

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЧУВАШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
И.Н. УЛЬЯНОВА»

На правах рукописи

Славутский Александр Леонидович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В
УЗЛАХ КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ МЕТОДОМ СИНТЕТИЧЕСКИХ СХЕМ**

Специальность 05.09.03

Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук,
профессор
Щедрин Владимир Александрович

ЧЕБОКСАРЫ – 2016

Содержание

Введение.....	4
ГЛАВА 1 КРАТКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА И МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ СЭС	10
1.1 Общая информация о моделях узлов нагрузок систем электропитания.....	10
1.2 Методы расчета переходных процессов в электрических цепях	13
1.3 Обзор существующих программных решений для расчета и моделирования СЭС	16
1.3.1 Модели и алгоритмы.....	17
1.3.2 Классификация ПО	18
1.3.3 Краткое резюме по проанализированным программным продуктам.....	19
Выводы по главе 1	21
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЭС... 22	22
2.1 Расчет переходных процессов методом сведения к синтетическим схемам	22
2.2 Расчет схем с нелинейными элементами	25
2.3 Алгоритм программы расчета переходных процессов.....	28
2.3.1 Описание блоков программы.....	30
2.4 Пример работы методики расчета переходных процессов	34
2.5 Пример моделирования переходного процесса при повреждении воздушной линии электропередач	36
Выводы по главе 2	51
ГЛАВА 3 МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛОВ НАГРУЗОК СЭС	53
3.1 Линии электропередач	53
3.2 Полупроводниковые элементы	55
3.3 Силовые трансформаторы	58
3.4 Нелинейные индуктивности и трансформаторы.....	60
3.4.1 Модель магнитного гистерезиса Джайлса – Атертона	65

3.5 Асинхронные двигатели	73
Выводы по главе 3	90
ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ УЗЛОВ КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ	93
4.1 Моделирование силового полупроводникового комплекса с ШИМ управлением	93
4.2 Моделирование узла нагрузки СЭС с мощным асинхронным двигателем	98
4.3 Режимы работы узла комплексной нагрузки с двумя асинхронными двигателями.	111
4.4 Переходные процессы в узле нагрузки с трехобмоточным трансформатором.....	121
4.4.1 Режим пуска мощного асинхронного двигателя в узле нагрузки с трехобмоточным трансформатором.	124
4.4.2 Режим однофазного замыкания на землю на стороне среднего напряжения трехобмоточного трансформатора.....	128
4.4.3 Режим двухфазного короткого замыкания на землю на стороне среднего напряжения трехобмоточного трансформатора	132
4.4.4 Режим отключения нагрузки на стороне среднего напряжения	136
Выводы по главе 4	137
Заключение	139
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	142
Приложение 1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ NLETransSim.....	155
Приложение 2 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ NLETransSim 1.1	156
Приложение 3 Сертификат об обучении работе на комплексах RTDS.....	157
Приложение 4 Справки о внедрении результатов работы.....	158

Введение

Актуальность. Узлом комплексной нагрузки называется совокупность потребителей электроэнергии (нагрузок) [65], получающих питание от понижающих подстанций распределительных сетей напряжением 6 – 110 кВ. Узлы комплексной нагрузки можно выделять на разных структурных уровнях передачи, преобразования и распределения электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) [19]. Узлы нагрузки можно разделить на первичные и вторичные. Вторичные узлы могут объединять в себе несколько первичных узлов за счет разветвленной распределительной сети более низкого напряжения, питающейся от данного узла. В данной работе рассматриваются узлы комплексной нагрузки в распределительных сетях СЭС.

Для моделирования распределительных сетей обычно используются простые схемы замещения, поскольку задачи расчета переходных процессов в таких сетях ставятся редко (работы С. Бернаса и З. Цёка, С. А. Ульянова, С. Б. Лосева и А. Б. Чернина, В. А. Веникова, В. И. и др.). Чаще всего задача моделирования сетей и нагрузок указанного класса напряжения сводится к расчету установившегося режима для задач РЗА, определения уровней напряжения и потерь электроэнергии [11, 92, 96, 18].

Широко описаны в отечественной и зарубежной литературе модели отдельных элементов нагрузок и сетей, таких как воздушные и кабельные ЛЭП [46, 41, 97], силовые трансформаторы [101, 2, 7, 45], электродвигатели [77, 91], устройства компенсации реактивной мощности, силовые полупроводниковые комплексы [10] и другие. Но обычно, эти модели рассматриваются отдельно друг от друга и не применяются в комплексе для подробного рассмотрения режимов узлов нагрузок.

Переходные режимы в узлах нагрузок распределительных сетей обусловлены коммутацией нагрузок и аварийными режимами. В силу нелинейности нагрузок, например двигателей и полупроводниковых

преобразовательных установок, переходные процессы имеют сложный характер и с трудом поддаются аналитическому описанию (работы И. А. Сыромятникова, В. А. Веникова, Н. И. Соколова, Ю. Е. Гуревича, М.И. Слударжа, В.М. Пупина, С. И. Гамазина и др.) [90, 18, 103, 25, 26]. Кроме того, сложность вызывает моделирование распределительных сетей с разными способами заземления нейтрали, которые встречаются в сетях среднего напряжения.

Широко применяемые на практике методы расчета переходных процессов в узлах нагрузки не позволяют с достаточной точностью получить формы кривых тока и напряжения переходных процессов при нелинейности нагрузок и сложных видах повреждений [54, 56, 92, 104]. Обычно при расчетах переходных процессов ведется либо качественный, либо количественный анализ параметров процесса, таких, как действующие значения токов и напряжений, симметричных составляющих, гармонического состава сигналов тока и напряжения, и не рассматривается вся картина переходного процесса в целом, с учетом взаимного влияния элементов узла комплексной нагрузки [96, 92].

В то же время современный рост вычислительных мощностей персональных и промышленных компьютеров приводит к появлению более сложных и интеллектуальных систем управления в СЭС, что требует более детального моделирования при их проектировании, разработке и эксплуатации.

Таким образом, совершенствование методов моделирования и разработка соответствующей методики расчета переходных процессов в узлах комплексных нагрузок с нелинейными элементами является актуальной задачей.

Целью работы является развитие методов моделирования и разработка методики и программ расчета переходных процессов в узлах комплексной нагрузки с нелинейными элементами для повышения эффективности проектирования и эксплуатации СЭС.

Основные задачи:

1. Разработка методики расчета переходных процессов в электрических сетях с нелинейными элементами.
2. Разработка и адаптация моделей элементов СЭС для применения совместно с методикой расчета переходных процессов.
3. Создание программного обеспечения для расчета переходных процессов в СЭС с нелинейными элементами.
4. Моделирование и анализ переходных процессов в узлах комплексной нагрузки.

Объектом исследования являются комплексные узлы нагрузки систем электроснабжения.

Предметом исследования является моделирование переходных процессов на основе синтетических схем замещения постоянного тока в комплексных узлах нагрузки с нелинейными элементами.

Область исследования относится к разработке и внедрению эффективных методик моделирования переходных и установившихся процессов в системах электроснабжения.

Методы исследования. В работе применены методы теоретических основ электротехники, методы математического моделирования, численные методы, методы цифровой обработки сигналов, приемы и подходы функционального программирования.

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием моделей элементов, математического аппарата. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными и теоретическими данными в характерных режимах, докладывались и обсуждались на Всероссийских и Международных научно-практических конференциях.

Соответствие паспорту специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. Объект изучения: электротехнические комплексы и системы генерирования электрической энергии, электропривода, электроснабжения, электрооборудования. Область исследований (п.1):

развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель узла комплексной нагрузки СЭС с нелинейными элементами в фазных координатах, позволяющая исследовать электромеханические и электромагнитные переходные процессы в несимметричных режимах.

2. Методика анализа и расчета переходных процессов в СЭС, позволяющая эффективно учитывать нелинейность нагрузок, различные формы сигналов источников и частотные свойства элементов, а также воздействие регулирующих и управляющих устройств.

3. Результаты исследования простых и каскадных переходных режимов СЭС с нелинейными и динамически изменяющимися параметрами элементов при различных видах несимметрии.

Научная новизна работы:

1. На основе метода синтетических схем разработана методика и новые алгоритмы для расчета переходных процессов в СЭС с нелинейными элементами.

2. Адаптированы и реализованы модели линейных и нелинейных элементов СЭС в фазных координатах, отличающиеся структурой и составом. В частности – модель индуктивного элемента с учетом нелинейности его характеристики намагничивания и магнитного гистерезиса и динамическая модель асинхронного двигателя (АД) в фазных координатах с учетом эффекта вытеснения тока в обмотках ротора, позволяющая рассчитывать переходные электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе.

3. Разработанные модели и методики позволяют оценить взаимное влияние элементов при переходных процессах в СЭС.

Практическую ценность в работе представляют:

1. Разработанное при помощи предлагаемых алгоритмов программное обеспечение, реализующее расчет стационарных и переходных электромагнитных и электромеханических процессов с применением моделей нелинейных элементов СЭС, может быть использовано при проведении инженерных и исследовательских расчетов в электроэнергетике:

а) предприятиями электротехнического профиля, занимающимися разработкой электротехнических комплексов и систем в электроэнергетике, для моделирования режимов их работы и режимов участков СЭС, где они применяются,

б) предприятиями, эксплуатирующими электрооборудование СЭС для оценки различных переходных режимов работы энергосистем, перегрузок, перенапряжений, аварийных процессов, выбора параметров устройств РЗА и автоматики.

2. Разработанные методики, модели и программное обеспечение может использоваться в учебном процессе для наглядной демонстрации электромагнитных и электромеханических процессов при обучении электротехническим и электроэнергетическим специальностям.

3. Тематика исследований соответствует приоритетным направлениям науки, технологии и техники в Российской Федерации: энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы представлены и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: IX Всероссийская научно-техническая конференция «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 2011), Международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (Чебоксары, 2012), XXI конференция «Релейная защита энергосистем» (Москва, 2012), II Международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация

электроэнергетических систем России » (Чебоксары, 2013), IX Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке и энергетике», (Чебоксары, 2014), XI Всероссийская научно-техническая конференция «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 2015).

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы для моделирования сложных режимов работы энергосистем для разработки новых устройств релейной защиты на предприятиях, ЗАО «НПФ «Современные технологии», ЗАО «ПИК ЭЛБИ», что подтверждается актами о внедрении. На программное обеспечение, созданное в ходе работы, получено два свидетельства о государственной регистрации.

Публикации. Основные результаты работы отражены в 16 научных работах, в том числе, в 4-х статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК, 2-х свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, сборниках научных работ и докладах на конференциях.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (120 наименований), и приложений (5 страниц), включает в себя 159 страниц машинного текста, 105 рисунков и 7 таблиц.

ГЛАВА 1 КРАТКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА И МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ СЭС

1.1 Общая информация о моделях узлов нагрузок систем электроснабжения

Узлы комплексной нагрузки в СЭС являются объединением потребителей на разных уровнях передачи и распределения электроэнергии [65]. В данной работе рассматриваются узлы комплексной нагрузки в распределительных сетях систем промышленного электроснабжения.

Для моделирования элементов распределительных сетей обычно используются простые схемы замещения. Чаще всего задача моделирования сетей и нагрузок указанного класса напряжения сводится к расчету установившегося режима для задач РЗА, определения потерь электроэнергии и оптимизации режимов работы электрооборудования [19, 46, 74, 75, 98]. Такие модели не отличаются высокой детализацией и служат для оценки векторов действующих значений токов и напряжений в линиях, обобщенной нагрузке и трансформаторах подстанций. В большинстве случаев расчет несимметричных режимов узлов нагрузки ведется в базисе симметричных составляющих [100, 96].

Нагрузка обычно заменяется эквивалентным сопротивлением или проводимостью, исходя из ее активной и реактивной мощности [19, 46]. При моделировании линий электропередачи (воздушной или кабельной) учитывается только реактивная и активная составляющая сопротивления проводников. Трансформаторы моделируются упрощенными Т - или Г - образными схемами замещения. При таком подходе параметры участков СЭС разных классов напряжения приводят к одному классу напряжения, что бы исключить идеальные трансформаторы из модели [19, 46, 75, 98]. После формирования схемы замещения участка энергосистемы (узла нагрузки), схема рассчитывается одним из известных методов теоретических основ

электротехники (ТОЭ) [36, 12, 6]. Для оценки пиковых значений токов при электромагнитных переходных процессах во время коротких замыканий на участках передачи и потребления электроэнергии используются комплексные схемы замещения для переходных режимов [96, 97] и специальные методики, основанные на применении эмпирических коэффициентов и заранее полученных типовых кривых [15, 46, 105]. Описание этих методик дано в литературе по расчету параметров срабатывания устройств РЗА, выбора аппаратов и проводников и по их проверке на термическую и динамическую стойкость. Учет сложного гармонического состава величин токов и напряжений в сети производится путем рассмотрения влияния отдельных гармоник на работу электрооборудования [96].

В отечественной и зарубежной литературе широко описаны модели отдельных элементов нагрузок и сетей, таких как воздушные и кабельные ЛЭП, силовые трансформаторы, электродвигатели, устройства компенсации реактивной мощности, силовые полупроводниковые комплексы и другие [62, 96, 11, 7, 45, 109, 114, 118]. Но обычно, эти модели применяются изолированно и недостаточны для подробного рассмотрения режимов узлов нагрузок и их взаимного влияния.

Нужно отметить, что подробные модели элементов СЭС не применяются для рассмотрения процессов в сетях среднего и низкого напряжения. Они считаются избыточными для получения действующих значений токов и напряжений установившегося режима [19, 46, 105, 53]. Считается также, что учет взаимных индуктивностей и емкостей между проводниками фаз только усложняет расчет и не дает видимой разницы в результатах. Кроме того, чаще всего, в случае продольной и поперечной несимметрии, расчет ведется в базисе симметричных составляющих, где, в силу допущений, многие факторы не учитываются.

Модели двигателей обычно представляют аналогично моделям трансформаторов, Т- или Г-образной схемами замещения, с учетом

сопротивления цепи ротора изменяющегося в зависимости от скольжения двигателя [1, 23, 47, 52]. Эти модели рассчитаны на применение действующих значений токов и напряжений, и по сути являются статическими моделями, эквивалентирующими двигатель как статическую нагрузку, поскольку, как правило, применяются при расчете установившихся процессов. Динамические модели элементов требуют описания поведения объекта моделирования при переходе из одного состояния в другое. Чаще всего они описываются дифференциальными уравнениями [114, 118, 115].

Задача расчета переходных процессов в узлах комплексных нагрузок затруднена в силу отсутствия доступных методик ее решения. Для решения задачи расчета переходных процессов в энергосистемах существуют программные и программно-аппаратные комплексы, например: RTDS, PS-CAD, Opal-RT, Matlab/Simulink и другие. Но данные комплексы в своем большинстве имеют недостатки, ограничивающие их использование, такие, как высокую стоимость, различные ограничения при расчетах и составлении моделей, узкий или специализированный функционал, не позволяющий адекватно использовать их для задач расчета переходных процессов в узлах комплексных нагрузок СЭС.

В данной работе представлена модель узла комплексной нагрузки в базисе фазных координат. Применены динамические модели отдельных нагрузок, в частности, асинхронных двигателей. Учтены разные уровни напряжения на первичной и вторичной обмотках силовых трансформаторов, за счет применения моделей с учетом действительных коэффициентов трансформации. Применение базиса фазных координат дает возможность легко учитывать различную конфигурацию трехфазных сетей, групп соединения обмоток трансформаторов и различные виды несимметрии в трехфазной системе, а также режимы заземления нейтрали. Применение не характерных для исследуемого класса напряжения 6 – 35 кВ моделей линий электропередач позволило более точно исследовать процессы в узлах нагрузок и смежных сетях с учетом режимов заземления нейтрали.

1.2 Методы расчета переходных процессов в электрических цепях

В трудах Лосева С.Б. и Чернина А.Б. [97] приведена методика расчета переходных процессов в трехфазных цепях переменного тока. Это инженерная методика на основе операционного исчисления. Она дает результат в виде суммы принужденной и свободной составляющей переходного процесса. Авторы считают, что такое представление результатов удобно для инженерных расчетов, поскольку позволяет одновременно анализировать и влияние переходного процесса на измерительные органы релейной защиты и автоматики.

Метод основывается на следующих основных допущениях:

1. Принимается, что все элементы расчетной схемы линейны;
2. Сопротивления источников и нагрузок не изменяются во времени;
3. Сопротивления прямой и обратной последовательности всех элементов системы принимаются одинаковыми.

Анализ проводится исходя из предположения, что ток и напряжение предшествующего режима имеют принужденную составляющую промышленной частоты и ряд свободных составляющих, если к моменту исследуемой коммутации переходной процесс от предыдущей коммутации не успел завершиться.

При ненулевых начальных условиях, используется принцип наложения. Это позволяет привести систему к нулевым начальным условиям. Данный подход применяется к месту коммутации выключателя или ветви короткого замыкания и основывается на включении в этом месте ветви с двумя источниками напряжения равными по модулю и различными по знаку. Так в месте коммутации в начальный момент времени напряжение равно нулю.

Таким образом, напряжение $U_{пр}$ в месте последующей коммутации равно напряжению предшествующего режима в этой точке. В сумме с напряжением генераторов это напряжение составляют условия предшествующего режима. Токи и напряжения дополнительного режима

появляются сразу после коммутации и обусловлены включением в точку коммутации напряжения $-U_{\text{пр}}$.

Полностью режим переходного процесса описывается сложением токов и напряжений предшествующего режима с токами и напряжениями дополнительного режима.

Для расчета этим методом переходных процессов (ПП) в месте приложения возмущающей силы $g(t)$, т.е. источника напряжения или тока в виде незатухающей синусоиды промышленной частоты ω_f с начальным углом φ

$$g(t) = G_M \sin(\omega_H t + \varphi)$$

исходной является формула операторного включения:

$$f(t) = \frac{G_M}{|H_{\Sigma}(j\omega_H)|} \sin(\omega_H t + \varphi - \theta_H) + \sum_{s=1}^m \frac{G_M \cos(\varphi + \psi_{as})}{\sqrt{\delta_{as}^2 + \omega_H^2} |H'_{\Sigma}(-\delta_{as})|} e^{-\delta_{as} t} +$$

$$+ \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2G_M e^{-\delta_s t} \left[\sqrt{\delta_s^2 + \omega_s^2} \sin \varphi \sin(\omega_s t + \psi_{Ts} - \xi_s) - \omega_H \cos \varphi \cos(\omega_s t + \xi_s) \right]}{\left[(\omega_s^2 - \omega_H^2 - \delta_s^2)^2 + (2\delta_s \omega_s)^2 \right]^{1/2} |H'_{\Sigma}(p_s)|}$$

где первый член описывает принужденную составляющую, второй – сумму свободных апериодических составляющих, а третий член – сумму свободных периодических составляющих ПП.

Для определения амплитуд отдельных составляющих находят входное сопротивление системы $H_{\Sigma}(j\omega_H) = H_{\Sigma}(p)$, при этом нули функции $H_{\Sigma}(p)$ являются частотами свободного колебания в системе. $H'_{\Sigma}(p)$ – первая производная функции $H_{\Sigma}(p)$.

Нахождение нулей функции $H_{\Sigma}(p)$ возможно графоаналитическими, аналитическими и численными методами.

Расчет несимметричных режимов сетей данным методом подразумевает использование метода симметричных составляющих.

Данная методика имеет следующие недостатки:

- она плохо поддается автоматизации расчетов на ЭВМ,

- накладывает ограничения на линейность элементов и статичность их характеристик.

На практике широко применяется метод переменных состояния [35], являющийся универсальным для любых систем, описываемых дифференциальными уравнениями. Суть метода, применительно к электрическим системам, состоит в том, что в любой электрической цепи, как в динамической системе, переход из одного состояния в другое во времени характеризуется изменением ее энергетического состояния. При анализе электрических систем, в качестве искомым параметров, или переменных состояния, выбирают те величины, которые характеризуют текущее энергетическое состояние этой цепи. Это позволяет минимизировать количество переменных в решаемой системе дифференциальных уравнений и свести решение к анализу дифференциальных уравнений первого порядка. Выбор переменных состояния обусловлен невозможностью мгновенного изменения энергии в условиях конечной мощности, т.е. инерционностью электрических систем.

В электрических цепях инерционность характеризуется изменением электромагнитной энергии в индуктивных и емкостных элементах. Система дифференциальных уравнений, описывающая эти процессы, определяется наличием и числом этих элементов. Эти уравнения составляются исходя из уравнений энергетического состояния элементов цепи.

