защиты является зануление, расчет которой представлен ниже.

5.2 Разработка мер защиты от поражения электрическим током

Во время работы в ЭУ изоляция может разрушиться, при ее повреждении может возникнуть напряжение на несвободных (сторонних проводниках) частях электрического тока, который называется коротким замыканием в корпусе.

Для защиты людей от опасности поражения электрическим током применяются следующие защитные меры: защиты от замыканий на землю, зануление, отключение линий электропередачи, низкое напряжения, двойная изоляция и выравнивание потенциалов

Для данного случая основной мерой защиты от поражения электрическим током будет являться зануление, так как задача зануления - быстро отключать поврежденную установку от сети и в то же время обеспечивает безопасность прикосновения человека к зануленному корпусу в аварийный период.

Исходные данные для расчета защитного зануления:

- 1) Трансформатор мощностью 160 кВА, соединения – «звезда-звезда»;
- 2) Кабель от трансформатора до СП: медный 4-х жильный, $l=50$ м, сечения $3 \times 50 + 1 \times 25$, от СП до ВП медный 4-х жильный $l=15$ м, $3 \times 25 + 1 \times 16$, от ВП до ЭД медный 4-х жильный $l=2$ м, $3 \times 10 + 1 \times 6$
- 3) Номинальная мощность ЭД– $P=55$ кВт, $\cos \mu=0,9$, $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}=3$;
- 4) Защита выполняется автоматическим выключателем.

Для расчета зануления требуется определить ток К.З. и параметры схемы замещения сети.

Значение Z_T зависит от мощности трансформатора, напряжения, схемы соединения его обмоток и конструктивного исполнения трансформатора. В таблице 5.2 приведены значения Z_T типовых трансформаторов.

Таблица 5.2 – Приближенные значения полных сопротивлений обмоток масляных трехфазных трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ·А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	Z_T , Ом	
		При схеме соединения обмоток	
		Δ/Y_H	Y/Y_H
25	6÷10	0,906	3,11
40	6÷10	0,562	1,949
63	6÷10	0,36	1,237
100	6÷10	0,226	0,799
160	6÷10	0,141	0,487
250	6÷10	0,09	0,312
400	6÷10	0,056	0,195

По таблице 5.2 для данного трансформатора мощностью 250 кВА значение $Z_T = 0,487$ Ом.

Найдём номинальный ток вентиля, по формуле:

$$I_{\text{ном}} = \frac{I_{\text{дн}}}{m} = \frac{51,07}{3} = 17,02 \text{ А} \quad (5.4)$$

где $m_1 = 3$ в трехфазных схемах ВП

Найдём наибольшее расчётное значение повторяющегося импульсного напряжения на вентилях, по формуле:

$$U = k_B \cdot E d_0 = 1,045 \cdot 53,9 = 56,32 \text{ В} \quad (5.5)$$

Далее зная формулу мощности P (формула 5.6), рассчитывается номинальный ток $I_{\text{ном}}$ ЭД:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi \quad (5.6)$$

где P – номинальная мощность двигателя, кВт;
 U_n – номинальное напряжение, В;
 $\cos \varphi = 0,9$ – коэффициент мощности.

Из формулы 5.6 находим значение номинального тока:

$$I_{\text{ном}} = \frac{55 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,9} = 9,3 \text{ А.}$$

Чтобы рассчитать активные препятствия R_n и R_ϕ , сначала выберите сечение, длину и материалы нулевого и фазового проводников. На рисунке 6.4 представлена схема питания ЭД с ВП.