Переменные, характеризующие энергетическое состояние реактивных элементов выглядят следующим образом: для индуктивностей это потокосцепление или ток (Ψ или i_L), а для емкостей это заряд или напряжение (q или u_L). Выделение этих переменных в качестве переменных состояния позволяет записать уравнения состояния (дифференциальные уравнения) в нормальной форме, т.е. в виде дифференциальных уравнений первого порядка содержащих производные.

При расчете переходных процессов в электрических цепях методом переменных состояний с помощью матрично-топологических методов

выходным параметром является матрица зависимости искомой величины (тока или напряжения) от времени.

В общем случае ДУ записываются в виде:

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u,$$

$$y = \mathbf{C}x + \mathbf{D}u,$$

где \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} и \mathbf{D} – матрицы, описывающие структуру и параметры рассматриваемой системы; y – матрица искомого величин; u – матрица воздействий; x – матрица переменных состояний. Для нахождения матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} и \mathbf{D} по исходным данным существуют специальные методы. Уравнения состояния решаются методами, пригодными для решения задачи Коши для систем дифференциальных уравнений.

Метод переменных состояния широко применяется в практике и лишен недостатков, описанных ранее, но его применение для сложноразветвленных многоконтурных и многоузловых электрических систем не оправдано в силу необходимости составления большой системы дифференциальных уравнений и решения ее целиком. Поэтому ведется поиск других способов эффективного анализа таких систем в переходных режимах.

1.3 Обзор существующих программных решений для расчета и моделирования СЭС

Программное обеспечение (ПО) для электрических расчетов и анализа режимов энергосистем может быть разделено на 2 класса инструментов:

- коммерческое ПО;
- учебное или исследовательское ПО.

Коммерческое ПО существует у различных производителей и различных версий: PSS/E, EuroStag, SimPow, Digsilent Power Factory, Etap, Power World, CAPE, CYME и подобные, разработанные по концепции «все в одном». Философия разработчиков этого ПО – полное тестирование и высокая вычислительная эффективность. Несмотря на их завершенность, эти

продукты - громоздкие и дорогие для учебных и исследовательских целей. Что более важно, коммерческое ПО закрыто, другими словами, не позволяет изменять исходный код или добавлять свои алгоритмы. Для исследовательских целей, гибкость и легкость применения новых моделей и алгоритмов – это более важный фактор, нежели вычислительная эффективность. С другой стороны, существует много программ с открытыми ресурсами, сосредоточенных на отдельных аспектах исследования энергосистем. Как, например, пакет UWPFLOW, имеющий очень мощный алгоритм для анализа перетоков мощности.

1.3.1 Модели и алгоритмы

Здесь перечислены наиболее распространенные способы анализа СЭС.

1. Интегрирование дифференциальных уравнений систем и компонентов по правилу конечных разностей во временной области.

2. Решение дифференциальных уравнений целых энергосистем и систем управлений во временной области (электромагнитные и электромеханические системы). Этот класс вычислительных инструментов разделяется на расчет перетоков мощности, потокораспределения и динамической устойчивости, использующих уравнения установившихся процессов для представления электрических цепей (электромагнитных систем) и решающих дифференциальные уравнения для электромеханических систем.

3. Расчеты на основе пакетов с решателями с фиксированным шагом и множеством алгоритмов с варьируемым шагом в зависимости от поставленной задачи.

4. Интегрированные интерактивные инструменты с однолинейными схемами СЭС и инструментами анализа данных.

5. Решение характеристических уравнений и другие методы.

1.3.2 Классификация ПО

А) Свободное открытое ПО:

- UWPFLOW;
- Voltage Stability Toolbox (VST) - PC/Unix Version;
- SPS (SimPowerSystems);
- PSAT (Power system Analysis Tool);
- PSAP (Power System Analysis Program);
- PST (Power System Toolbox);
- PAT (Power Analysis Toolbox);
- MATPOWER;
- MATEMTP (Matlab Electromagnetic Transient Program);
- EST (Educational Simulation Tool);
- ATP (Alternative Transient Program);
- PCFLO and PCFLOH;
- Intelligent Systems in Power Systems;
- Powertech;
- PSAT - PowerFlow & Short circuit Analysis Tool;
- VSAT - Voltage Security Assessment Tool;
- TSAT - Transient Security Assessment Tool;
- SSAT - Small Signal Analysis Tool;
- CDT - Control Design ToolBox;

Б) Коммерческое ПО

- CYME (CYME INTERNATIONAL INC. USA-Canada);
- PSS/E (Power Technologies, INC. Canada);
- EuroStag (Tractebel, EDF Electric France Belgium - France);
- Simpow (STRI from ABB);
- PSCAD (Manitoba HVDC Research Centre Inc. Canada);
- DigSilent PowerFactory (DigSILENT GmbH Germany);

- PowerWorld (PowerWorld Corporation - Canada);
- MATLAB/SIMULINK;
- ASPEN;
- EMTP-RV (TransÉnergie Technologies Hydro-Québec group);
- EMTP96 (DCG/EPRI EMTP User);
- NEPLAN (BCP-Suiza);
- CAPE (Electrocon - USA);
- SKM POWER TOOLS (SKM Systems Analysis, Inc. USA);
- RTDS Simulator (RTDS Technologies Inc. Canada);
- ETEP (Operation Technologies, Inc. USA);
- EDSA (EDSA Micro Corporation USA);
- SPARD Power (Energy Computer System, Inc.);
- CDEGS (SES – USA);
- ERACS - Power Systems Analysis Software (ERA Technology Ltd. UK).

1.3.3 Краткое резюме по проанализированным программным продуктам

Пакет SPS (SymPowerSystems) позволяет рассчитывать модель электрической цепи по методу переменных состояния. Это производится составлением стандартных матриц A , B , C , D для переменных состояния системы и составлением уравнений состояния. Нелинейные элементы моделируются источниками тока управляемыми напряжением на нелинейном элементе.

На входе системы задаются источники напряжения и тока и источники тока нелинейных элементов. На выходе системы получается вектора токов и напряжений на элементах и напряжения на нелинейных элементах.

АТР (Alternative Electromagnetic Program) – это наиболее широко используемая программа для расчета электромагнитных переходных процессов в мире. Данный пакет является универсальной программной системой для цифрового моделирования переходных процессов

электромагнитной и электромеханической природы. Эта система позволяет моделировать сложные сети и системы управления в них. Кроме расчета переходных процессов АТР имеет множество дополнительных полезных вычислительных средств. Эта программа распространяется бесплатно по запросу к разработчикам. Данное ПО является закрытым.

Другие свободно распространяемые программы - это программы для анализа перетоков мощности и потокораспределения, коротких замыканий и анализа гармонического состава сигналов. Они имеют различные особенности, связанные со спецификой задач, встречающейся в подобном ПО. Например, расчет потерь мощности в трансформаторах и ЛЭП. Но эти программы не имеют полноценной возможности изучать переходные электромагнитные и электромеханические переходные процессы.

Коммерческое ПО, например PSCAD, EMTP-RV, NEPLAN, MATLAB/SIMULINK и другие, обладают большим потенциалом в плане расчета переходных процессов, полноты моделей элементов энергосистем и методов расчета и анализа. Но эти пакеты и комплексы имеют высокую стоимость, рассчитанную на приобретение их крупными организациями, и закрытый исходный код. Зачастую, производитель скрывает особенности алгоритмов и моделей, применяемых при расчете, и приводит только сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных для подтверждения адекватности результатов. Отсутствие прозрачности полученного результата затрудняет применение данных продуктов в исследовательских целях.

В силу описанных выше факторов, создание отечественного продукта с известными алгоритмами и возможностью их дальнейшего совершенствования и оценки полученных промежуточных результатов необходимо и крайне полезно для исследовательских и учебных целей. В данной работе созданы программное обеспечение, реализующее алгоритмы расчета переходных процессов разработаны и адаптированы для него соответствующие модели элементов СЭС.

Выводы по главе 1

1. Известные и широко применяемые методики расчета переходных процессов в электрических системах плохо подходят для автоматизированного расчета на ЭВМ сложных переходных электромагнитных и электромеханических процессов в разветвленных СЭС с нелинейными элементами.

2. Существующее бесплатное и коммерческое ПО для анализа процессов СЭС, подходящих для поставленных задач, функционалом не позволяет напрямую анализировать адекватность примененных моделей и полученных результатов моделирования, поскольку имеет закрытый исходный код. Коммерческое ПО имеет высокую стоимость, что ограничивает его в применении для исследовательских и учебных целей.

3. Создание отечественного программного продукта с известными алгоритмами, возможностью их дальнейшего совершенствования и оценки полученных промежуточных результатов необходимо и может быть очень полезно для исследовательских и учебных целей.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЭС

Для моделирования и расчета переходных процессов в цепях, содержащих нелинейные элементы, удобно использовать численные алгоритмы, такие, как алгоритм Доммеля [111], который позволяет рассчитывать переходные процессы в электрических цепях путем расчета резистивных схем для дискретных моментов времени [35]. В отечественной литературе этот подход носит название метода синтетических схем. Его преимущества состоят в следующем: он не накладывает ограничений на форму сигналов источников, на линейность характеристик элементов, на применение управляемых элементов в схеме и способы управления ими. Этот алгоритм достаточно прост в реализации.

2.1 Расчет переходных процессов методом сведения к синтетическим схемам

Методика, использующая сведение расчета переходного процесса в электрической цепи переменного тока к расчету синтетических схем постоянного тока для дискретных моментов времени [35].

Методика разделяется на несколько основных этапов, на которых осуществляется:

1. Аппроксимация дифференциальных уравнений отдельных элементов цепи разностными уравнениями, с которыми сопоставляют резистивные синтетические схемы.
2. На каждом шаге расчета формируются системы алгебраических уравнений соответствующих синтетическим схемам замещения цепей.
3. Решение систем алгебраических уравнений полученных на предыдущем этапе.

Проиллюстрируем разностную аппроксимацию уравнений накопительных элементов электрической цепи:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}, u_L = L \frac{di_L}{dt},$$

где C – емкость, Ф; L – индуктивность, Гн; i_L и i_C – токи в индуктивности и емкости, u_C и u_L – напряжения на емкости и индуктивности. Согласно методу трапеций имеем:

$$\frac{u_{L_{n+1}} + u_{L_n}}{2} = \frac{i_{L_{n+1}} - i_{L_n}}{h} L \Rightarrow u_{L_{n+1}} = \frac{2L}{h} i_{L_{n+1}} - \frac{2L}{h} i_{L_n} - u_{L_n}; \quad (1)$$

$$\frac{i_{C_{n+1}} + i_{C_n}}{2} = \frac{u_{C_{n+1}} - u_{C_n}}{h} C \Rightarrow u_{C_{n+1}} = \frac{h}{2C} i_{C_{n+1}} + \frac{h}{2C} i_{C_n} + u_{C_n}, \quad (2)$$

где $u_{L_{n+1}}$ – напряжение на индуктивности в момент времени $t = t_{n+1}$, $i_{L_{n+1}}$ и i_{L_n} – ток в индуктивности в моменты времени $t = t_{n+1}$ и $t = t_n$ соответственно, $i_{C_{n+1}}$ – ток в емкости в момент времени $t = t_{n+1}$, $u_{C_{n+1}}$ и u_{C_n} – напряжение на емкости в моменты времени $t = t_{n+1}$ и $t = t_n$ соответственно, h – шаг дискретизации.

Полученные выражения определяют двухполюсники, состоящие из сопротивлений $R_L = \frac{2L}{h}$, $R_C = \frac{h}{2C}$ и ЭДС $E_C = u_{C_n} + \frac{h}{2C} i_{C_n}$, $E_L = \frac{2L}{h} i_n + u_{L_n}$ соединенных последовательно (рисунок 2.1). Используя формулы (1) и (2) на $n + 1$ шаге расчета для нахождения параметров схем, представленных на рисунке 2.1, получим схемы замещения накопительных элементов на данном шаге расчета. Затем, из полученных схем замещения соответствующих элементов составим схему той же топологической структуры, что и исходная, и рассчитаем ее любым методом, например, контурных токов или узловых потенциалов.

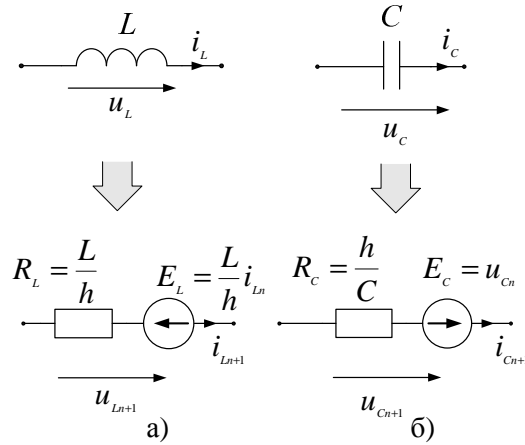


Рисунок 2.1 – Переход от реактивного элемента к резистивной схеме замещения по алгоритму Доммеля: а – для индуктивности, б – для емкости

Проиллюстрируем приемы макромоделирования для эквивалентирования ветви с взаимной индуктивностью (рисунок 2.2).

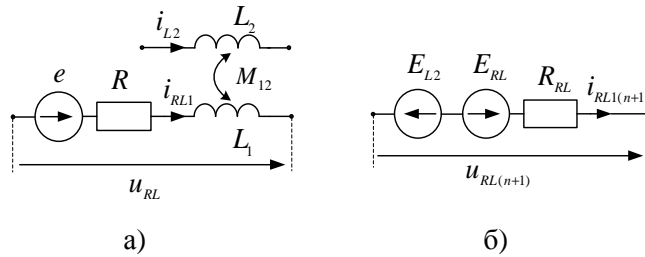


Рисунок 2.2 – Ветвь, индуктивно связанная с соседней : а – схема ветви; б – эквивалентная резистивная схема

$$-u_{RL} = -e + i_{RL1}R + L_1 \frac{di_{RL1}}{dt} + M_{12} \frac{di_{L2}}{dt}, \quad (3)$$

При аппроксимации методом трапеций уравнения (3), составленного для контура содержащего ветвь с взаимной индуктивностью, получим уравнение:

$$u_{RL(n+1)} = u_{RL(n)} + e_{n+1} + e_n + i_{RL1(n)} \left(\frac{2L}{h} - R \right) + \frac{2M_{12}}{h} i_{L2(n)} - \\ - i_{RL1(n+1)} \left(\frac{2L}{h} + R \right) - \frac{2M_{12}}{h} i_{L2(n+1)}, \quad (4)$$

где M_{12} – взаимная индуктивность, Гн.

Резистивная схема, соответствующая выражению (4), приведена на рисунке 2.2, б. В этой схеме:

$$E_{RL} = u_{RL(n)} + e_{n+1} + e_n + i_{RL1(n)} \left(\frac{2L}{h} - R \right) + \frac{2M_{12}}{h} i_{L2(n)}, \quad R_{RL} = \frac{2L}{h} + R.$$

Заметим, что при наличии индуктивной связи выражение для E_{RL} включает в себя дополнительный член $\frac{2M_{12}}{h}i_{L2(n)}$, позволяющий учесть влияние ЭДС взаимной индукции на предыдущем шаге расчета. Кроме того, схема содержит дополнительную ЭДС: $E_{L2} = \frac{2M_{12}}{h}i_{L2(n+1)}$, с помощью которой в схеме учитывается взаимное влияние ветвей друг на друга на текущем шаге расчета.

Таким образом, алгоритм машинного расчета переходных процессов в линейных электрических цепях описан. Он включает в себя следующие основные шаги:

1. Построение синтетических схем для реактивных элементов цепи, под которыми понимаются новые ветви для емкостей и индуктивностей, состоящие из ЭДС и активного сопротивления.
2. Составление схемы исследуемой цепи с применением полученных синтетических схем отдельных элементов.
3. Последовательный расчет полученной схемы с дискретным шагом по времени и учет коммутаций на соответствующих шагах.

2.2 Расчет схем с нелинейными элементами

При расчете переходных процессов в нелинейных цепях с применением алгоритма Доммеля предлагается использовать следующий подход:

1. На каждом шаге расчета по времени находится первое приближение параметров синтетических схем элементов и токов с напряжениями в исследуемой схеме без учета нелинейности элементов.
2. При помощи численных методов решения систем нелинейных уравнений находятся уточненные значения параметров синтетических схем элементов и токов с напряжениями в исследуемой схеме, с учетом нелинейной ВАХ элементов.

В данной работе в качестве численного метода решения системы нелинейных уравнений используется алгоритм Ньютона-Рафсона [8, 71]. Суть

метода состоит в том, что на каждом шаге уточнения значения корня x_{k+1} нелинейного уравнения $F(x)=0$, осуществляется разложение функции в ряд Тейлора, в котором ограничиваются сохранением только линейных членов ряда. В результате получим выражение:

$$F(x_{k+1}) \approx F(x_k) + F'(x_k)h_k, \quad (5)$$

где $h_k = x_{k+1} - x_k$ – приращение переменной. Если принять, что уточненное значение корня близко к истинному (при котором уравнение 5 обращается в тождество), то приближенное значение искомого приращения корня будет:

$$h_k = -F(x_k) / F'(x_k),$$

тогда:

$$x_{k+1} = x_k - h_k = x_k - F(x_k) / F'(x_k).$$

Следует отметить особенность подхода к расчету схем с несколькими нелинейными элементами, примененного в данной работе. Если в схеме присутствует несколько нелинейных элементов, то при формировании уравнений, например, по методу узловых напряжений, получается система нелинейных уравнений [34]. Размерность этой системы растет с увеличением количества нелинейных элементов, а, следовательно, растет и сложность составления уравнений. В данной работе применен другой подход, дающий те же результаты, что и вышеописанный, но исключающий составление сложных систем нелинейных уравнений.

Суть подхода состоит в том, что алгоритм Ньютона-Рафсона применяется не к составленной системе уравнений цепи, а непосредственно к уравнению или характеристике каждого элемента. Для ВАХ элемента, выраженной в аналитическом виде $i = f(u)$, алгоритм Ньютона-Рафсона дает для тока $i_{k+1} = f(u_{k+1})$ на $(k+1)$ -м шаге выражения:

$$i_{k+1} = f(u_k) + f'(u_k)(u_{k+1} - u_k) = i_k - g_k u_k + g_k u_{k+1} = i_{0k} + g_k u_{k+1}, \quad (6)$$

где u_k – значение напряжения на k -м шаге приближения, в окрестности которого произведено разложение в ряд Тейлора; $g_k = f'(u_k)$ – эквивалентная проводимость на k -м шаге приближения, равная значению производной,

$i_{0k} = i_k - g_k u_k$ вычисляется по значениям тока и напряжения на предыдущем шаге приближения.

При задании характеристики элементов в форме $u_{k+1} = f(i_{k+1})$ выражение (6) преобразуется к виду:

$$u_{k+1} = f(i_k) + f'(i_k)(i_{k+1} - i_k) = u_k - r_k i_k + r_k i_{k+1} = u_{0k} + r_k i_{k+1}, \quad (7)$$

где i_k – значение тока на k -м шаге приближения, в окрестности которого произведено разложение в ряд Тейлора; $r_k = f'(i_k)$ – эквивалентное активное сопротивление на k -м шаге приближения, равное значению производной, $u_{0k} = u_k - r_k i_k$ вычисляется по значениям тока и напряжения на предыдущем шаге приближения.

Выражению (7) на $k+1$ шаге можно поставить в соответствие эквивалентную схему, состоящую из источника ЭДС с напряжением $u_{0k} = u_k - r_k i_k$ и активного сопротивления $r_k = f'(i_k)$, соединенных последовательно (рисунок 2.3). Параметры элементов этой схемы определяются на каждом шаге уточнения, исходя из величин напряжения и тока на предыдущем шаге, а так же ВАХ элемента. Таким образом, для каждого нелинейного элемента можно составить дискретную линеаризованную схему на каждом шаге итерации для данного момента времени.

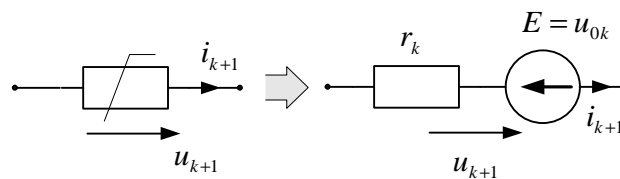


Рисунок 2.3 – Резистивная схема для нелинейного элемента на k -й итерации приближения

Предлагаемая методика хорошо сочетается с алгоритмом Доммеля, поскольку на каждом шаге расчета переходного процесса по времени, в соответствии с указанным алгоритмом, элемент рассчитываемой схемы заменяется резистивной схемой замещения, состоящей из сопротивления и ЭДС. Подставляя в расчет по алгоритму Доммеля линеаризованную схемную модель

для каждого нелинейного элемента, получаем методику численного расчета переходных процессов в схемах с нелинейными элементами.

Таким образом, предлагаемая методика состоит из следующих основных этапов:

1) переходные процессы в линейной схеме рассчитываются по времени с определенным шагом путем сведения расчетов к чисто резистивным схемам в соответствии с алгоритмом Доммеля;

2) для нелинейных элементов с заданной ВАХ составляется линеаризованная схема замещения в виде схемной модели алгоритма Ньютона-Рафсона. Параметры этой схемы уточняются итерационно для каждого момента времени при расчете по алгоритму Доммеля.

Производные функций описывающей ВАХ элемента можно найти численно в окрестности точки x_k по выражению: $f'(x_k) = \frac{\Delta f(x_k)}{\Delta x_k}$.

2.3 Алгоритм программы расчета переходных процессов

По описанным в данной главе алгоритмам создано программное обеспечение NLETransSim [72, 73], позволяющее проводить расчет переходных процессов в электрических цепях. Блок-схема алгоритма показана на рисунке 2.4. В блок-схеме приняты следующие условные обозначения: t – переменная времени в модели; t_{\max} – максимальное значения времени в модели, когда моделирование прекращается; $[Y]$ – инвертированная матрица сопротивлений; $[A]$ – матрица соединений в соответствии с методом узловых потенциалов; $[Y1]$ – матрица узловых проводимостей; $[E]$ – матрица ЭДС ветвей; $[U]$ – матрица узловых напряжений; $[Ubr]$ – матрица напряжений ветвей схемы; $[Ibr]$ – матрица токов ветвей схемы.

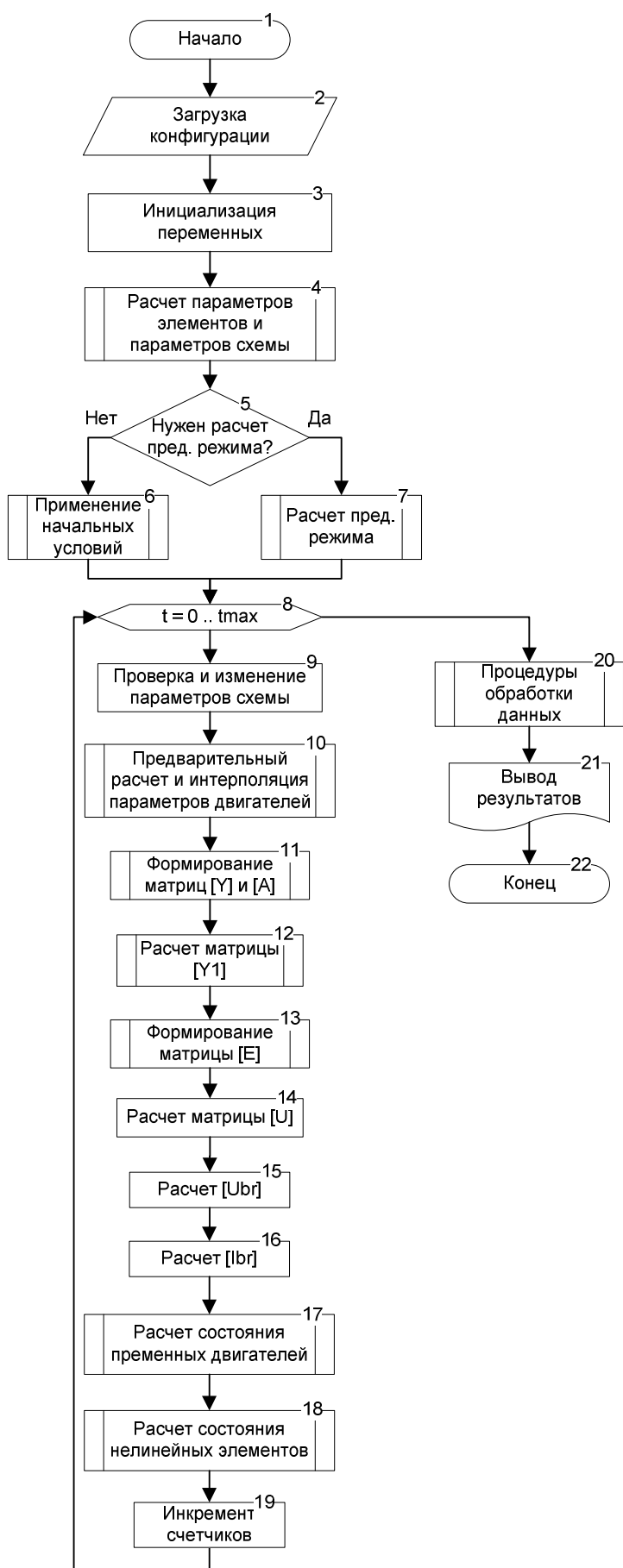


Рисунок 2.4 – Блок схема программы расчета переходных процессов NLETransSim

2.3.1 Описание блоков программы

2. *Загрузка конфигурации.* В данном блоке происходит загрузка параметров схемы: информации о количестве ветвей, узлов схемы, типах элементов, характеристик элементов, связях между ветвями схемы, параметров моделирования.

3. *Инициализация переменных.* В данном блоке происходит инициализация рабочих и служебных переменных программы. Определение размеров массивов данных. Заполнение массивов данных значениями по умолчанию. Расчет количества шагов моделирования.

4. *Расчет параметров элементов и параметров схемы.* Здесь рассчитываются параметры схем замещения элементов. Рассчитываются параметры схем двигателей, трансформаторов, начальные приближения для нелинейных элементов.

5. *Нужен расчет пред. режима?* В данном блоке производится проверка на необходимость расчета предшествующего режима перед началом переходного процесса. Этот параметр задается в конфигурации перед началом моделирования. Следует заметить, что схемы с некоторыми элементами не позволяют производить расчет из предшествующего режима, они требуют начала моделирования из нулевых начальных условий, т.е. когда напряжения и токи в ветвях без источников равны нулю. Такое ограничение вносят модели двигателей, и нелинейных элементов, поскольку расчет предшествующего режима происходит для действующих значений токов и напряжений, а переходные процессы по алгоритму Доммеля рассчитываются для мгновенных значений. Таким образом, затруднительно рассчитать предшествующий режим с целью задания начальных условий для электрических двигателей, поскольку это требует не только расчета токов и напряжений в ветвях схемы, но и точного определения угла положения ротора и угловой скорости для момента начала расчета переходного процесса. Аналогичная ситуация имеет место и для модели индуктивного элемента с учетом перемагничивания в сердечнике, поскольку текущее значение намагниченности сердечника является интегральной функцией

по времени от всех предыдущих состояний намагниченности. Аналогичные проблемы возникают при необходимости задания предшествующего режима для большинства схем с нелинейными элементами. В общем случае, задача определения предшествующего режима для нелинейной схемы не тривиальна, поскольку методика расчета действующих значений с применением комплексных чисел заведомо накладывает ограничение на линейность элементов схемы и требует наличия в сигналах источников только основной гармоники. Линейные схемы позволяют производить расчет при начальных условиях, соответствующих предшествующему установившемуся режиму работы схемы, поскольку мгновенные значения токов и напряжений однозначно определяются из значений векторов в комплексной форме для любого момента времени.

6. *Применение начальных условий.* В данном блоке в качестве начальных условий применяются значения токов и напряжений в ветвях и узлах схемы в момент времени $t = 0$ с. от начала процесса моделирования. Начальные условия могут быть нулевыми или заданными пользователем в конфигурации модели.

7. *Расчет пред. режима.* Расчет предшествующего режима линейной схемы производится методом узловых напряжений в комплексной форме для установившегося режима её работы. Затем из значений векторов токов и напряжений в комплексной форме вычисляются мгновенные значения для нулевого момента времени и присваиваются в качестве начальных условий для расчета переходного процесса.

8. Этот блок служит для организации цикла по времени. Расчет переходного процесса длится до тех пор, пока значение модельного времени t не станет больше значения t_{\max} заданного в конфигурации.

9. *Проверка и изменение параметров схемы.* Данный блок предназначен для произведения изменений в параметрах схемы в определенные моменты модельного времени. Например, коммутация ключей, изменение параметров сопротивлений и других параметров ветвей, если это предусмотрено планом виртуального эксперимента.

10. *Предварительный расчет и интерполяция параметров двигателей.* На данном шаге производится интерполяция значений переменных описывающих механическое состояние двигателя (угловая скорость и угол поворота ротора), которые принимаются как первое приближение этих параметров на данном шаге расчета. В зависимости от этих значений производится пересчет значений взаимных индуктивностей статор-ротор и присвоение этих значений соответствующим переменным. Рассчитывается механический момент сопротивления на валу двигателей, если его характеристика задана переменной.

11. *Формирование матриц [Y] и [A].* На данном этапе производится расчет сопротивлений резистивных схем замещения элементов в соответствии с алгоритмом Доммеля. Формируются матрица \mathbf{Y} - инвертированная матрица сопротивлений и матрица \mathbf{A} - матрица соединений в соответствии с методом узловых потенциалов для резистивной схемы.

12. *Расчет матрицы [Y1].* Расчет матрицы $\mathbf{Y}_1 = (\mathbf{A} \times \mathbf{Y} \times \mathbf{A}^T)^{-1}$ - матрицы узловых проводимостей.

13. *Формирование матрицы [E].* Данная функция выполняет формирование матрицы ЭДС \mathbf{E} в соответствии с методом узловых потенциалов и дополняет ее значениями ЭДС для реактивных элементов схемы на данном шаге расчета по времени, в соответствии с алгоритмом Доммеля.

14. *Расчет матрицы [U].* Данная функция выполняет расчет матрицы узловых напряжений \mathbf{U} по выражению $\mathbf{U} = -\mathbf{Y}_1 \times \mathbf{A} \times \mathbf{Y} \times \mathbf{E}$ для резистивной схемы замещения на текущем шаге расчета по времени.

15. *Расчет матрицы [Ubr].* Данная функция рассчитывает матрицу значений напряжений ветвей \mathbf{U}_{br} резистивной схемы замещения по выражению $\mathbf{U}_{br} = \mathbf{A}^T \times \mathbf{U}$ в соответствии с методом узловых потенциалов.

16. *Расчет матрицы [Ibr].* Данная функция рассчитывает матрицу значений токов ветвей \mathbf{I}_{br} резистивной схемы замещения на текущем шаге расчета по времени в соответствии с выражением $\mathbf{I}_{br} = \mathbf{Y} \times \mathbf{U} + \mathbf{Y} \times \mathbf{E}$ в соответствии с методом узловых потенциалов.

17. *Расчет состояния переменных двигателей.* В данном блоке производится уточнение состояния механических переменных электрических двигателей в соответствии с токами и напряжениями в их ветвях для данного шага расчета по времени. Производится расчет мгновенных значений электромагнитного момента на валу каждого двигателя в зависимости от токов в обмотках и угла поворота ротора. Уточняется угловая скорость вращения двигателей на текущем шаге расчета и угол поворота ротора в зависимости от результирующего момента на валу. Подробнее об этом рассказано в параграфе 3.5.

18. *Расчет состояния нелинейных элементов.* Данный блок выполняется, только если в схеме есть элементы с нелинейной по току или напряжению характеристикой. На данном этапе производится итерационный расчет для нелинейных элементов. В ходе расчета уточняются токи и напряжения элементов по методу Ньютона-Рафсона, как описано в параграфе 2.2. Расчет ведется до достижения определенной точности, после чего, значения принимаются верными, и рассчитываются новые параметры схемы замещения элементов для дальнейшего расчета. Если в модели есть индуктивные элементы, в которых учитывается нелинейность кривой намагничивания сердечника, то на каждом шаге производится расчет индуктивностей с учетом нелинейности кривой намагничивания. Подробнее об этом алгоритме и особенностях такой модели индуктивного элемента рассказано в параграфе 3.4.

19. *Инкремент счетчиков.* На данном шаге инкрементируются счётчики программы, индексируется переменная текущего модельного времени t и происходит переход к следующему шагу расчёта по времени.

20. *Процедуры обработки данных.* Здесь происходит обработка данных, полученных при моделировании и подготовка их к выводу. Производится выборка значимых данных, переформирование массивов данных для удобного вывода. При необходимости производится обработка данных моделирования посредством различных процедур анализа, например, выявление спектров

сигналов, получение расчетных сигналов, таких, как симметричные составляющие.

21. *Вывод результатов.* В данном блоке производится сохранение необходимых данных и вывод результатов на экран в виде численной или графической информации.

2.4 Пример работы методики расчета переходных процессов

Для примера работы методики рассмотрим случай коммутации цепи на рисунке 2.5. Данная цепь содержит ветви с индуктивностями, и при коммутации ключа S1 происходит нарушение закона коммутации [6, 12, 36] (ток в индуктивности не может измениться скачком). Как результат, в месте коммутации

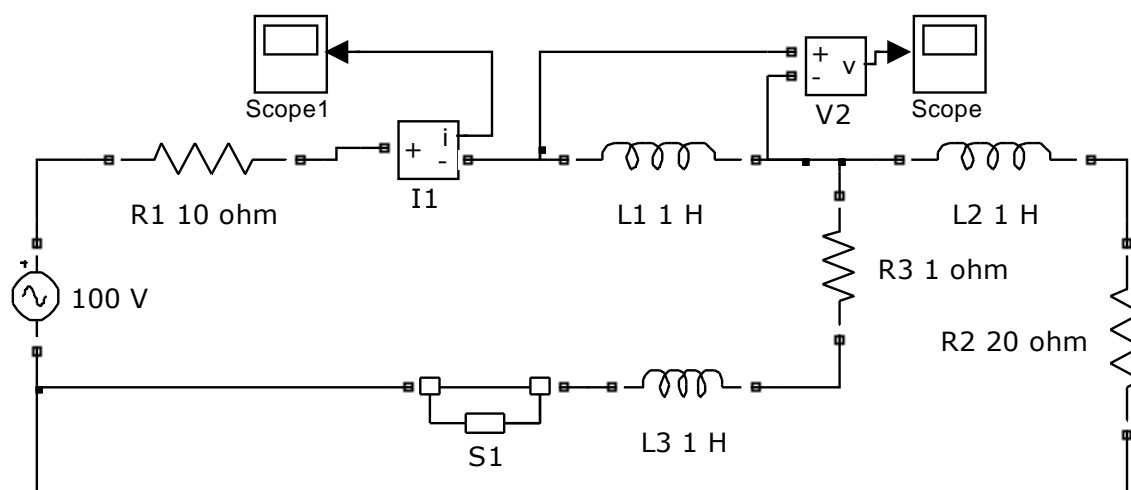


Рисунок 2.5 – Схема исследуемой электрической цепи в Simulink

возникают сильные перенапряжения. В реальности, энергия, запасенная в индуктивностях, уходит на образование электрической дуги или распределяется через паразитные элементы. При моделировании линейных электрических цепей, содержащих только ключи, эти перенапряжения будут зависеть от модели ключа. Алгоритм Доммеля позволяет изменять параметры элементов в любой момент на временном участке моделирования. Его применение подразумевает, что самой простой моделью ключа является активное сопротивление, изменяемое скачком. Таким образом, при отключении ключа в схеме на рисунке 5 все перенапряжение

от индуктивностей будет прикладываться к этому сопротивлению. Коммутацию можно проводить при любых значениях токов и напряжений в ветвях и узлах моделируемой цепи. Для сравнения рассмотрим процесс моделирования той же цепи в среде Simulink. Ключ S1 моделируется элементом Breaker [99]. Следует отметить, что модели управляемых ключей в среде Simulink чувствительны к включению их последовательно с индуктивностями (это не относится моделям полупроводниковых элементов) [99]. Алгоритм работы элемента Breaker устроен так, что коммутация происходит только в моменты перехода сигнала через ноль. Такой подход не позволяет получить адекватную картину переходного процесса для рассматриваемой схемы. Графики токов и напряжений в ветвях показаны на рис 2.6. Они получены посредством среды Simulink и программы NLETransSim. Параметры моделей, вводимые в обе программы одинаковы. Момент коммутации в обоих случаях 0,025 с.

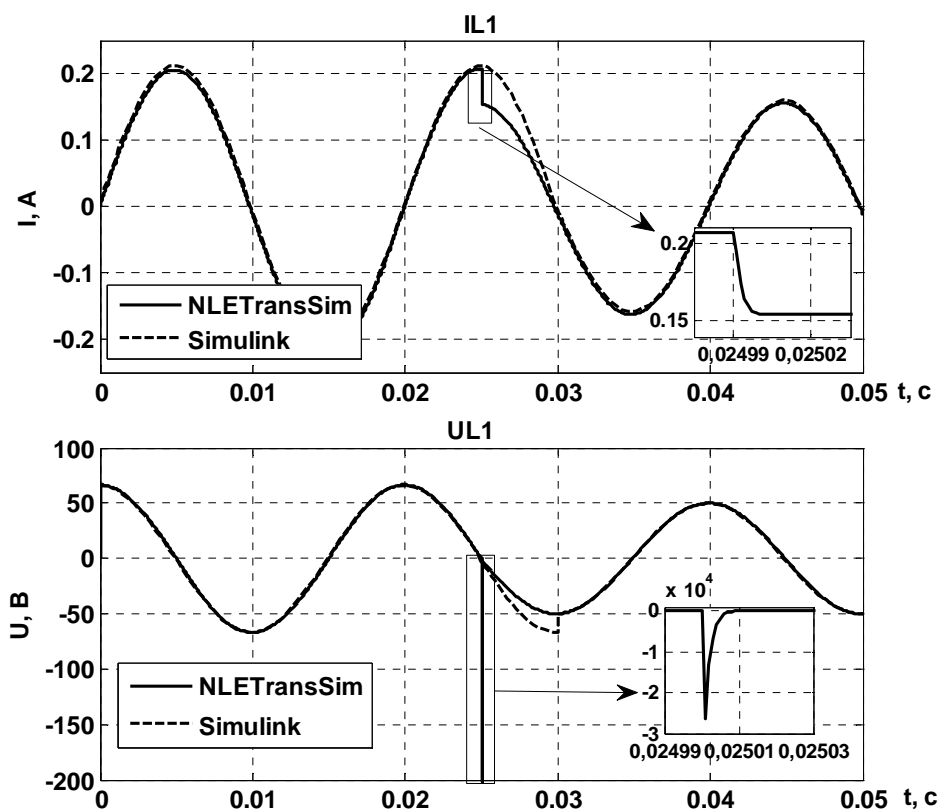


Рисунок 2.6 – Графики токов и напряжений индуктивности L1, полученные при помощи программ Matlab/Simulink и NLETransSim

Как видно из графиков тока, полученных в среде Simulink, коммутация происходит не в заданный момент времени 0,025 с, а в 0,03 с, когда ток в ветви

ключа переходит через ноль. На графиках, полученных при расчетах с применением алгоритма Доммеля видно, что коммутация происходит в нужный момент. График напряжения в ветви ключа иллюстрирует наличие перенапряжения в момент размыкания ключа, что в большей степени соответствует законам физики при указанных допущениях, нежели в программе Simulink.

2.5 Пример моделирования переходного процесса при повреждении воздушной линии электропередач

В данном параграфе описаны результаты моделирования переходных процессов при коротком замыкании на высоковольтной линии электропередач (ВЛ) номинального напряжения 110 кВ. В ходе работы были смоделированы трехфазные и однофазные на землю короткие замыкания в различных частях исследуемой ВЛ. Условная схема этой ВЛ показана на рисунке 2.7.

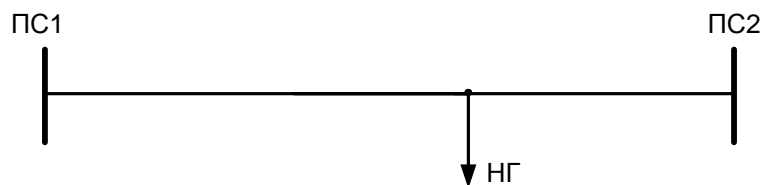


Рисунок 2.7 – Схематическое изображение исследуемой ВЛ 110 кВ

Исследуемая линия электропередач имеет двухстороннее питание от подстанций ПС1 и ПС2. Протяженность линии составляет 114,2 км. Марка провода: АС-150/24, тип опор линии: ПБ110-15. На расстоянии 79,6 км от ПС1 расположена ответвительная подстанция НГ. Она представлена двумя параллельно соединенными трансформаторами типа ТДНТ-16000/110 с номинальной нагрузкой, $\cos\phi$ нагрузки равен 0,8.