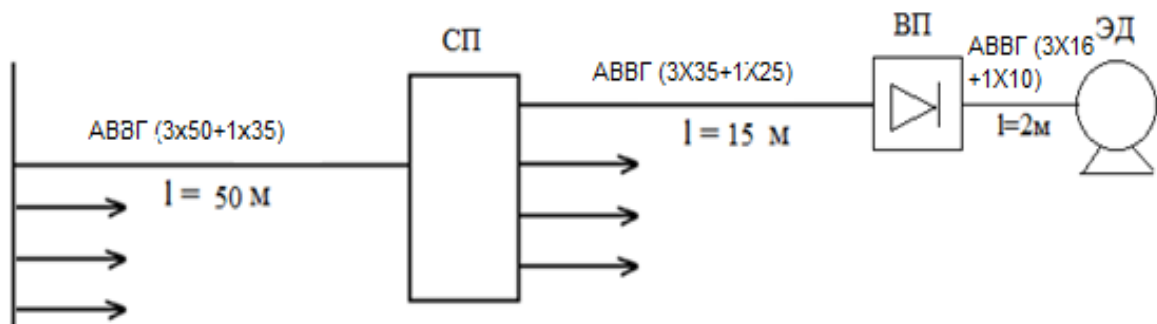


Рисунок 5.4 – Схема питания ЭД с ВП

Сопротивление проводников из цветных металлов определяется по формуле 5.7:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (5.7)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника (для меди $\rho = 0,018 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$);

l – длина провода;

S – сечение провода.

По формуле (5.7) определяем активное сопротивление всей цепи.

$$R_{\phi 1} = 0,018 \cdot 50 / 50 = 0,018 \text{ Ом};$$

$$R_{\phi 2} = 0,018 \cdot 15 / 25 = 0,01 \text{ Ом};$$

$$R_{\phi 3} = 0,018 \cdot 2 / 10 = 0,003 \text{ Ом};$$

$$R_{\Sigma \phi} = 0,018 + 0,01 + 0,003 = 0,032 \text{ Ом};$$

$$R_{н 1} = 0,018 \cdot 50 / 25 = 0,036 \text{ Ом};$$

$$R_{н 2} = 0,018 \cdot 15 / 16 = 0,017 \text{ Ом};$$

$$R_{н 3} = 0,018 \cdot 2 / 6 = 0,006 \text{ Ом};$$

$$R_{\Sigma н} = 0,036 + 0,017 + 0,006 = 0,059 \text{ Ом}.$$

Индукционное сопротивление медных и алюминиевых проводов Хн и Хф очень мало и их можно игнорировать. Сопротивление взаимной индукции зависит от расстояния между проводами D и их диаметром. Как правило, существуют отдельные нейтральные защитные шнуры. Обычно при отдельно проложенных нулевых защитных проводах принимают $X_{\phi н} = 6 \cdot 10^{-4} \cdot l$.

Полное сопротивление петли «фаза-нуль»:

$$Z_n = \sqrt{\left(R_{\Sigma \phi} + R_{\Sigma н}\right)^2 + \left(X_{\phi н} + X_{\phi} + X_{н}\right)^2} \quad (5.8)$$

Находим полное сопротивление петли «фаза-нуль» по формуле (5.8):

$$Z_n = \sqrt{(0,032 + 0,059)^2 + (0,039 + 0 + 0)^2} = 0,09 \text{ Ом}$$

Значение тока однофазного короткого замыкания:

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{mp}}{3} + Z_n} \quad (5.9)$$

Значение тока однофазного короткого замыкания находится по формуле 5.9 для проверки срабатывания автоматического выключателя:

$$I_{кз} = \frac{220}{\frac{0,487}{3} + 0,09} = 1,5 \text{ кА}$$

Для выбора значения номинального тока срабатывания автоматического выключателя находится пусковой ток по отношению $I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}} = 3$ и значению $I_{\text{ном}}$.

Пусковой ток двигателя:

$$I_{\text{пуск}} = 3 \cdot I_{\text{ном}} = 3 \cdot 9,3 = 27,9 \text{ А.}$$

Пусковой ток преобразователя:

$$I_{\text{пуск}} = 3 \cdot I_{\text{ном}} = 3 \cdot 17,02 = 51,06 \text{ А.}$$

Номинальный ток срабатывания автоматического выключателя принимается равным больше пускового в данном случае:

$$\begin{aligned} I_{\text{ном.АВ}} &> I_{\text{пуск}} \\ 32 \text{ А} &> 27,9 \text{ А.} \\ 63 \text{ А} &> 51,06 \text{ А.} \end{aligned}$$

Для защиты ЭД выбран автоматический выключатель IEK ВА47-60 1Р 32А 6кА с номинальным током срабатывания автоматического выключателя $I_{\text{ном.АВ}} = 32 \text{ А}$, время срабатывания выключателя не превышает 0,2 с.