Для расчета переходного процесса в любом энергообъекте необходимо составить его схему замещения. В первой главе была описана методика составления схем замещения различных объектов для расчета установившегося режима по методу симметричных составляющих. Эти подходы можно применить

для составления схем замещения по методу фазных координат (учесть непосредственно в схеме трехфазную структуру). Такой подход не отличается особой точностью полученной модели из-за допущения симметричности всех объектов [61, 41, 48], но упрощает расчет параметров схем замещения. Следует отметить, что полученной точности достаточно для оценки характера процессов, протекающих при различных коммутациях в исследуемой цепи.

Для составления более полной модели линии с распределенными параметрами существуют методы, позволяющие учесть несимметричное расположение проводов фаз, уточнить влияние токов, протекающих через землю и т.д. Исследование и применение таких методов выходит за рамки данной работы.

Однородный участок линии электропередач заменим тремя П-образными схемами – по одной для каждой фазы (рисунок 2.8-а). Для получения модели всей линии электропередач, такие схемы соединяются в цепочку, путем соединения соответствующих концов П-схем. Полученная модель при расчете переходных процессов будет обладать конечным дискретным спектром частот собственных колебаний. Напомним, что реальная линия с распределенными параметрами обладает бесконечным непрерывным спектром [35]. Спектр синтетической схемы замещения тем ближе к реальному, чем больше количество участков, на которые разбита моделируемая линия. Увеличение частоты разбиения на участки позволяет учесть более высокие частоты колебаний и делает спектр более насыщенным на всем протяжении, но резко увеличивает размерность схемы и количество необходимых вычислений.

Условные обозначения на рисунке 2.8: $\underline{Z}_{\phi,Л}$ – продольное сопротивление в схеме замещения участка ВЛ, $\underline{Z}_{ЛЗ}$ – сопротивление емкостной ветви на землю в схеме замещения участка ВЛ, M_{ϕ} – индуктивная связь между продольными ветвями в схеме замещения участка ВЛ, \underline{Z}_H – сопротивление одной фазы ветви нагрузки, \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C – ЭДС фаз питающей системы, \underline{Z}_C – комплексное

сопротивление одной фазы питающей системы, M - индуктивные связи между ветвями фаз питающей системы.

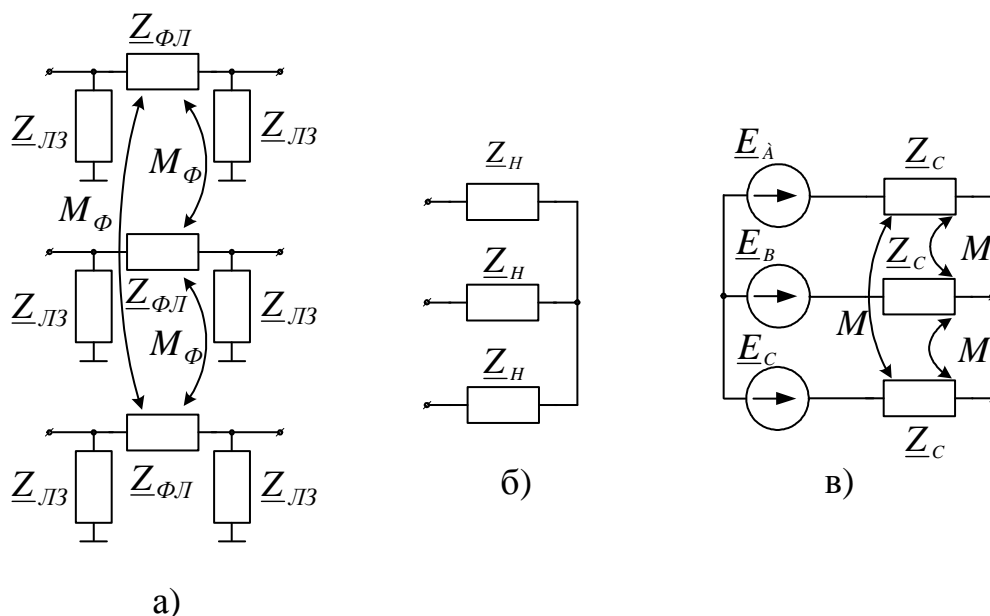


Рисунок 2.8 – Схемы замещения энергообъектов: а – участка ЛЭП (П - схема); б – нагрузки линии; в – питающей системы

Ответвительную подстанцию заменим эквивалентным сопротивлением, рассчитанным при последовательном соединении сопротивления трансформатора и его нагрузки. При этом трехфазная схема замещения будет состоять из трех ветвей с сопротивлением Z_H , соединенных в звезду (рисунок 2.8-б).

Питающие системы обычно заданы параметрами прямой и обратной последовательности. Для получения фазных значений можно использовать следующие выражения [61, 62]:

$$\underline{Z}_\phi = \frac{1}{3}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0), \quad (8)$$

где \underline{Z}_ϕ – комплексное сопротивление фазы, \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_0 – сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательности эквивалентной питающей системы соответственно. Поскольку по методу симметричных составляющих $Z_1 = Z_2$, то выражение (8) приобретает вид:

$$\underline{Z}_\phi = \frac{2\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}{3}. \quad (9)$$

Получим выражение для нахождения индуктивной связи между ветвями [21]:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_\phi - \underline{Z}_M, \quad (10)$$

где \underline{Z}_M – сопротивление индуктивной связи между ветвями фаз, с учетом (9) получим:

$$\underline{Z}_M = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{3}. \quad (11)$$

Зная комплексные сопротивления ветвей можно построить схему замещения объекта, состоящую из элементов R , L и C , пригодную для применения метода описанного в параграфе 2.1. При этом действительная составляющая комплексного сопротивления \underline{Z}_M [61] не учитывается в схеме замещения. В схеме будет присутствовать только мнимая часть \underline{Z}_M , характеризующая индуктивную составляющую. Схема замещения питающей системы приведена на рисунке 2.8-в. Схема замещения питающей системы состоит из источников ЭДС фаз \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C и сопротивлений каждой фазы источника \underline{Z}_C , связанных между собой индуктивными связями M , значение которых рассчитывается по формулам (9) и (11).

Зная параметры прямой и нулевой последовательности для участка ЛЭП, можно составить трехфазную модель этого участка и учесть в схеме замещения индуктивные связи M_ϕ между фазами (рисунок 2.8-а). Для этого нужно воспользоваться формулами (9) и (11) для каждого элемента П-образной схемы замещения и построить трехфазную схему для всего участка. Получившаяся схема замещения (рисунок 2.8-а) состоит из продольного сопротивления линии $\underline{Z}_{\phi L}$ и эквивалентного емкостного сопротивления на землю $\underline{Z}_{ЛЗ}$.

Различные виды коротких замыканий на участке ЛЭП моделируются путем добавления ветви замыкания между соответствующими узлами в схеме замещения ВЛ. Схемы участков ЛЭП с однофазным и трехфазным коротким замыканием на землю показаны на рисунках 2.9 и 2.10 соответственно.

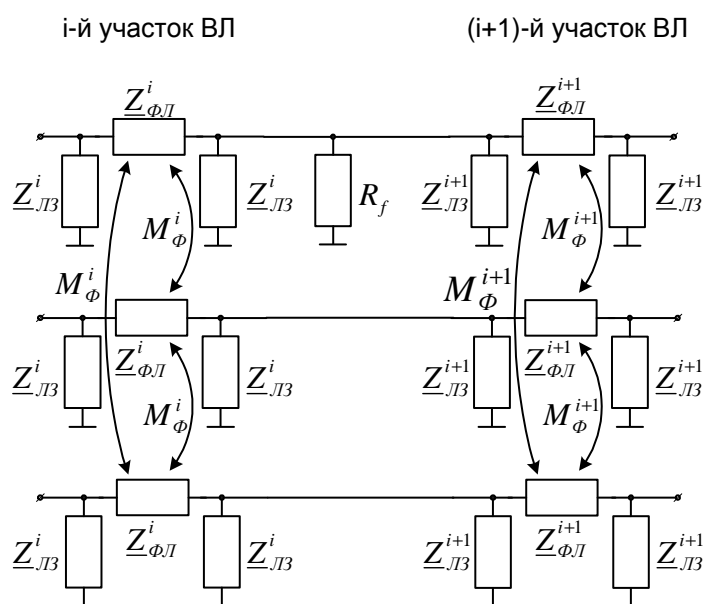


Рисунок 2.9 – Схема замещения участка ЛЭП с однофазным коротким замыканием на землю

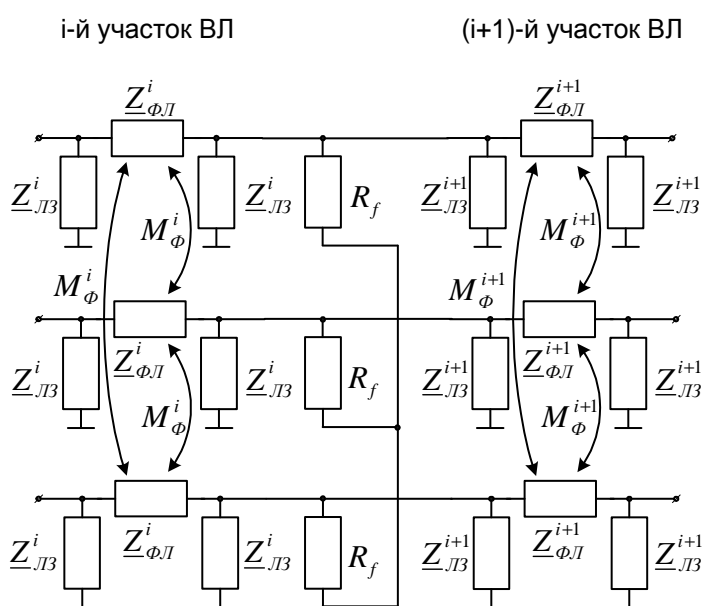


Рисунок 2.10 – Схема замещения участка ЛЭП с трехфазным коротким замыканием

Условные обозначения на рисунках 2.9 и 2.10: R_f – переходное сопротивление замыкания, $Z_{\Phi L}^i$ – продольное сопротивление в схеме замещения i -го участка ВЛ, $Z_{ЛЗ}^i$ – сопротивление емкостной ветви на землю в схеме замещения i -го участка ВЛ, M_{Φ}^i – индуктивная связь между продольными ветвями в схеме замещения i -го участка ВЛ.

Для исследования переходных процессов в линии электропередач были составлены две модели с разными длинами участков заменяемых П-схемами. Первая модель составлена при разделении ВЛ на участки по 10 км, вторая - разделением на участки по 1 км.

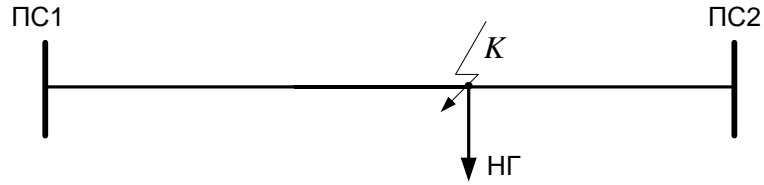


Рисунок 2.11 – Схематическое изображение места к.з. на исследуемой ВЛ

Полученные зависимости напряжений и токов в фазах при моделировании трехфазного короткого замыкания в точке K (рисунок 2.11) показаны на рисунках 2.12 и 2.13. Данные графики приведены для модели линии с разбиением на участки по 10 км. Угол передачи системы ПС1 равен 5° .

На графиках (рисунки 2.12 и 2.13) показан переходный процесс при коммутации, вызванной замыканием через 20 мс после начала моделирования. Из графиков (рисунок 2.12) видно, что помимо изменения амплитуды сигналов, возникают еще и колебательные процессы на частотах выше промышленной.

Появление высокочастотных колебаний вызвано наличием в цепи множества RLC -контуров, возникающих при последовательном соединении П-схем участков ЛЭП. Колебания напряжения возникают во время разрядки емкостей поперечных ветвей схем замещения участков ВЛ. При этом амплитуда колебаний тока гораздо меньше, чем напряжения, поскольку этому препятствуют индуктивности продольных ветвей П-схем. Кроме того, можно видеть, что в фазе A колебания напряжения и тока минимальны, по сравнению с колебаниями в других фазах потому, что обусловлено положением вектора тока в этой фазе в момент коммутации. Так же можно отметить наличие апериодической составляющей на графиках тока. На рисунке 2.14 для наглядности показан фрагмент графика напряжения в фазе C в увеличенном масштабе.

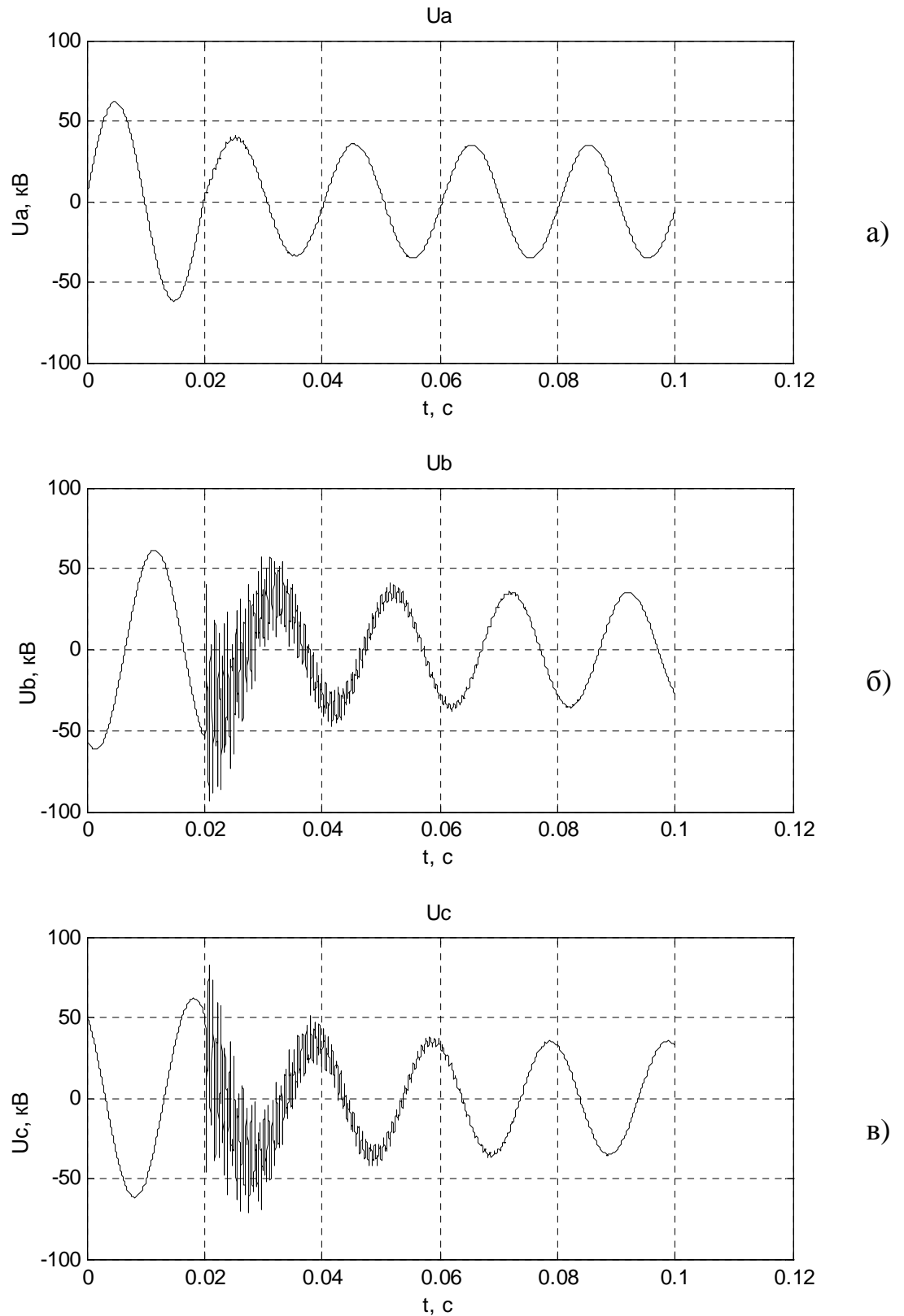


Рисунок 2.12 – Графики линейного напряжения в фазах на шинах питающей системы ПС1 при моделировании трехфазного короткого замыкания в точке K . а – напряжение фазы A , б – напряжение фазы B , в – напряжение фазы C

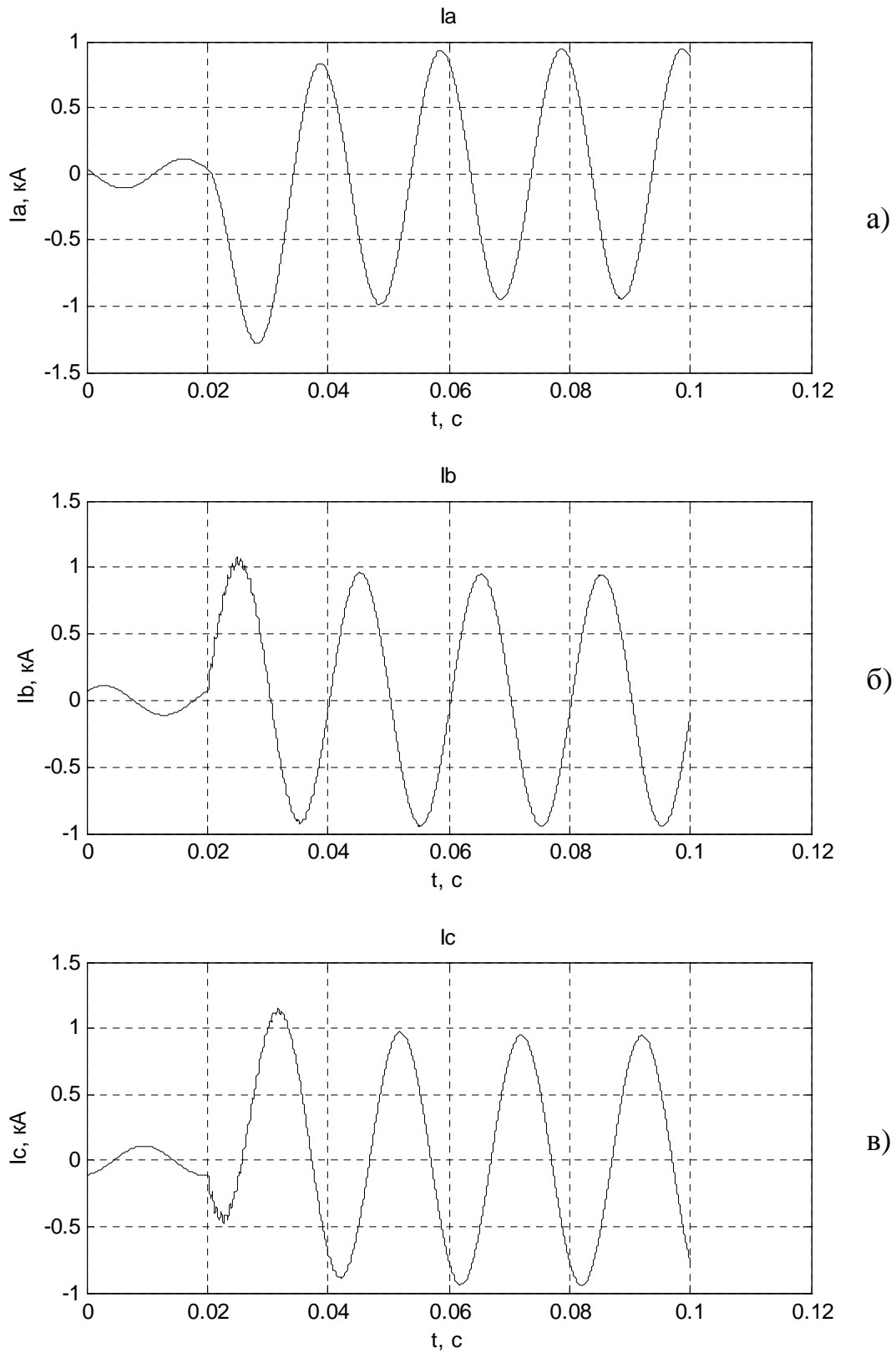


Рисунок 2.13 – Графики токов в фазах на шинах питающей системы ПС1 при моделировании трехфазного короткого замыкания в точке K . а – ток фазы A , б – ток фазы B , в – ток фазы C

Рисунок 2.14 иллюстрирует наличие нескольких составляющих высших гармоник в исследуемом сигнале. Каждая гармоника представляет собой собственные колебания отдельно взятого RLC-контура в схеме между местом наблюдения и местом замыкания. Наложение таких колебаний, как видно из графика, дает высокочастотный «шум», амплитуда которого может быть сопоставима с амплитудой основной частоты сети. Такие явления, безусловно, будут влиять на работу измерительных органов различной аппаратуры, в том числе и релейной защиты, где важна амплитуда колебаний только основной частоты.

Следует отметить быстрое затухание всех переходных явлений в схеме из-за наличия активной составляющей сопротивлений всех элементов.

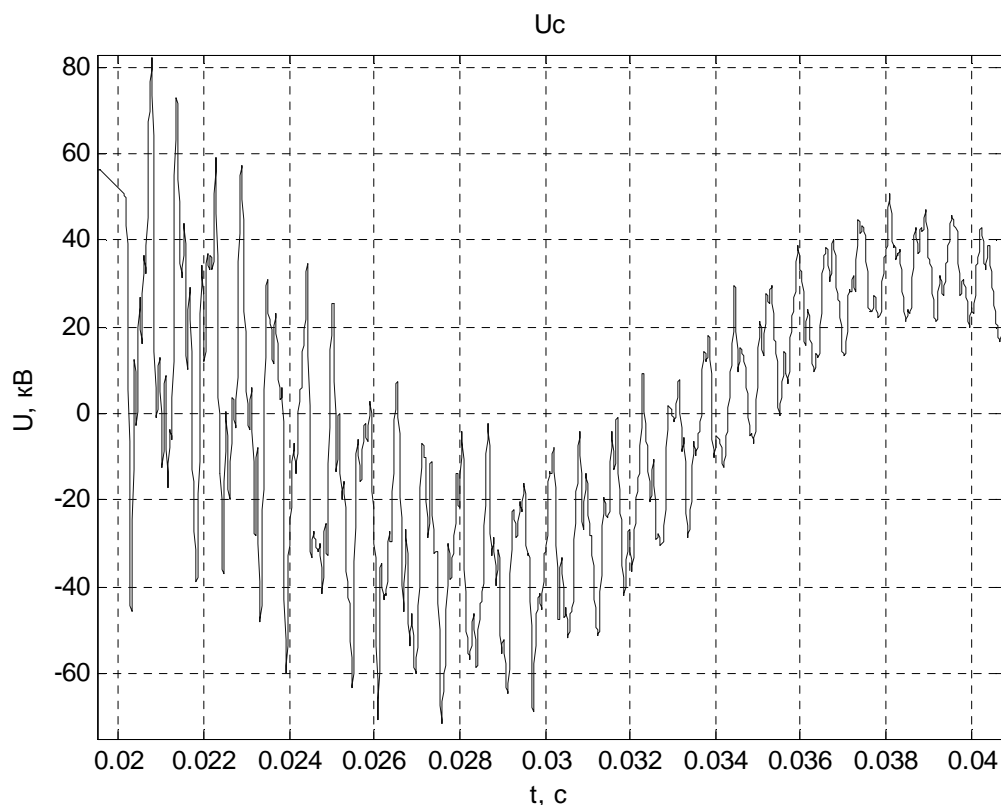


Рисунок 2.14 – График напряжения в фазе С при трехфазном коротком замыкании в точке К в увеличенном масштабе

Для сравнения на рисунках 2.15 и 2.16 приведены графики напряжения фазы С, полученные для того же замыкания, на модели с разбиением на участки по 1 км.

Как видно из графиков (рисунки 2.15 и 2.16), моделирование линии электропередач с разбиением на более мелкие участки позволяет учесть больше высших гармоник в переходном процессе. Это связано с увеличением количества

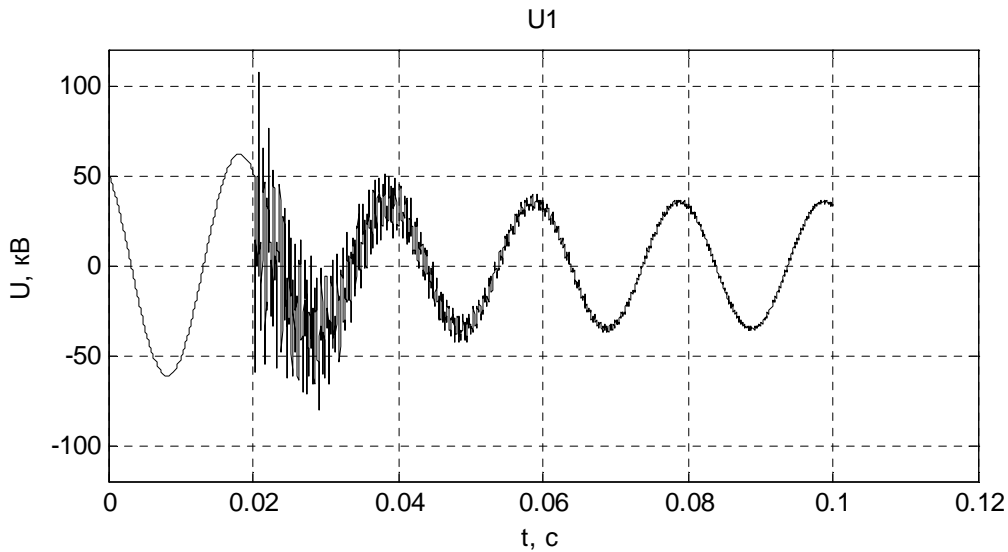


Рисунок 2.15 – График напряжения в фазе C при трехфазном коротком замыкании в точке K для модели с разбиением ВЛ на участки по 1 км

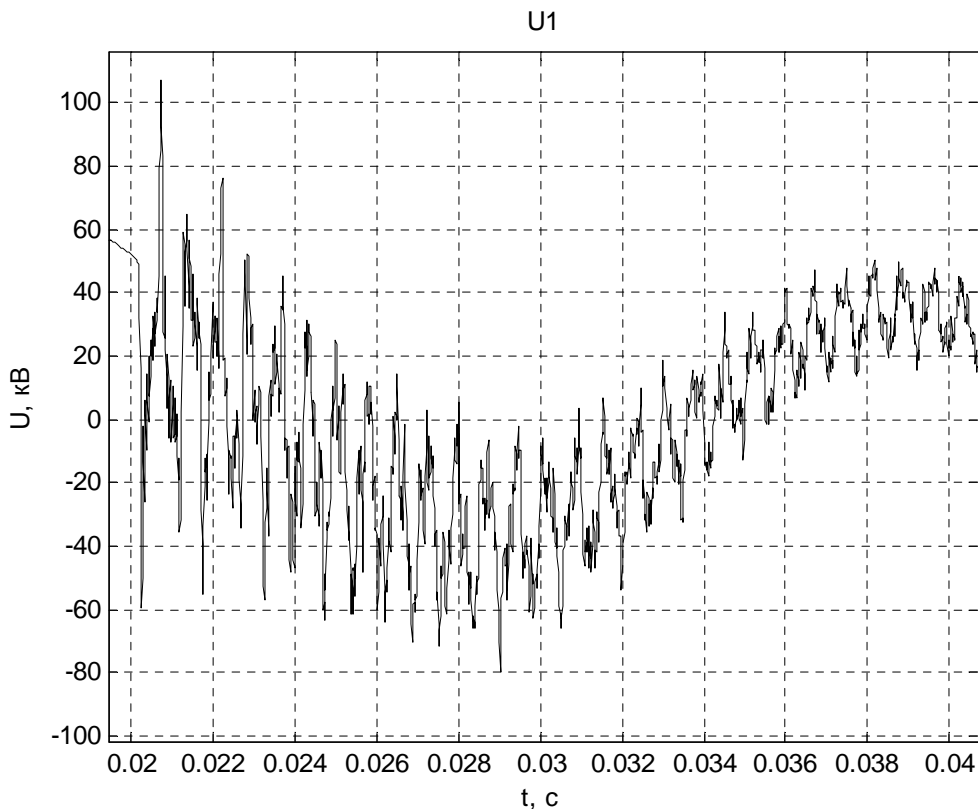


Рисунок 2.16 – График напряжения в фазе C при трехфазном коротком замыкании в точке K для модели с разбиением ВЛ на участки по 1 км в увеличенном масштабе RLC-контуров в схеме. При этом, рассматривая графики, можно заметить, что при

увеличении точности моделирования ВЛ путем увеличения количества участков гармонический состав не изменяется полностью, а только дополняется более высокими частотами.

Следует отметить тот факт, что частота разбиения линии на участки сильно влияет на размерность схемы и, следовательно, на скорость расчета.

Для сравнения гармонического состава сигналов обработаем их дискретным фильтром Фурье [67]. Поскольку высшие гармоники в сигнале быстро затухают, для анализа возьмем первые 20 мс переходного процесса. Результаты обработки приведены на рисунках 2.17 и 2.18 для схем замещения с разбиением участков по 10 км и по 1 км соответственно.

Спектры сигналов полученных на моделях разной степени точности, как можно видеть из рисунков 2.17 и 2.18, похожи. На частотах выше 10 кГц модель с участками по 10 км не имеет собственных частот колебаний, поскольку не образуется замкнутых RLC-контуров способных колебаться на данных частотах.

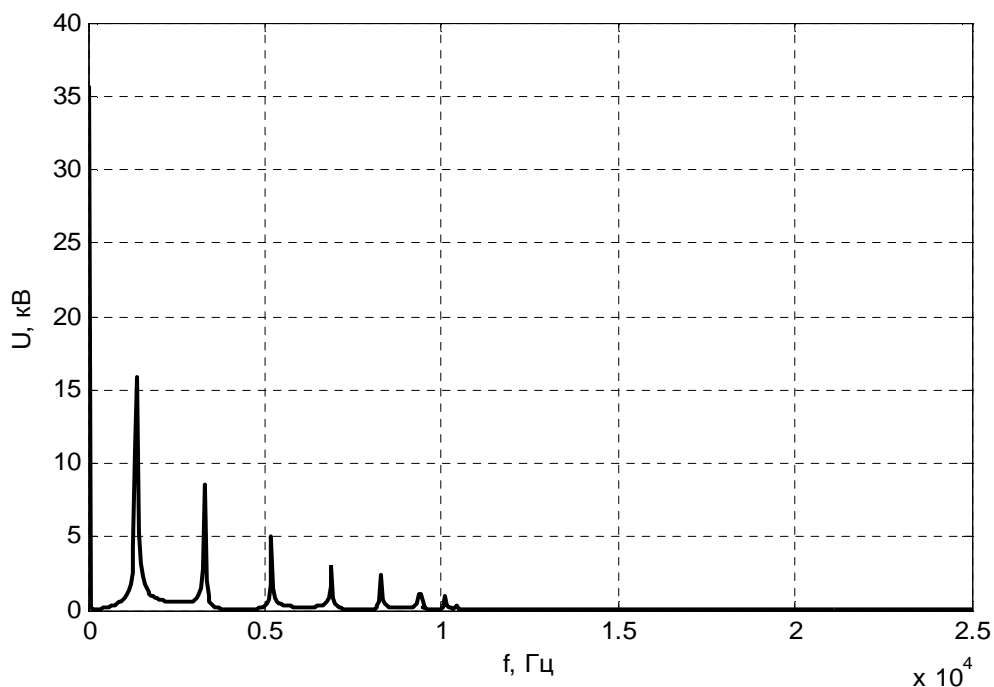


Рисунок 2.17 – Спектр напряжения в фазе *C* при трехфазном коротком замыкании в точке *K* для модели с разбиением ВЛ на участки по 10 км

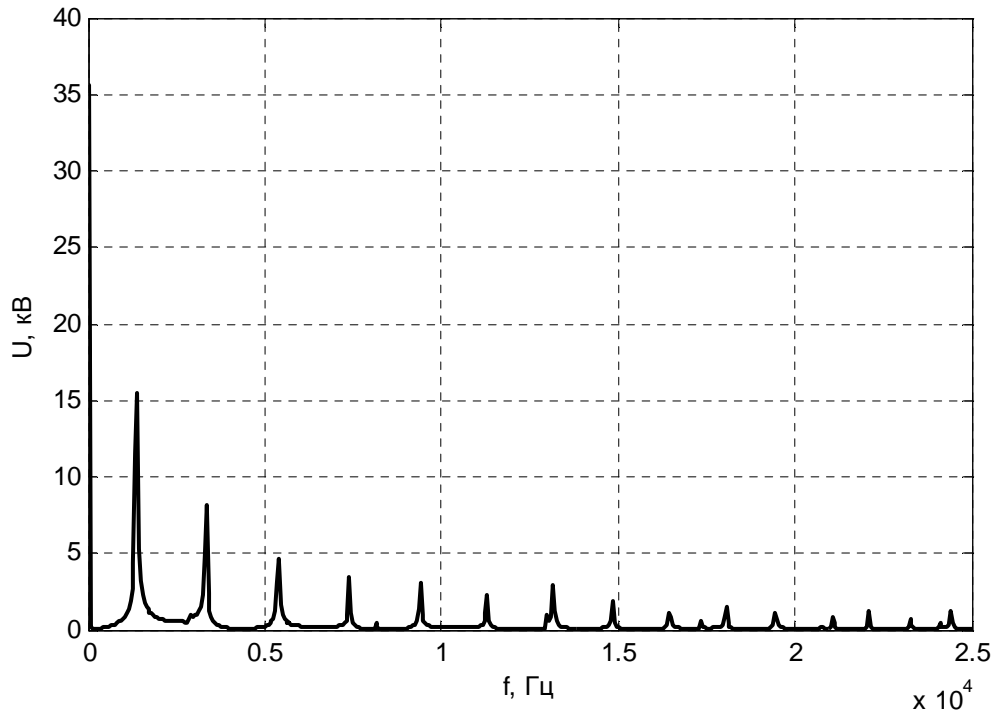


Рисунок 2.18 – Спектр напряжения в фазе C при трехфазном коротком замыкании в точке K для модели с разбиением ВЛ на участки по 1 км

Небольшая разница в спектре на частотах от 5 до 10 кГц может быть вызвана шунтированием одних RLC-контуров другими в модели с участками по 1 км. Кроме того, можно видеть более быстрое затухание амплитуд гармоник в спектре модели меньшей точности.

Следует отметить, что быстрое затухание амплитуды высших гармоник позволяет пренебречь их наличием в большинстве случаев. Исходя из этого, можно сделать вывод об отсутствии целесообразности использования моделей с разбиением на участки меньше 10 км в данной работе, из-за излишней ресурсоемкости такого подхода. В дальнейшем, в работе будет использоваться модель с разбиением линии электропередач на участки длиной 10 км.

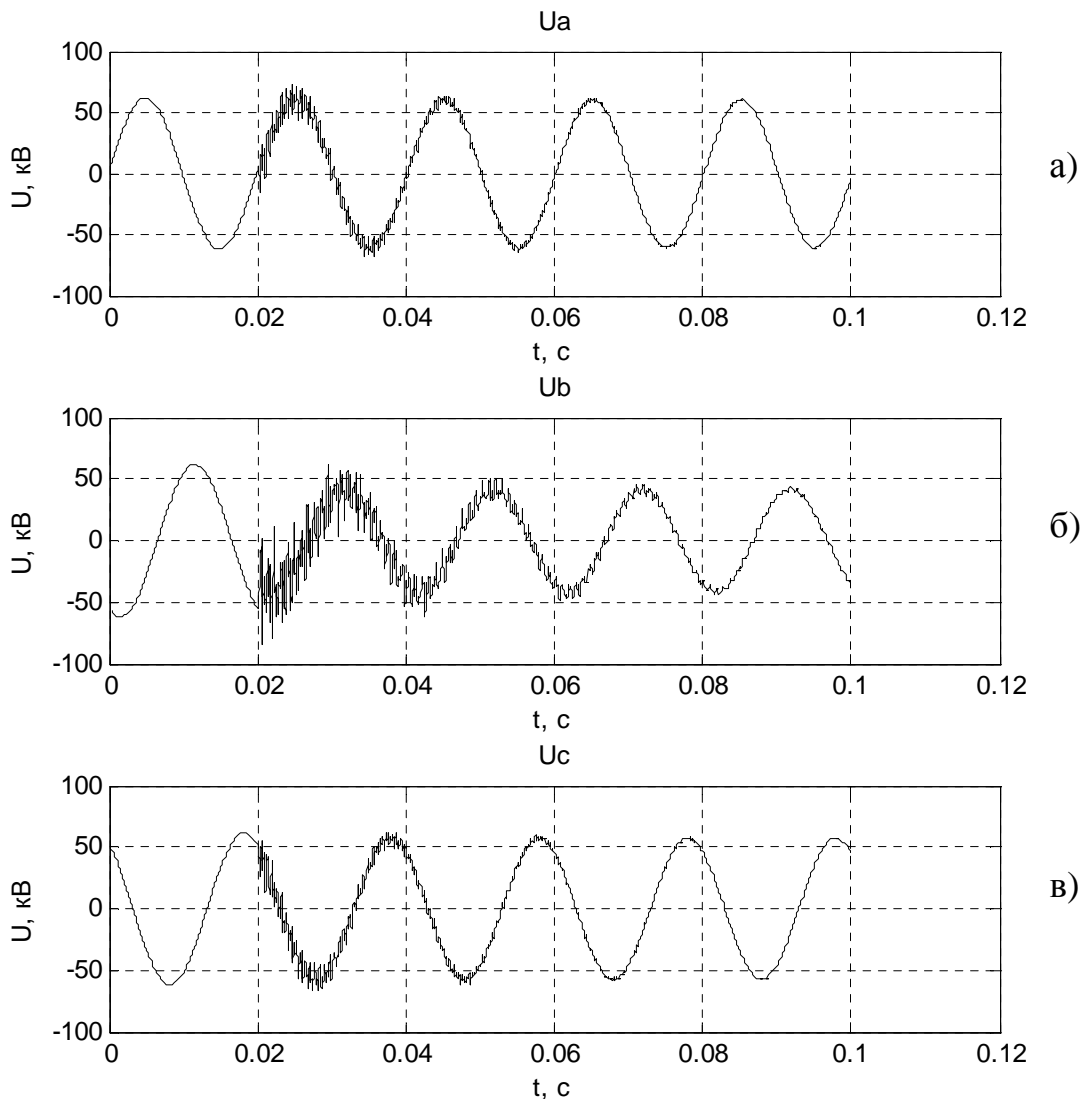


Рисунок 2.19 – Графики линейного напряжения в фазах на шинах питающей системы ПС1 при моделировании однофазного короткого замыкания на землю в точке K : а – напряжение фазы A , б – напряжение фазы B , в – напряжение фазы C

Рисунки 2.19 и 2.20 иллюстрируют результаты моделирования однофазного короткого замыкания на землю фазы B в точке K . На рисунке 2.19 показана зависимость напряжения фаз от времени, на рисунке 2.20 зависимость тока от времени.