Для защиты ВП IEK ВА47-60 1Р 63А 6кА с номинальным током срабатывания автоматического выключателя $I_{\text{ном.АВ}} = 63 \text{ А}$, время срабатывания выключателя не превышает 0,2 с.

Напряжение на корпусе относительно земли при замыкании токоведущих частей на корпус:

$$U_{\text{н}} = I_{\text{кз}} \cdot R_{\Sigma_{\text{н}}} \quad (5.10)$$

Значение напряжения на корпусе находится по формуле 5.10:

$$U_{\text{н}} = 1500 \cdot 0,059 = 88,5 \text{ В}$$

При проведении расчета на отключающую способность, были выбраны два автоматических выключателя, обеспечивающие надежную защиту по критерию электробезопасности $I_{\text{ном.АВ}} > I_{\text{пуск}}$.

6 Экономическая часть

6.1 Технико-экономическое сравнение вариантов систем регулирования электропривода

Автоматизированные системы управления производством могут быть эффективными для любого предприятия, поскольку объем автоматизации управления может соответствовать специфике компании, в зависимости от ее специфики.

Экономический эффект от использования автоматизированной системы управления в первую очередь связан с повышением качества и надежности контроля, минимизацией затрат, повышением производительности и так далее. Эффективность автоматизированного производства, которая определяется банком.

Запатентованный российским ученым Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским в 1889 году, трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа «беличья клетка» (сокращенно АДКЗ), произвел настоящую революцию в электротехнике. Теперь асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором находят самое широкое применение в промышленности, на транспорте, в быту и т.д.

Перечислять области их применения можно очень долго. Электрические приводы дымососов, подъемных кранов, шаровые мельницы, насосы, транспортеры, лебедки, дробилки, всевозможные станки, и бытовые приборы, - множество применений находит это замечательное устройство в наше время.

Преимуществами двигателей данного типа, в частности, являются простота обслуживания и отсутствие движущихся контактов по сравнению с асинхронными двигателями с фазным ротором. Здесь нет щеток и колец, питание подается на стационарный трехфазный статор, который идеально подходит для различных применений. Этот двигатель может быть легким в обслуживании и относительно недорогим, с минимальными эксплуатационными расходами, высокой надежностью.

Говоря о недостатках асинхронных двигателей, их несколько. Когда двигатель запускается, первичный ток слишком велик и при запуске двигателя намного меньше номинального значения, это ограничивает объем применения, и, если требуется точка запуска, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором не работает.

Однако этот дефект можно преодолеть с помощью преобразователя частоты, который будет постепенно увеличивать скорость, обеспечивая тем самым достаточно высокое начальное состояние.

Существует также проблема регулировки оборотов, но она может быть решена аналогичным образом с помощью передатчика. Современная полупроводниковая база делает частотные преобразователи более доступными с каждым годом.

6.2 Расчет капиталовложений и затрат на эксплуатацию

Капиталовложения рассчитываются по данной формуле:

$$K = K_o + K_p + K_m + K_{np} \quad (6.1)$$

где K_o – капиталовложения для закупа оборудования;

K_p – капиталовложения на строительные работы;

K_m – затраты на монтажные работы;

K_{np} – прочие затраты (затраты на транспортировку).

Капиталовложения для закупа оборудования по первому варианту представлены в таблице 5.1.

Таблица 6.1– Капиталовложения для закупа оборудования (первый вариант)

№	Названия основных производственных фондов	Кол-во	Цена за шт, тыс тенге	Общая ст-ть, тыс тенге
1.	Электродвигатель	1	880	880
2.	Контакты	8	46	368
3.	Электроманитный тормоз	1	160	160
4.	Разъединитель	2	14	28
5.	Командоконтроллер	1	37	37
6.	Резисторы	17	1,5	25,5
7.	Реле времени	3	4,6	13,8
8.	Промежуточное реле	1	7,5	7,5
9.	Реле напряжения	1	15	15
	Всего			1534,8