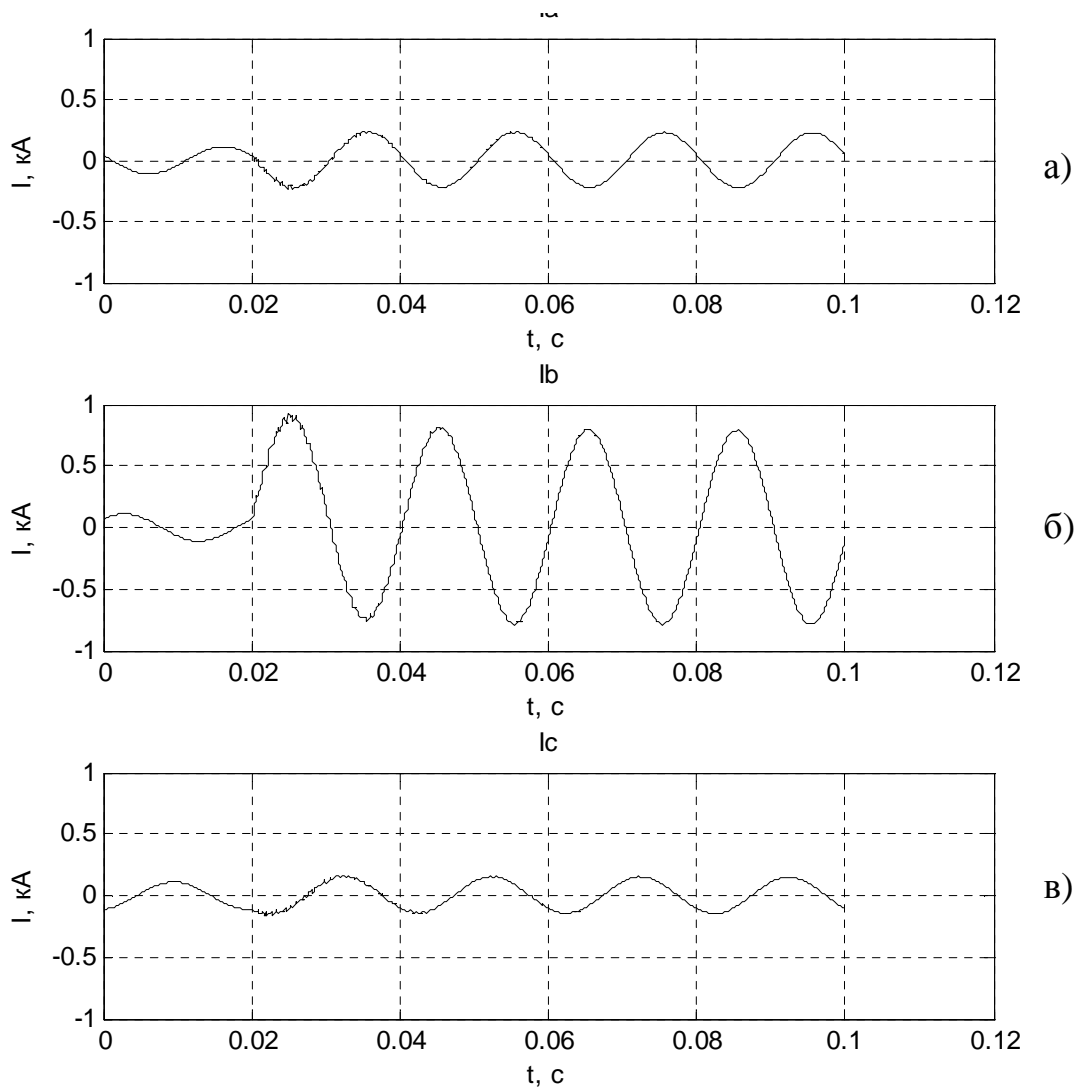


Рисунок 2.20 – Графики токов в фазах на шинах питающей системы ПС1 при моделировании однофазного короткого замыкания на землю в точке K : а – ток фазы A , б – ток фазы B , в – ток фазы C

Рисунок 2.20 иллюстрирует обычную картину распределения токов в фазах при однофазном замыкании [92, 98, 105]. Ток поврежденной фазы резко возрастает, при этом появляется аperiodическая составляющая. Ток неповрежденных фаз изменяется мало, его изменение вызвано наводками со стороны поврежденной фазы, в связи с наличием взаимной индуктивности между проводами.

Сравним спектры токов поврежденной и неповрежденной фаз. Они показаны на рисунках 2.21 и 2.22 для поврежденной и неповрежденной фаз соответственно.

Следует отметить, что спектры неповрежденных фаз имеют одинаковый состав.

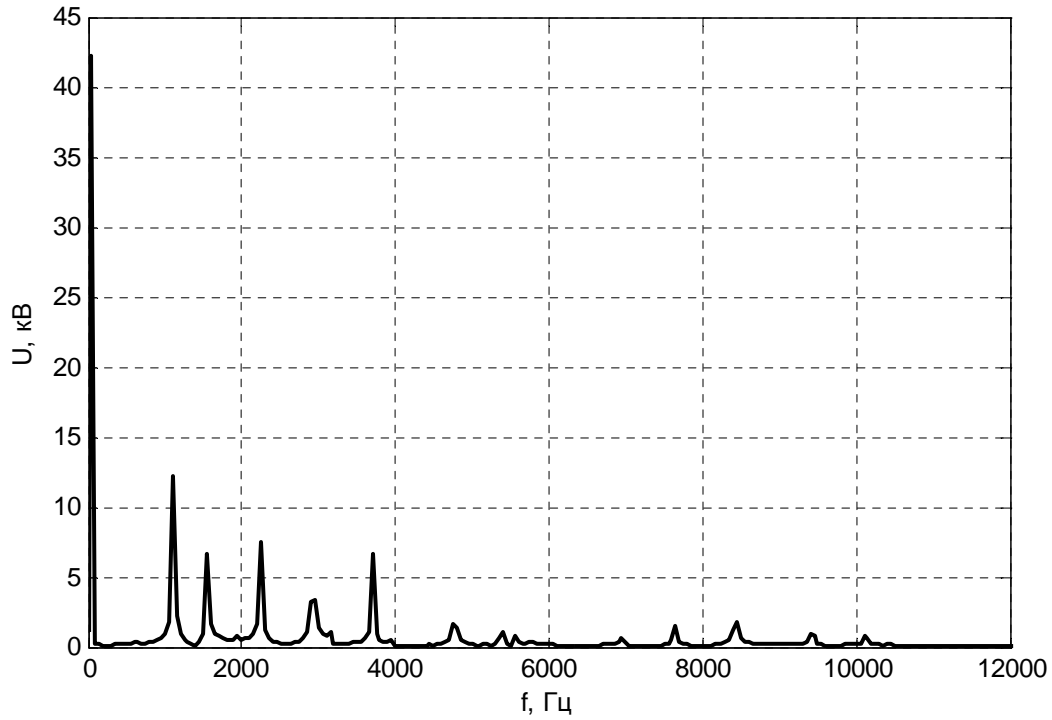


Рисунок 2.21 – Спектр напряжения в поврежденной фазе при однофазном коротком замыкании в точке K

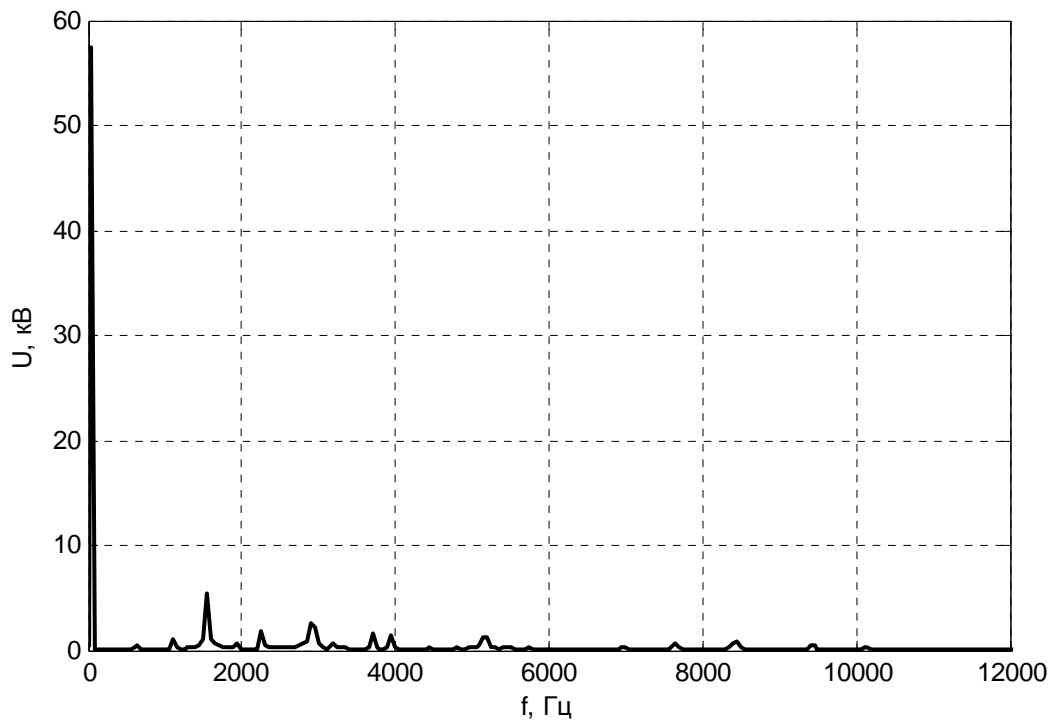


Рисунок 2.22 – Спектр напряжения в не поврежденной фазе при однофазном коротком замыкании в точке K

Если сравнить спектры напряжения поврежденной фазы при однофазном коротком замыкании на землю и трехфазном коротком замыкании, то можно заметить их различие. Это вызвано разными путями протекания токов короткого замыкания. Следовательно, ток протекает по RLC-контурам имеющим разную частоту собственных колебаний. Для неповрежденных фаз при однофазном замыкании на землю особую роль играет взаимная индуктивность между фазами. Наличие высших гармоник в спектре неповрежденной фазы, для сети с эффективно заземленной нейтралью, вызвано наличием индуктивной связи между фазами в схеме замещения. В модели без индуктивной связи, электрические параметры в неповрежденных фазах не изменяются при появлении повреждения.

Выводы по главе 2

Развита и реализована методика расчета переходных процессов в электрических сетях через синтетические схемы (алгоритм Г. Доммеля). При применении этой методики расчет ведется для мгновенных значений параметров, поэтому она применима к установившимся и переходным процессам. Предлагаемая методика имеет следующие достоинства:

- 1) она универсальна и подходит для расчета различных СЭС и электрических сетей, в том числе, с полупроводниковыми элементами и управляемыми ключами;
- 2) ее алгоритм дает возможность варьировать любые параметры схемы замещения и управляющих воздействий, что позволяет строить достаточно гибкие модели различных электрических комплексов и систем, а так же моделировать нестационарные режимы;
- 3) ее применение на практике дает возможность учитывать различные виды нелинейностей в элементах моделируемых СЭС;
- 4) она позволяет менять параметры и конфигурацию схемы замещения на временном диапазоне моделирования, что расширяет спектр рассматриваемых режимов;

- 5) она применима к моделированию узлов нагрузки в фазных координатах, что позволяет без затруднений учитывать различные виды несимметрии трехфазных сетей и нагрузок;
- 6) при ее использовании можно задавать форму сигналов источников произвольной формы и частоты;
- 7) она предполагает моделирование во временной области и в мгновенных величинах, а частотная область исследования переходных процессов ограничивается только частотными свойствами моделей элементов и размером шага моделирования, что позволяет моделировать переходные процессы с различным гармоническим составом токов и напряжений;
- 8) результаты моделирования при ее реализации получаются в виде массивов выборок с выбранным временным шагом, что делает удобным применение к ним методов цифровой обработки сигналов и их импортирование в цифровые форматы осциллограмм;
- 9) она позволяет рассматривать не только процессы происходящие в отдельном электротехническом устройстве, но и оценить его влияние на питающую сеть и другие устройства в узле нагрузки.

Разработанные подходы и алгоритмы универсальны для любых электрических сетей. На их основе разработано программное обеспечение, на которое имеется два авторских свидетельства. Разработанное программное обеспечение имеет следующие особенности:

- 1) расчет переходных и установившихся процессов в электрических цепях в мгновенных значениях электрических параметров с заданным шагом по времени;
- 2) возможность построения модели многофазных систем в различных базисах отображения, например в фазных координатах, или симметричных составляющих;
- 3) расчет цепей с несколькими нелинейными элементами, в том числе, и полупроводниковыми;
- 4) применение различных способов учета нелинейности элементов;
- 5) возможность задания источников тока или напряжения любой формы и частоты.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛОВ НАГРУЗОК СЭС

При моделировании узлов нагрузки в диссертации используется базис фазных координат, поскольку данная система отсчета является наиболее приближенной к реальности. Это накладывает гораздо меньше ограничений на схему, количество несимметрий в трехфазной сети и не требует дополнительных преобразований значений токов и напряжений к различным осям, как, например, в базисе симметричных составляющих [6, 12, 61, 96, 97]. Кроме того, данная система отсчета не накладывает ограничений на форму сигналов источников и линейность элементов схемы.

3.1 Линии электропередач

Воздушные и кабельные линии электропередач имеют распределенные параметры. Самый распространенный вариант учета таких ЛЭП при моделировании, - применение П-образных схем замещения. Эта модель использована в данной работе в базисе фазных координат в виде трехфазной модели участка линии фиксированной длины. При этом в модели учтены индуктивные и емкостные связи между соседними проводами и землей.

На рисунке 3.1 показана схема замещения участка воздушной линии электропередач. Здесь: R_1 - продольное сопротивление участка линии, L_1 - продольная индуктивность участка линии, R_2 и C_2 - эквивалентные сосредоточенные сопротивление и емкость между проводом и землей, R_3 и C_3 - эквивалентные сосредоточенные сопротивление и емкость между проводами фаз, M - взаимная индуктивность между проводами.

Данная модель имеет несколько существенных недостатков, таких, как допущение о симметричности трехфазной системы проводов, геометрически образующих равносторонний треугольник, и симметричности этой системы относительно земли. Еще одним существенным допущением является допущение о сосредоточенных параметрах в пределах длины, моделируемой

П-образной схемой [61, 11]. Для получения более точной картины

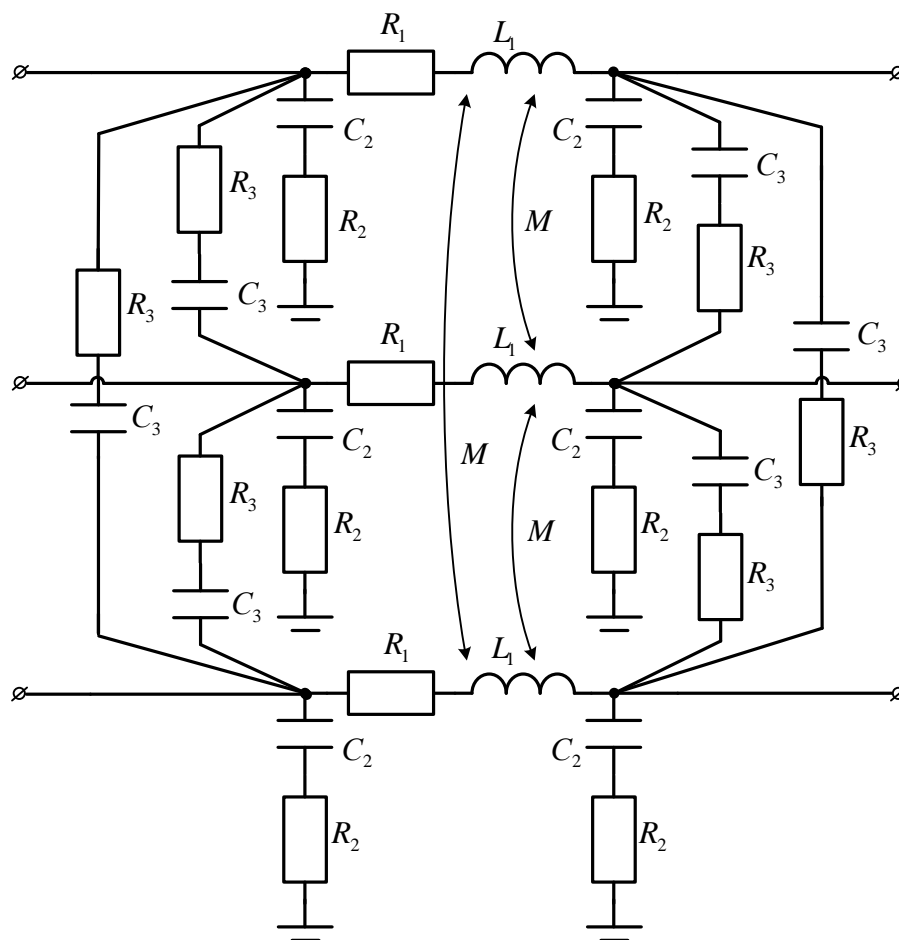


Рисунок 3.1 – Трехфазная модель участка воздушной линии электропередач в виде П-образной схемы замещения

распределения удельных электрических параметров приходится увеличивать количество секций и уменьшать их длину. Тем не менее, принятая модель хорошо подходит для учета линий электропередач при изучении переходных процессов с нарушением симметрии трехфазной системы и замыканиях на землю, которые представляют интерес в СЭС с изолированной и компенсированной нейтралью. Далее в работе будет продемонстрировано, что данная модель хорошо подходит для моделирования повреждений в сетях с различными способами заземления нейтрали.

Статическая нагрузка линий электропередач моделируется ветвями с параметрами, соответствующими ее активной и реактивной мощности. Если нагрузка индуктивная, то она моделируется RL ветвью (рисунок 3.2-а), если емкостная, то RC ветвью. Схема соединения ветвей фаз нагрузки выбирается

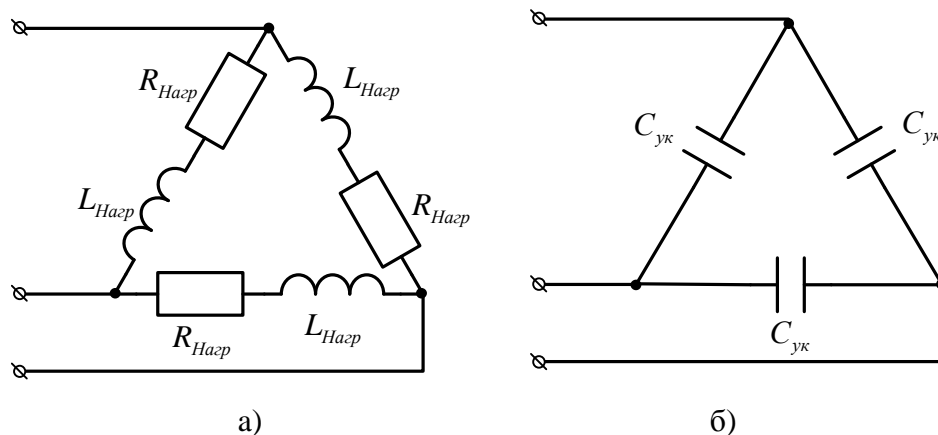


Рисунок 3.2 – Трехфазная модель статических элементов узлов нагрузки и сетей: а – статическая активно-индуктивная нагрузка, б – устройство компенсации реактивной мощности в виде батареи конденсаторов

в зависимости от схемы заземления нейтрали сети и схемы подключения ее к сети (звездой или треугольником). В схеме: $R_{Нагр}$ - активное сопротивление нагрузки, $L_{Нагр}$ - индуктивность нагрузки. Аналогично выбирается схема неуправляемых устройств компенсации реактивной мощности (рисунок 3.2, б). На рисунке 3.2, б: $C_{ук}$ - емкость одной фазы устройства компенсации.

3.2 Полупроводниковые элементы

В узлах нагрузки часто встречаются силовые полупроводниковые комплексы, которые являются нелинейной нагрузкой. Они представлены различным преобразовательным оборудованием или устройствами компенсации реактивной мощности. К таким нагрузкам относятся технологические установки с полупроводниковыми элементами, например, дуговые печи, устройства статической компенсации реактивной мощности, где коммутация реактивных элементов производится силовыми полупроводниковыми ключами. Широкое распространение получают устройства плавного пуска и управления электроприводами на основе полупроводниковых преобразователей. При наличии данного класса устройств возникает задача совместного моделирования силовой части оборудования и системы управления. В работе силовые ключи моделируются как нелинейные во времени активные элементы, сопротивление которых

изменяется в зависимости от управляющего сигнала. Элементы, не требующие управляющего сигнала, например, диоды, моделируются нелинейными активными элементами с заданной ВАХ (рисунок 3.3). Система управления, для упрощения, может быть смоделирована путем программной имитации ее логики работы. Такой подход сильно упрощает модель для типовых схем управления, например ШИМ.

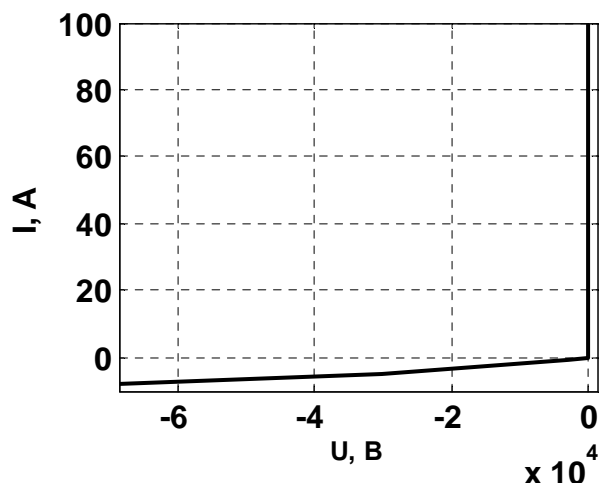


Рисунок 3.3 – Пример ВАХ диода, используемая при моделировании

Для демонстрации работы численного алгоритма, построенного по вышеописанной методике, произведен расчет переходного процесса при включении мостового выпрямителя. Схема выпрямителя приведена на рис 3.4. Элементы схемы имеют следующие параметры:

$e_1 = 100\sin(50 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t)$, $R_1 = 2$ Ом, $L_2 = 1$ Гн, $L_3 = 1$ Гн, $M_{23} = 0.9$ Гн, $C_9 = 100$ мкФ, $R_8 = 200$ Ом, ВАХ диодов задана численно по точкам: $i = -10$ А, $u = -10^5$ В; $i = 0$, $u = 0$; $i = 100$, $u = 0.01$.

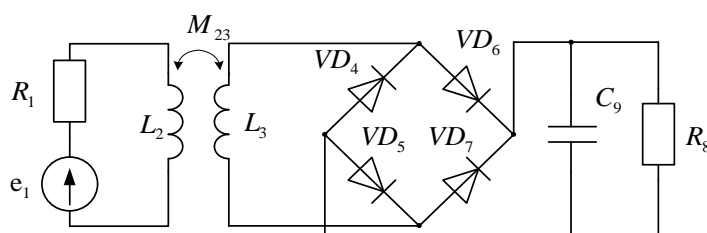


Рисунок 3.4 – Схема рассчитываемого выпрямителя

Для демонстрации работы алгоритма достаточно задания ВАХ по трем точкам. При расчете данной схемы была использована линейная интерполяция ВАХ. Для получения более точного результата можно так же задавать ВАХ нелинейных элементов более детально на нелинейных участках и использовать более точные методы интерполяции, например, сплайнами. Следует отметить, что усложнение формы вольтамперной

характеристики и метода ее интерполяции при численном задании отрицательно влияет на скорость расчета схемы.

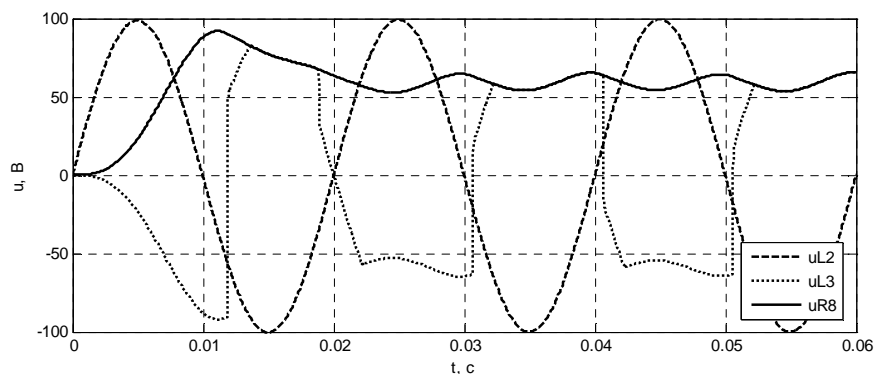


Рисунок 3.5 – Напряжение на элементах рассчитываемой схемы: u_{L2} – на индуктивности L_2 , u_{L3} – на индуктивности L_3 , u_{R8} – на сопротивлении R_8

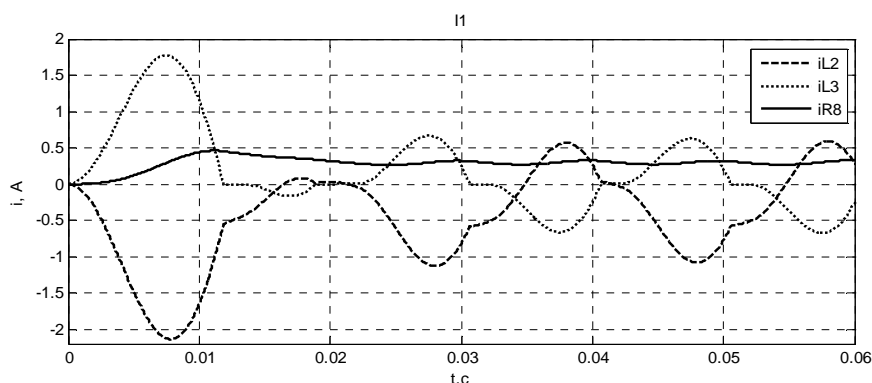


Рисунок 3.6 – Ток на элементах рассчитываемой схемы: i_{L2} – на индуктивности L_2 , i_{L3} – на индуктивности L_3 , i_{R8} – на сопротивлении R_8

Из графиков токов и напряжений (рис 3.5, 3.6) хорошо видно функционирование диодного моста. Напряжение на стороне источника относительно трансформатора имеет строго синусоидальную форму, тогда как напряжение на стороне диодного моста сильно искажено вследствие бросков тока при открывании диодов и заряда сглаживающего конденсатора C_9 . Первый бросок тока вызван начальным зарядом конденсатора. При дальнейшей работе выпрямителя диоды открываются только при снижении заряда конденсатора ниже уровня напряжения на индуктивности L_3 . Также на графике токов (рисунки 3.6, 3.7) хорошо видна апериодическая составляющая тока на индуктивности L_2 , вызванная броском тока при включении выпрямителя. Ток и напряжение на нагрузочном резисторе R_8

близки к постоянным, присутствуют лишь небольшие пульсации, вызванные колебаниями напряжения на сглаживающем конденсаторе.

Таким образом, результаты расчетов, с учетом параметров нелинейной схемы адекватно описывают протекающие в ней переходные процессы.

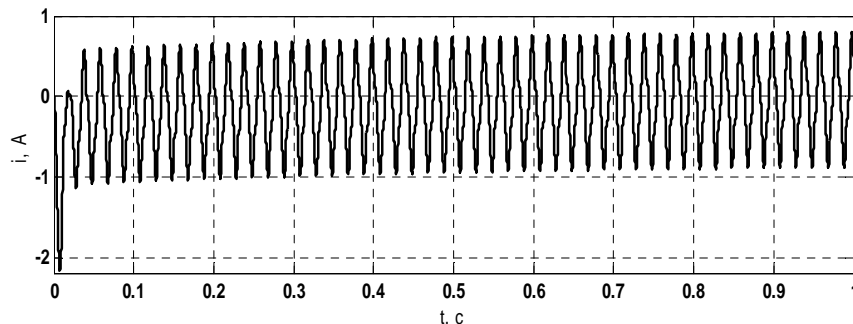


Рисунок 3.7 – Ток на индуктивности L_2

Предложенная методика численного расчета переходных процессов в нелинейных цепях позволяет рассчитывать цепи с нелинейными элементами различного вида, в том числе и полупроводниковыми приборами, что позволяет применять ее в различных отраслях электротехники. Следует отметить, что методика обладает всеми достоинствами алгоритма Доммеля, например, возможностью задания источников питания с любой формой сигнала, а также – строить макромодели сложных электрических элементов.

3.3 Силовые трансформаторы

При расчете процессов в узлах нагрузки в работе, применяется модель силового трансформатора, состоящая из индуктивно связанных ветвей. Данная модель позволяет проводить расчет с учетом преобразования уровней напряжения и групп соединения обмоток трансформатора. Параметры модели рассчитываются по каталожным данным трансформаторов.

Применены модели трехфазных трансформаторов в виде системы из трех однофазных трансформаторов. Такой подход применим как к двухобмоточным, так и к трехобмоточным трансформаторам. При этом, в зависимости от схемы соединения однофазных трансформаторов, можно получать различные группы соединения трехфазных трансформаторов.

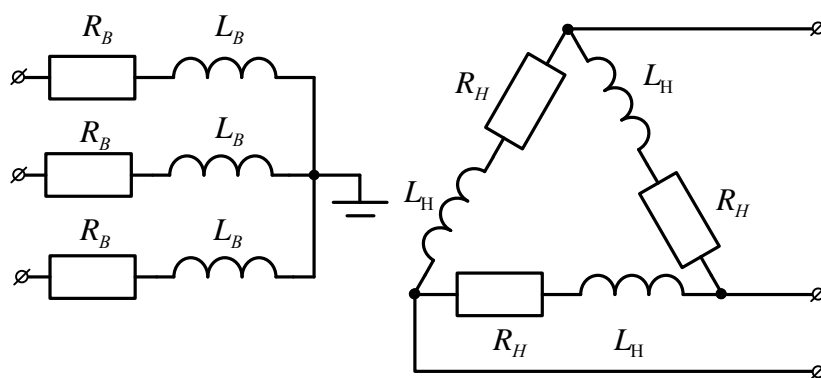


Рисунок 3.8 – Трехфазная модель двухобмоточного трансформатора, с обмотками соединенными по схеме звезда с нулевым проводом – треугольник

Схема замещения двухобмоточного трансформатора показана на рисунке 3.8. Здесь обмотки соединены по схеме звезда с нулевым проводом – треугольник. В схеме R_B и L_B - сопротивление и индуктивность обмотки одной фазы высокого напряжения, R_H и L_H - сопротивление и индуктивность обмотки одной фазы низкого напряжения. Между обмотками высокого и низкого напряжения одноименных фаз учитывается взаимная индуктивность (не показана на рисунке). В модели двухобмоточного трансформатора присутствуют 3 взаимных индуктивности. Данная модель позволяет учитывать группы соединения обмоток трансформатора. Это позволяет моделировать участки энергосистем, где на разных уровнях напряжения применяются различные способы заземления нейтрали. Например, для модели на рисунке 3.8 на стороне верхнего напряжения моделируется сеть с глухозаземленной нейтралью, а на стороне низкого напряжения, моделируется сеть с изолированной нейтралью.

Модель трехобмоточного трансформатора показана на рисунке 3.9. Рассмотрена модель со схемой соединения обмоток звезда с нулевым проводом – треугольник – треугольник. Принятое соединение обмоток чаще всего встречается у трансформаторов 110/35/10(6) кВ в сетях промышленного электроснабжения. Для наглядности эти напряжения показаны напротив выводов на схеме замещения. На схеме

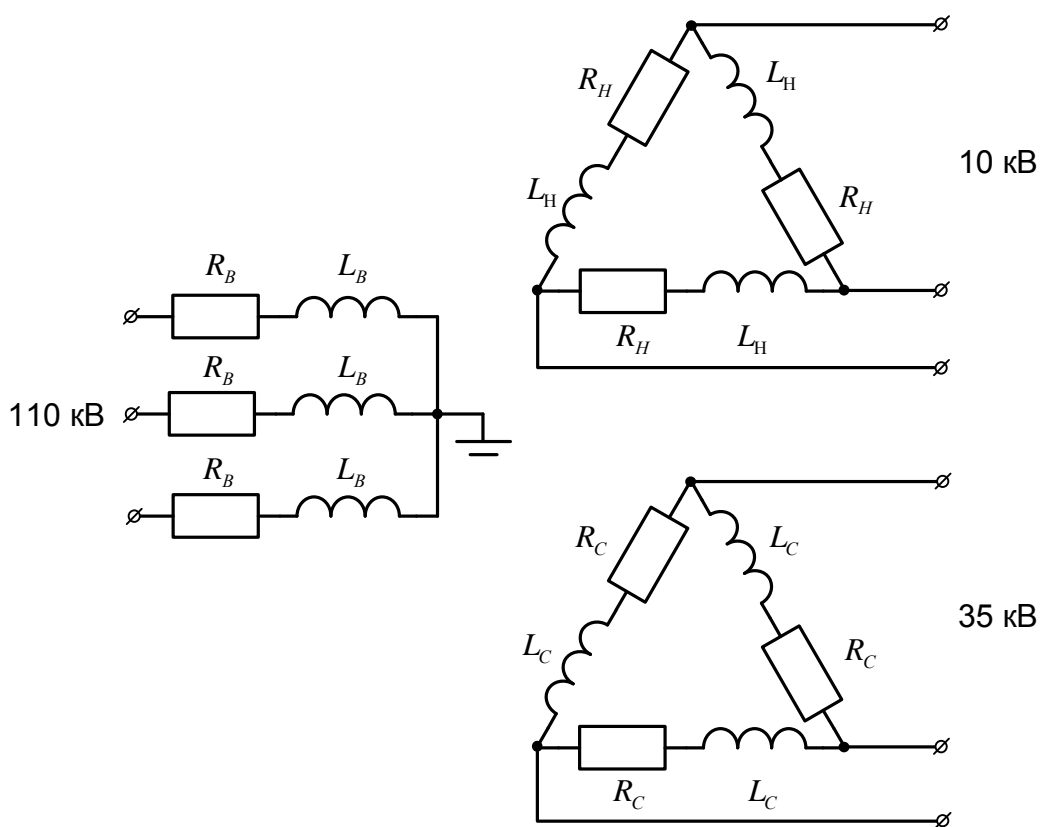


Рисунок 3.9 – Трехфазная модель трехобмоточного трансформатора, с обмотками соединенными по схеме звезда с нулевым проводом – треугольник – треугольник

приняты следующие обозначения: R_B и L_B - сопротивление и индуктивность обмотки одной фазы высокого напряжения, R_H и L_H - сопротивление и индуктивность обмотки одной фазы низкого напряжения, R_C и L_C - сопротивление и индуктивность обмотки одной фазы среднего напряжения. Между обмотками одноименных фаз всех трех напряжений учитывается взаимная индуктивность (не показана на рисунке). В модели трехобмоточного трансформатора присутствует 9 взаимных индуктивностей.

3.4 Нелинейные индуктивности и трансформаторы

В настоящей работе представлена модель индуктивного элемента с сердечником, учитывающая нелинейное насыщение и гистерезис в его характеристике намагничивания при моделировании переходных процессов. Методика расчета отражает свойства индуктивного элемента с учетом

характеристик магнитной системы, но не усложняет топологию исследуемой схемы. Данная модель применена и к трансформаторам. Сложность использования этой модели в большинстве расчетов сводится лишь к отсутствию исходных данных о магнитной системе силовых элементов: трансформаторов, реакторов и других.

При расчете процессов в узлах нагрузки в работе применяется модель силового трансформатора, состоящая из индуктивно связанных ветвей. Данная модель позволяет проводить расчет с учетом преобразования уровней напряжения и схем соединения обмоток трансформатора. Параметры модели рассчитываются из каталожных данных трансформатора.

Учет магнитных свойств силового трансформатора является актуальной задачей для моделирования переходных процессов в энергосистеме и, в частности, в узлах комплексной нагрузки. Насыщение и остаточная намагниченность сердечника трансформатора существенно проявляются при коммутациях и переходных процессах в сети [57, 58]. Это сказывается, прежде всего, в «бросках» тока намагничивания, имеющих большую амплитуду и длительность [58], что приводит к повышению нагрузки на обмотки трансформатора. Гармонический состав токов намагничивания трансформатора оказывается достаточно сложным, что оказывает влияние на работу других элементов узла нагрузки и на питающую сеть [46, 37, 115]. Моделирование трансформаторов на основе широко распространенных схем замещения [24, 46] в силу значительного числа допущений зачастую неприменимо при моделировании переходных процессов в СЭС. Такие схемы замещения трансформаторов удобны для анализа только статических режимов СЭС. В работе [37] описан подход, в котором учитывается конфигурация магнитной системы силового трансформатора. В соответствии с примененным подходом, магнитная система трансформатора эквивалентруется магнитной цепью. При расчетах, электрическому току ставится в соответствие магнитный поток, электрическому напряжению - напряженность магнитного поля в участках магнитного сердечника. Таким

образом, после эквивалентирования (составления схемы замещения) магнитной цепи, для расчета переходных процессов используются методы теории электрических цепей. При этом магнитная и электрическая цепь трансформатора моделируются совместно. На преимущества такого подхода к расчету трансформаторов по сравнению с моделями, использующими схему замещения, указано в [45]. К недостаткам авторы относят, в частности, необходимость приведения параметров схемы к одному уровню напряжения или к количеству витков в одной из обмоток. Методика, описанная в [37] не учитывает, однако, свойства ферромагнитного сердечника, такие, как его магнитное насыщение и гистерезисные явления. Учет нелинейной магнитной проницаемости сердечника, при моделировании переходных процессов в трансформаторе, представлен в работе [45]. Необходимо учитывать избыточность обозначенных динамических моделей трансформаторов для их использования в задачах расчета переходных процессов в узлах комплексной нагрузки. Во время моделирования переходных процессов в узлах комплексной нагрузки детальное описание и расчет физических процессов внутри трансформатора, требующие численного решения дополнительных систем уравнений, отрицательно сказывается на скорости и производительности расчетов.

Модель трансформатора, представленная в настоящем параграфе, учитывает в переходных режимах работы трансформатора нелинейное насыщение и гистерезисные явления при перемагничивании сердечника. Методика моделирования трансформатора учитывает его свойства, как элемента с магнитной системой, преобразование в нем уровня напряжения. Особенно важно, что это не сопровождается усложнением топологии исследуемой схемы. В модели приняты общепринятые для большинства моделей трансформаторов допущения: однородность магнитного поля в системе и ряд других. [24, 37, 57].

Алгоритм, позволяющий рассчитывать цепи с нелинейными элементами через задание их вольтамперной характеристики (ВАХ), описан

во второй главе настоящей работы. Однако цепь, где нелинейность индуктивного элемента определяется характеристиками магнитной проницаемости сердечника, необходимо рассчитывать несколько иначе [45, 109, 115].

Напряжение на нелинейной индуктивности описывается уравнением

$$u_L(i_L) = L(i_L) \frac{di_L}{dt}, \quad (12)$$

где u_L, i_L - напряжение и ток, $L(i_L)$ - нелинейная индуктивность.

Для уравнения (12) задать ВАХ аналитически в явном виде оказывается затруднительно, поскольку кроме нелинейной зависимости $L(i_L)$ присутствует первая производная от тока. Необходимо иметь в виду, что в цепях, где требуется учет взаимной индуктивности элементов, задание ВАХ в явном виде оказывается еще более сложным.

В настоящей работе для описания нелинейных свойств индуктивных элементов учитываются их физические особенности. Известно, что электромагнитные свойства ферромагнитных материалов сердечника определяются зависимостью магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B = f(H)$. При заданных геометрических параметрах сердечника и его характеристики $B(H)$ можно получить зависимость индуктивности $L(i_L)$ от величины протекающего в обмотке тока [12]. Необходимо учитывать как физические, так и геометрические параметры обмоток и сердечника.

Согласно методу синтетических схем (алгоритму Доммеля), который применяется для моделирования переходных процессов в настоящей работе, индуктивность на каждом шаге дискретизации по времени учитывается, как показано на рисунке 3.10. Здесь $u_{L_{n+1}}$ - напряжение на индуктивности на $n+1$ шаге расчета по времени, i_{L_n} - ток в индуктивности на n шаге расчета по времени, h – временной шаг дискретизации.

Для цепи с взаимной индуктивностью влияние связанной ветви можно учесть внесением соответствующей ЭДС и активного сопротивления в рассматриваемую ветвь. Используя такой подход, рассчитывается текущий режим работы цепи. После этого, для того чтобы учесть нелинейные характеристики элементов цепи, режим работы цепи уточняется с использованием итерационных численных методов [8]. Необходимо иметь в виду, что каждому нелинейному элементу сети такой подход позволяет задать свою отдельную характеристику. Количество таких нелинейных

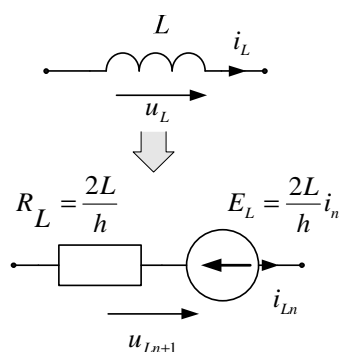


Рисунок 3.10 – Схема замещения индуктивности для алгоритма Доммеля

элементов в моделируемой цепи ограничивается только ресурсами вычислительной техники.

Взаимная индуктивность между обмотками рассчитывается следующим образом:

$$M_{12} = \frac{w_1 \Phi_1}{I_2}, \quad M_{21} = \frac{w_2 \Phi_2}{I_1},$$

где w_1 , w_2 - количество витков первой и второй связанных обмоток; Φ_1 - магнитный поток второй обмотки, участвующий в потокосцеплении первой; Φ_2 - магнитный поток первой обмотки, участвующий в потокосцеплении второй обмотки; I_1 и I_2 - токи первой и второй обмоток, соответственно. Рассчитав магнитный поток, далее находим напряженность магнитного поля в сердечнике с учетом его геометрических размеров, и, используя кривую намагничивания, определяем магнитную индукцию. После того, как найдено значение магнитной индукции, на каждом временном шаге находится уточненное значение индуктивности.

Следовательно, взаимная индуктивность обмоток, рассчитанная таким способом, также оказывается нелинейной. Таким образом, при численном моделировании нелинейной цепи с учетом взаимной индуктивности на

каждом временном шаге уточняются 4 параметра. Этими параметрами являются индуктивности L_1 , L_2 , а так же взаимные индуктивности M_{12} и M_{21} . Величина взаимных индуктивностей, при сходимости описанного итерационного алгоритма, должна стремиться к одной величине, так как в сердечнике протекает общий для связанных обмоток магнитный поток. Коэффициент связи обмоток при расчете взаимной индуктивности необходимо учитывать на каждой итерации.