Определим затраты на строительные работы (ограждение сеткой, стройка бетонной подставки и т.д), что составляют 7% от стоимости оборудования:

$$K_c = 0,07 \cdot K_o$$

$$K_c = 0,07 \cdot 1534800 = 107436 \text{ тенге}$$

Затраты на монтажные работы составляют 30 % от стоимости оборудования:

$$K_m = 0,3 \cdot K_o$$

$$K_m = 0,3 \cdot 1534800 = 460440 \text{ тенге}$$

Затраты на транспортировку оборудования составляют 15 % от стоимости оборудования:

$$K_{np} = 0,15 \cdot K_o$$

$$K_{np} = 0,15 \cdot 1534800 = 230220 \text{ тенге}$$

$$K_I = 1534800 + 107436 + 460440 + 230220 = 2332896 \text{ тенге}$$

Затраты на эксплуатацию:

$$I = I_A + I_{ЭЭ} + I_{ЗП} + I_{ПР} + I_P \quad (6.2)$$

где I_A – амортизационные отчисления;

$I_{ЭЭ}$ – стоимость электроэнергии, потребляемой электроприводом

I_P – стоимость ремонта электроустановки ;

$I_{ЗП}$ – годовая заработная плата

$I_{ПР}$ – прочие затраты.

1. Определим амортизационные отчисления:

$$I_A = (H \cdot K_I) / 100\% \quad (6.3)$$

где H – норма амортизации (12%);

K_I – первоначальная стоимость оборудования, тенге.

$$I_A = (12\% \cdot 2332896) / 100\% = 279947 \text{ тенге.}$$

2. Стоимость электроэнергии, потребляемой электроустановкой:

$$I_{ЭЭ} = \Delta Э \cdot T, \quad (6.4)$$

где $\Delta Э$ – годовое потребление энергии кВт/ч;

T – тариф за 1 кВт/ч (16 тенге).

Расчет годового потребления электроэнергии $\Delta Э$:

$$\Delta Э = P_2 \cdot \frac{1-\eta}{\eta} \cdot K_3 \cdot T \quad (6.5)$$

где P_2 – номинальная мощность двигателя (75 кВт);

η – КПД двигателя ($\eta=0.9$);

K_3 – коэффициент загрузки ($K_3=0.9$);

T – активные рабочие часы ($T=4000$ ч).

Для первого варианта мощность двигателя составляет 75 кВт.

$$\Delta \mathcal{E} = 75 \cdot \frac{1-0,9}{0,9} \cdot 0,9 \cdot 4000 = 30000 \text{ кВт} / \text{ч}$$

$$I_{\mathcal{E}\mathcal{E}} = 30000 \cdot 16 = 480000 \text{ тенге.}$$

3. Заработная плата и пенсионные отчисления работников:

$$I_{ЗП} = T_{C_{cp}} \cdot \Phi \cdot N \cdot PK \cdot K_{\kappa}, \quad (6.6)$$

где $T_{C_{cp}}$ - среднечасовая ставка (500 тенге)

Φ – годовое эффективное рабочее время одного сотрудника,

$\Phi = 2112$ чел/ч;

N – количество человек (1 чел);

PK – региональный коэффициент, который способствует затратам на оплату труда, связанным с работой в тяжелом климате, который компенсирует дополнительные расходы и сверхурочные затраты на рабочую силу, $PK = 1.3$;

K_{δ} – коэффициент, который учитывает дополнительную заработную плату, $K_{\delta} = 1.4$.

$$I_{ЗП} = 500 \cdot 2112 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1,4 = 1921920 \text{ тенге.}$$

Выплата заработной платы после перевода в Пенсионный фонд:

$$I_{ПФ} = I_{ЗП} - 10\% \cdot I_{ЗП}, \quad (6.7)$$

$$I_{ЗП} = 1921920 - 10\% \cdot 1921920 = 1729728 \text{ тенге.}$$

Переводы на социальный налог:

$$I_{СН} = 11\% \cdot I_{ЗП}, \quad (6.8)$$

$$I_{СН} = 11\% \cdot 1921920 = 211411,2 \text{ тенге.}$$

1. Общие затраты на техническое обслуживание и ремонт электроинструмента:

$$I_{ОБ} = I_{ОП} + I_{СН} + I_{Мат} + I_{тр}, \quad (6.9)$$

где $I_{ОП}$ – заработная плата работников, выполняющих работы по техническому обслуживанию и ремонту;

$I_{СН}$ – социальные налоговые отчисления;

$I_{Мат}$ – стоимость ремонтного материала;

$I_{тр}$ – затраты на транспортировку (60% от $I_{ЗП}$).

$$I_{ДЗП} = I_{ЗП} \cdot K_I \quad (6.10)$$

где $I_{ДЗП}$ – дополнительная заработная плата.

$$I_{ДЗП} = 1921920 \cdot 1,4 = 2690688 \text{ тенге.}$$

$$I_{ОП} = I_{ДЗП} + I_{ЗП}, \quad (6.11)$$

$$I_{ОП} = 2690688 + 1921920 = 4612608 \text{ тенге.}$$

$I_{Мат}$ составляет 3-5% от первоначальной суммы установки:

$$I_{Мат} = 3-5\% \cdot K_3, \quad (6.12)$$

K_3 – затраты на покупку оборудования.

$$I_{Мат} = (3-5)\% \cdot 1534800 = 76740 \text{ тенге.}$$

Затраты на транспортировку составляют 60% от зарплаты работника:

$$I_{тр} = 60\% \cdot I_{ЗП} \quad (6.13)$$

$$I_{тр} = 60\% \cdot 1921920 = 1153152 \text{ тенге.}$$

Общие затраты на обслуживание и ремонт электрооборудования:

$$I_{ОБ} = 4612608 + 211411,2 + 76740 + 1153152 = 6053911,2 \text{ тенге.}$$

4. Прочие расходы определяются по следующей формуле:

$$I_{ПР} = 0,05 (I_A + I_{ЭЭ} + I_{ЗП} + I_{ОБ}), \quad (6.14)$$

$$I_{ПР} = 0,05 (279947 + 480000 + 1921920 + 6053911,2) = 436788,91 \text{ тенге.}$$

Сумма всех эксплуатационных расходов:

$$I = 279947 + 480000 + 1921920 + 436788,91 + 6053911,2 = 9172567,11 \text{ тенге.}$$

По результатам расчета была составлена смета затрат.

Таблица 6.2 – Смета затрат

Затраты	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Капиталовложения	K_I	тенге	2332896
Эксплуатациялық шығындар			
Амортизационные затраты	I_A	тенге	279947
Потребляемая энергия	$I_{ЭЭ}$	тенге	480000
Монтажные работы	$I_{МР}$	тенге	6053911,2
Зарплата работников	$I_{ЗП}$	тенге	1921920
Соц. Пенсионные отчисления	$I_{П}$	тенге	190270,08
Прочие затраты	$I_{ПР}$	тенге	436788,91
Всего	I_I	тенге	9172567,11

6.2 Расчет капиталовложений и затрат на эксплуатацию (система, представленная в дипломной работе)

Расчет капиталовложений по второму варианту с помощью формулы (6.1) и сведен в таблицу 6.3

Таблица 6.3 – Капиталовложения для закупа оборудования (второй вариант)

№	Названия основных производственных фондов	Кол-во	Бір данасының кәтерме бағасы, мың теңге	Жалпы бағасы, мың теңге
1.	Электродвигатель 2081/3081	1	550	550
2.	Вентильный преобразователь ВПВ212WD55N4	1	430	430
3.	Электромагнитный тормоз	1	105	105
4.	Разъединитель	2	12	24
5.	Микроконтроллер ПЛК RH99P 220/240В 50/60/400Гц	1	45	45
Всего				1134

Определим затраты на строительные работы, они составляют 7 % от суммы оборудования:

$$K_c = 0,07 \cdot K_o$$

$$K_c = 0,07 \cdot 1134000 = 79380 \text{ тенге}$$

Затраты на монтажные работы составляют 30 % от стоимости оборудования:

$$K_m = 0,3 \cdot K_o$$

$$K_m = 0,3 \cdot 1134000 = 340200 \text{ тенге}$$

Затраты на транспортировку оборудования составляют 15 % от стоимости оборудования:

$$K_{np} = 0,15 \cdot K_o$$

$$K_{np} = 0,15 \cdot 1134000 = 170100 \text{ тенге}$$

$$K_I = 1134000 + 79380 + 340200 + 170100 = 1723680 \text{ тенге}$$

Расчет затрат на эксплуатацию по второму варианту.

1. Амортизационные отчисления определяются по формуле (6.3):

$$I_A = (12\% \cdot 1723680) / 100\% = 206841,6 \text{ тенге.}$$

2. Стоимость затрат на электроэнергию, потребляемую электроприводом, рассчитывается по формуле $I_{ЭЭ}$ (6.4). Для второго варианта для проектируемой новой системы выбран электродвигатель мощностью 55 кВт.

Годовой расход электроэнергии $\Delta Э$:

$$\Delta Э = 55 \cdot \frac{1-0,9}{0,9} \cdot 0,8 \cdot 4000 = 19555 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$I_{ЭЭ} = 19555 \cdot 16 = 312880 \text{ тенге.}$$

2. Заработная плата и пенсионные отчисления работников определяются по формулам (6.5-6.8):

$$I_{EA} = 500 \cdot 2112 \cdot 1,1 \cdot 1,3 \cdot 1,4 = 1921920 \text{ тенге.}$$

Заработная плата с учетом пенсионных отчислений:

$$I_{ЗП} = 1921920 - 10\% \cdot 1921920 = 1729728 \text{ тенге.}$$

Отчисления в социальные налоги:

$$I_{CH} = 11\% \cdot 1921920 = 211411,2 \text{ тенге.}$$

3. Расчет общих затрат на техническое обслуживание и ремонт электрооборудования производились на основе формул (6.10-6.13):

$$I_{ТО} = 1921920 \cdot 1,4 = 2690688 \text{ тенге.}$$

$$I_P = 2690688 + 1921920 = 4612608 \text{ тенге.}$$

I_{Mat} составляет 3-5% от первоначальной суммы установки:

$$I_{Mat} = (3-5)\% \cdot 1134000 = 56700 \text{ тенге.}$$

Расходы на транспортировку составляют 60% от заработной платы работника:

$$I_{mp} = 60\% \cdot 1921920 = 1153152 \text{ тенге.}$$

Для расчета общих затрат на техническое обслуживание и ремонт электроустановок применялась формула (6.9):

$$I_{OB} = 4612608 + 211411,2 + 56700 + 1153152 = 6033871,2 \text{ тенге.}$$

4. Прочие затраты определяются по формуле (6.14):

$$I_{\text{ПР}} = 0,05 (206841,6 + 312880 + 1921920 + 6033871,2) = 427139,09 \text{ тенге.}$$

Сумма всех эксплуатационных затрат рассчитывается по формуле (6.2):

$$I = 206841,6 + 312880 + 1921920 + 427139,09 + 6033871,2 = 8969920,89 \text{ тенге.}$$

По результатам расчетов составлена смета расходов.

Таблица 6.4 – Смета расходов (второй вариант)

Затраты	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Капиталовложения	K_{II}	тенге	1723680
Эксплуатационные затраты			
Амортизационные затраты	I_A	тенге	206841,6
Потребляемая энергия	$I_{ЭЭ}$	тенге	312880
Монтажные работы	I_{MP}	тенге	6033871,2
Зарплата работников	$I_{ЗП}$	тенге	1921920
Соц. Пенсионные отчисления	$I_{П}$	тенге	190270,08
Прочие затраты	$I_{\text{ПР}}$	тенге	427139,09
Всего	I_I	тенге	8969920,89

6.4 Расчет экономической эффективности выбранного варианта

Для сравнения двух вариантов используется метод минимумов понесенных затрат.

Причиненные убытки составляют:

$$I_k = I + E_n \cdot K, \quad (6.15)$$

где I – сумма ежегодных эксплуатационных затрат (тенге);

K – капиталовложения;

E_n – коэффициент относительной экономической эффективности капитальных вложений ($E_n = 0.15$).

$$I_{k \text{ In}} = 9172567,11 + 0,15 \cdot 2332896 = 9522501,51 \text{ тенге;}$$

$$I_{k \text{ In}} = 8969920,89 + 0,15 \cdot 1723680 = 9228472,89 \text{ тенге.}$$

Расчеты показали, что нам гораздо эффективнее был получен второй вариант. Экономический эффект производится путем сравнения двух вариантов (основных и проектируемых) по формуле

$$\mathcal{E} = I_{k \text{ In}} - I_{k \text{ In}}, \quad (6.16)$$

где $I_{k \text{ In}}$ – затраты, понесенные в основном проекте, тенге;

$I_{k \text{ In}}$ – затраты, приведенные в проектируемом варианте, тенге.

$$\mathcal{E} = 9522501,51 - 9228472,89 = 294028,62 \text{ теңге.}$$

Экономический эффект от внедрения второго проекта составил:

$$\mathcal{E} = \Delta I + 0,15 \Delta K, \quad (6.17)$$

$$\mathcal{E} = (9172567,11 - 8969920,89) + 0,15(2332896 - 1723680) = 294028,62 \text{ теңге}$$

Определение срока окупаемости проекта:

$$T_{co} = \frac{K_1 - K_2}{I_1 - I_2} \quad (6.18)$$

$$T_{co} = \frac{2332896 - 1723680}{9172567,11 - 8969920,89} = 3 \text{ года}$$

После проделанных расчетов пришли к выводу, что изменение асинхронного электродвигателя с фазным ротором на частотно-регулируемый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является экономически выгодным. Капиталовложения составили 1723680 со сроком окупаемости в 3 года, что является хорошим показателем.

Заключение

В дипломной работе проведены разработки математической модели асинхронного электропривода по схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с применением компьютерного приложения «Mathcad».

При моделировании использован векторно-гармонический метод исследования электромагнитных и электромеханических процессов в электромеханических преобразователях. Представлена методика расчета токов и момента в электроприводе с учетом несинусоидальности выходного напряжения преобразователя частоты, расчета мгновенных значений токов и момента асинхронного двигателя.

Проведен расчет мгновенных значений напряжений преобразователя частоты и токов асинхронного двигателя на базе математического приложения «Mathcad» разработаны компьютерные модели отдельных элементов электропривода: преобразователя фаз и координат, трансформатора, преобразователя частоты и асинхронного электродвигателя.

В разделе безопасность жизнедеятельности проведен анализ сети электропривода с вентильным преобразователем с точки зрения безопасности труда, разработаны меры защиты от поражения электрическим током, проведен расчет зануления электродвигателя.

В экономической части дипломной работы было произведено технико-экономическое сравнение вариантов систем регулирования электропривода, выполнен расчет капиталовложений и затрат на эксплуатацию и определен срок окупаемости вложенных денежных средств.

Список литературы

- 1 Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392с.
- 2 Асинхронные двигатели серии 4А: Справ. /А.Э. Кравчик, М.М. Шлаер, В.И. Афонин и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
- 3 Преобразователь частоты серии АПЧ (руководство по эксплуатации) 2012. – 34с.
- 4 Мустафин М.А., Мустафин М.Е. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов. – Алматы, 2009. – 248с.
- 5 Шеховцов В.П. Расчет и проектирование ОУ и электроустановок промышленных механизмов.- М.: Форум. 2010- 224с.
- 6 Сыромятников, И.А. Режим работы асинхронных и синхронных двигателей/И.А. Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
- 7 Кацман М.М. Электрический привод. -М.: Академия, 2014. - 384с.
- 8 Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 416 с.
- 9 Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов.- 3-е изд., испр.- М.: Академия, 2008 .- 576 с.
- 10 Ключев В.И. Теория электропривода. – 3-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
- 11 П.А. Долин. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. Пособие. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 448
- 12 Санатова Т. С., Мананбаева С.Е. Безопасность жизнедеятельности. Методические указания к выполнению раздела «Электробезопасность в электроустановках» в выпускных работах для специальности 5В071800 – Электроэнергетика. Бакалавриат – Алматы: АИЭС, 2009.
- 13 Санатова Т.С., Мананбаева С.Е.. Безопасность жизнедеятельности «Расчет зануления» Методические указания к выпускной работе для студентов-бакалавров всех специальностей и всех форм обучения – Алматы: АУЭС, 2011
- 14 Жакупов А.А., Валиева Л.Ш., Соколова И.С. Экономика отрасли. Конспект лекций для студентов специальности 5В071800-Электроэнергетика – Алматы: АУЭС. 2013.-50с.
- 15 Жакупов А.А., Валиева Л.Ш., Хижняк Р.С. Экономическая часть выпускной работы. Методические указания по выполнению экономической части выпускной работы для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика. – Алматы: АУЭС; 2016. – 38 с.