Для описания моделирования кривой намагничивания материала сердечника с учетом остаточной намагниченности применена модель магнитного гистерезиса Джайлса-Атертона. Модель основана на описании кривой намагничивания дифференциальным уравнением. Представляется важным, что методика, которая использована в настоящей работе для моделирования, учитывает наличие внутренних петель гистерезиса, что позволяет уточнить результат в переходных режимах при изменении амплитуды сигналов.

3.4.1 Модель магнитного гистерезиса Джайлса – Атертона

Используемая в настоящей работе математическая модель гистерезиса Джайлса-Атертона (Jiles-Atherton) [7, 108, 112] позволяет учитывать остаточную намагниченность в сердечнике трансформатора. Для этого численно решается задача Коши для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка относительно остаточной намагниченности. В качестве начальных условий используется нелинейная форма кривой намагничивания с насыщением, но без учета гистерезиса. Кроме такой модели в зарубежной литературе для оценки гистерезисных явлений широко используется модель Прейзаха (Preisach) [113]. Модель Прейзаха основана на описании гистерезиса путем суммирования множества элементарных функций (гистеронов). Эти элементарные функции, по сути, являются функциями гистерезиса с различными коэффициентами возврата. По мере изменения входной величины гистероны суммируются с различными

весовыми коэффициентами. Сравнение этих моделей приведено в [108]. Автором использована модель Джайлса-Атертона (далее J-A), поскольку она основана на физических свойствах ферромагнитных материалов и дает более высокую вычислительную производительность [116], нежели феноменологическая модель Прейзаха.

Моделирование магнитного гистерезиса по модели Джайлса – Атертона разделяется на два основных этапа. В первом этапе рассматривается безгистерезисная намагниченность M_{an} . Затем, на втором этапе, гистерезис описывается дифференциальным уравнением с учетом знака изменения напряженности магнитного поля H .

Безгистерезисная намагниченность – это значение намагниченности M_{an} в материале после процесса размагничивания ниже постоянного значения напряженности магнитного поля H . Размагничивание выполняется экспоненциально уменьшающимся постоянным током. Однако, измерение безгистерезисной намагниченности - задача трудновыполнимая с практической точки зрения, поскольку требует точного измерения индукции B во время динамического изменения магнитного поля во время размагничивания. В результате этого данные о безгистерезисной намагниченности для различных электротехнических сталей отсутствуют в справочной литературе.

В модели Джайлса – Атертона безгистерезисная намагниченность в ферромагнитных материалах моделируется аналогично модели намагниченности в парамагнитных материалах. Для парамагнитных материалов значение намагниченности M_{para} может быть определено с помощью распределения Больцмана направления магнитных доменов по следующему выражению:

$$M_{para} = M_s \frac{\int_0^\pi e^{\frac{-E_m(\theta)}{k_\beta T}} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta}{\int_0^\pi e^{\frac{-E_m(\theta)}{k_\beta T}} \sin \theta \cdot d\theta}, \quad (13)$$

где M_s - намагниченность насыщения парамагнетика; θ - угол между атомным магнитным моментом и m_{at} , и направлением магнитного поля B ; k_β - постоянная Больцмана. Энергия магнитного поля $E_m(\theta)$ представлена выражением:

$$E_m(\theta) = -\mu_0 \cdot m_{at} \cdot H \cdot \cos \theta. \quad (14)$$

Для ферромагнитных материалов при моделировании безгистерезисного намагничивания также используется распределение Больцмана. Однако атомный магнитный момент изменяется средней намагниченностью доменов m_d :

$$m_d = \frac{M_s}{N_s}, \quad (15)$$

где N_s - средняя плотность доменов в материале. Более того, в уравнении (15) определяющем энергию домена m_d , представлено эффективное намагничивающее поле H_e , данное в уравнении:

$$H_e = H + \alpha \cdot M, \quad (16)$$

где α определяет междоменное взаимодействие.

Учитывая уравнения (15) и (16), уравнение безгистерезисного намагничивания на основе распределения Больцмана, введем уравнение Ланжевина для безгистерезисной намагниченности M_{ah_iso} для изотропных материалов:

$$M_{ah_iso} = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \left(\frac{a}{H_e}\right) \right], \quad (17)$$

где a задано как:

$$a = \frac{N \cdot k_B \cdot T}{\mu_0 \cdot M_s}. \quad (18)$$

Упрощение уравнения (17) возможно, только если уравнение (13) имеет первообразную. Более того, уравнение (18) действительно только для изотропных материалов.

Для анизотропных ферромагнитных материалов модель Джайлса – Атертона может быть расширена в форме, дающей значение безгистерезисной намагниченности материала M_{ah_aniso} :

$$M_{ah_aniso} = M_s \frac{\int_0^\pi e^{E(1)+E(2)} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta}{\int_0^\pi e^{E(1)+E(2)} \sin \theta \cdot d\theta}, \quad (19)$$

где

$$E(1) = \frac{H_e}{a} \cos \theta - \frac{K_{an}}{M_s \cdot \mu_0 \cdot a} \sin^2(\psi - \theta), \quad (20)$$

$$E(2) = \frac{H_e}{a} \cos \theta - \frac{K_{an}}{M_s \cdot \mu_0 \cdot a} \sin^2(\psi + \theta). \quad (21)$$

В данном случае K_{an} это средняя плотность энергии связанная с неосевой анизотропией в магнитном материале и ψ – угол между направлением магнитного поля и осью легчайшей намагничиваемости материала при анизотропии. Можно доказать, что функция в уравнении (19) не имеет известных первообразных. В результате уравнение (19) может быть решено только численно.

В модели Джайлса – Атертона петля гистерезиса определена необратимой намагниченностью M_{irr} заданной уравнением:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \delta_M \frac{M_{ah} - M_{irr}}{\delta \cdot k}, \quad (22)$$

где параметр k характеризует среднее количество энергии необходимое для необратимой деформации доменных стенок. В этом уравнении параметр

$\delta = 1$ для $\frac{dH}{dt} \geq 0$ и $\delta = -1$ для $\frac{dH}{dt} < 0$. Дополнительный параметр $\delta_m = 0$, когда $\frac{dH}{dt} < 0$ и $M_{ah} - M > 0$ и когда $\frac{dH}{dt} \geq 0$ и $M_{ah} - M < 0$. В других случаях $\delta_m = 1$. Параметр δ_m показывает, что инкрементная восприимчивость всегда положительна, это важно с точки зрения физического смысла модели.

В модели Джайлса – Атертона обратимая намагниченность M_{rev} дана в уравнении:

$$M_{rev} = c(M_{ah} - M_{irr}), \quad (23)$$

где c - параметр описывающий обратимость намагничивания. Учитывая факт, что полная намагниченность магнитного материала M представлена суммой обратимой намагниченности M_{rev} и необратимой намагниченности M_{irr} , полная намагниченность может быть выделена при помощи обыкновенного дифференциального уравнения:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\delta_m}{1 + c} \frac{M_{ah} - M}{\delta \cdot k - \alpha(M_{ah} - M)} + \frac{c}{1 + c} \frac{dM_{ah}}{dH}. \quad (24)$$

Расчет петли магнитного гистерезиса решением уравнения (24) требует начальных условий. Эти условия определены состоянием ненамагниченного материала: $M = 0$ и $H = 0$.

Следует заметить, что модель трансформатора с учетом физических особенностей сердечника предпочтительна для научно-исследовательских целей, поскольку дает более высокую физическую точность результатов, по сравнению с линейной моделью из связанных индуктивностей. Ее существенный недостаток при использовании для прикладных целей состоит в обязательном требовании задания параметров магнитной системы трансформатора или другого индуктивного элемента, которые не являются паспортными данными и нуждаются в дополнительном уточнении. Чаще всего эти данные не находятся в открытом доступе.

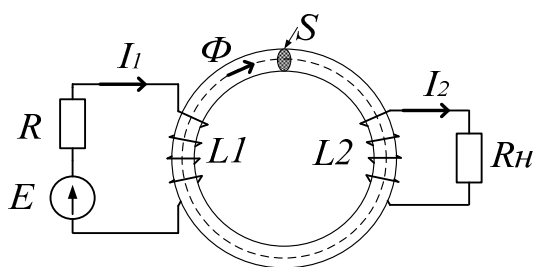


Рисунок 3.11 – Схема содержащая трансформатор с ферромагнитным сердечником

методики.

Параметры модели: $E=100$ В, $R=1$ Ом, количество витков обмоток: $w_1 = w_2=2200$, $R_H=10$ Ом, $R_{L1}=1$ Ом, $R_{L2}=1$ Ом, $S = 10^{-4}$ м², длина средней

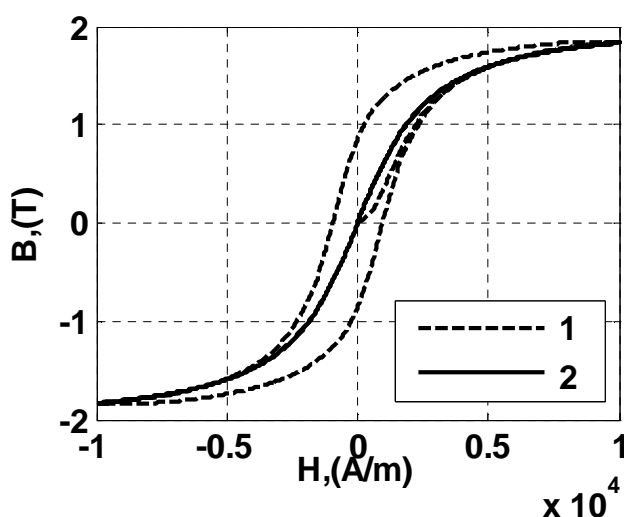


Рисунок 3.12 – Кривая намагничивания с учетом гистерезиса (кривая 1) и без его учета (кривая 2)

намагничивания его сердечника показаны в [84]. Приведем здесь сравнение результатов моделирования переходного режима трансформатора с насыщением сердечника с учетом (кривая 1 на рисунке 3.12) и без учета (кривая 2 на рисунке 3.12) гистерезиса кривой намагничивания.

Временные зависимости токов и напряжений (рисунки 3.13, 3.14) соответствуют переходному процессу, возникающему при включении трансформатора на нагрузку. Использован трансформатор с тороидальным сердечником для упрощения расчетов. На рисунках при заданных параметрах цепи напряжении источника отчетливо проявляется магнитное насыщение

Для примера применения данной методики проведено моделирование схемы на рисунке 3.11. Следует отметить, что параметры модели взяты исключительно для демонстрации работы

линии сердечника $l = 0.1$ м. Индуктивности обмоток не указаны, т.к. они уточняются в процессе расчета на каждом шаге. Значения параметров модели J-A: $c = 0.1$, $M_s = 0.7$ А/м, $k = 5000$ А/м, $\alpha = 10^{-3}$.

Результаты моделирования переходных режимов трансформатора с учетом насыщения кривой

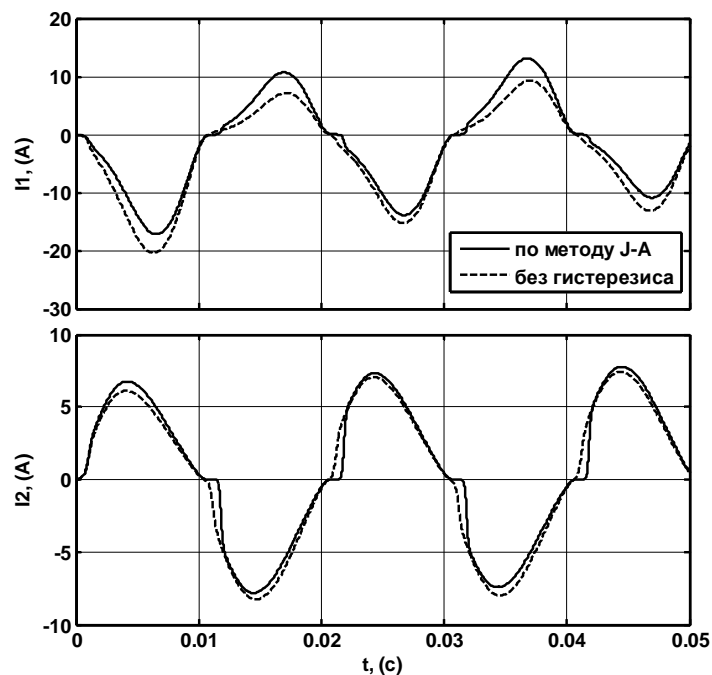


Рисунок 3.13 – Графики тока в первичной (I1) и вторичной (I2) обмотках исследуемого трансформатора при учете магнитного гистерезиса и без его учета

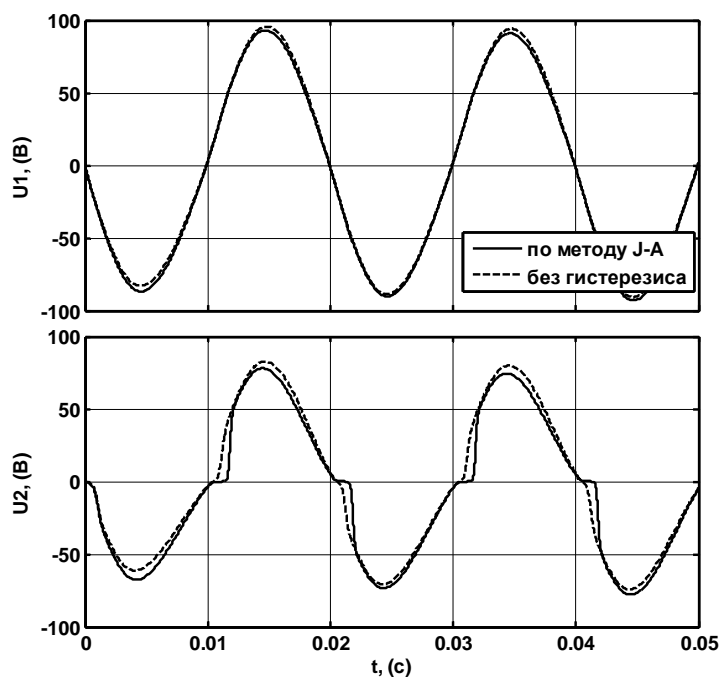


Рисунок 3.14 – Графики напряжений на первичной (U1) и вторичной (U2) обмотках исследуемого трансформатора при учете магнитного гистерезиса и без его учета

сердечника трансформатора, которое приводит к существенным искажениям временных зависимостей тока и напряжения в его обмотках. Проведем сравнительный анализ результатов, полученных с применением различных подходов к моделированию нелинейной индуктивности.

На графиках тока видно, что при учете гистерезиса апериодическая составляющая ниже и затухает быстрее, чем при учете насыщения сердечника без гистерезиса. Кроме того, на графиках отчетливо прослеживается разница между сигналами в момент перехода тока через ноль. Сигналы токов, полученные с учетом гистерезиса, имеют более сильное искажение. Это связано с наличием процесса перемагничивания материала сердечника. Тогда как искажение сигналов, полученных без учета гистерезиса, обусловлено только явлением насыщения. В общем случае, при учете остаточной намагниченности, сигналы модели искажаются сильнее, но при этом их форма в большей степени соответствует наблюдаемым на практике явлениям. Если рассмотреть ток вторичной обмотки, то можно заметить, что его форма при учете гистерезиса гораздо ближе к реальной форме тока при глубоком насыщении сердечника трансформатора. При моделировании различных режимов автором замечено большее влияние параметров нагрузки трансформатора на величину апериодической составляющей в модели, учитывающей гистерезис. Эти результаты могут говорить о большей достоверности результатов, при оценке переходных процессов в цепях с нелинейными индуктивностями, при учете остаточной намагниченности в сердечнике.

Учет гистерезиса в материале сердечника, как видно из графиков, позволяет учесть потери на перемагничивание материала и искажение формы сигнала при насыщении сердечника. При моделировании с учетом кривой намагничивания можно отследить только искажение формы сигналов за счет насыщения, что не дает полной картины передачи энергии в трансформаторе при его работе в различных режимах. Из графиков видно, что искажение формы сигнала тока и напряжения в обмотках трансформатора сильнее выражено на кривых, полученных при учете остаточной намагниченности. Учет остаточной намагниченности предложенным способом имеет еще одно важное преимущество – данный метод позволяет учесть внутренние петли гистерезиса. Это дает возможность более полно рассматривать переходные

процессы при различных амплитудах и формах входных сигналов, получать более достоверную форму сигналов при различных нагрузках трансформаторов.

3.5 Асинхронные двигатели

Модель асинхронного двигателя в данной работе описана в фазных координатах. Такой выбор связан с простотой согласования моделей сети и двигателя: можно напрямую подключать зажимы схемы замещения двигателя к трехфазной схеме сети в фазных координатах без дополнительных преобразований.

Для расчета переходного процесса в асинхронной машине существуют различные методики ее учета в схеме. Самые распространенные методы учета электродвигателя в электрической цепи – это учет его в виде Т- или Г-образной схемы замещения [64]. При этом активное сопротивление ветви ротора зависит от скольжения двигателя. Такой подход является наиболее простым при учете двигателя в схеме сети и отличается компактностью математической модели машины. Стоит отметить, что простота модели связана с множеством допущений и приводит к низкой точности результатов, особенно для моделирования нестационарных режимов. Данная модель изначально ориентирована на применение в расчетах стационарных режимов. Эта модель не подходит для применения совместно с алгоритмом Доммеля, поскольку предполагает использование действующих значений тока при расчете механических параметров машины – момента, угловой скорости и т.д. Динамические модели асинхронных двигателей, как правило, имеют более сложную структуру и представлены в координатах, связанных с ротором или старом машины, например координаты $(d, q, 0)$, $(\alpha, \beta, 0)$ и др. [20, 114]. В данной работе применена модель в фазных координатах. Такой выбор связан с простотой согласования модели сети и модели двигателя – сеть и двигатель моделируются как трехфазные системы, что позволяет

напрямую подключить зажимы модели двигателя к трехфазной модели сети без дополнительных преобразований систем координат [118]. Система фазных координат удобна своей наглядностью и позволяет легко моделировать сложные симметричные и несимметричные режимы многофазной сети.

Модель асинхронного двигателя в фазных координатах описывается системой уравнений в матричной форме [20]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s + p\mathbf{L}_s & p\mathbf{L}'_{sr} \\ p(\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{R}'_r + p\mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}'_r \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где p – оператор дифференцирования: $p = \frac{d}{dt}$;

\mathbf{u}_s и \mathbf{u}'_r – векторы столбцы напряжений ветвей статора и ротора, \mathbf{i}_s и \mathbf{i}'_r – векторы столбцы токов ветвей статора и ротора:

$$\mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}'_r = \begin{bmatrix} u'_{ra} \\ u'_{rb} \\ u'_{rc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}'_r = \begin{bmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{bmatrix};$$

\mathbf{R}_s и \mathbf{R}'_r – диагональные матрицы активных сопротивлений ветвей ротора и статора (Ом);

\mathbf{L}_s и \mathbf{L}'_r – матрицы индуктивностей ветвей статора и ротора:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix};$$

L_{ls} и L'_{lr} – собственные индуктивности ветвей статора и ротора (Гн), L_{ms} – индуктивность намагничивания ветви статора (Гн);

\mathbf{L}'_{sr} – матрица взаимных индуктивностей между ветвями статора и ротора:

$$\mathbf{L}'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix};$$

θ_r – угол поворота ротора двигателя относительно статора (рад).

Указанной системе уравнений для асинхронной машины можно сопоставить трехфазную схему замещения, содержащую 6 ветвей индуктивно связанных между собой (рисунок 3.15).

Величины момента, угловой скорости ротора и угла его поворота относительно статора связаны между собой следующими выражениями [20, 64, 118-120]:

$$T_e = \frac{z}{2} (\mathbf{i}_s)^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] \mathbf{i}'_r, \quad (26)$$

$$T_e = J \left(\frac{2}{z} \right) \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + T_m, \quad (27)$$

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} = \omega_r. \quad (28)$$

где T_e – электромагнитный момент на валу ротора, z – число полюсов двигателя, ω_r – угловая скорость вращения ротора, J – момент инерции ротора, T_m – механический момент сопротивления на валу ротора.

Численно решая уравнения (26) – (28) для величин T_e , ω_r и θ_r на каждом новом шаге дискретизации по времени $t = t_{n+1}$ и подставляя новое значение θ_r в систему (25) получаем динамическую модель асинхронного двигателя, которая легко согласуется с алгоритмом Доммеля.

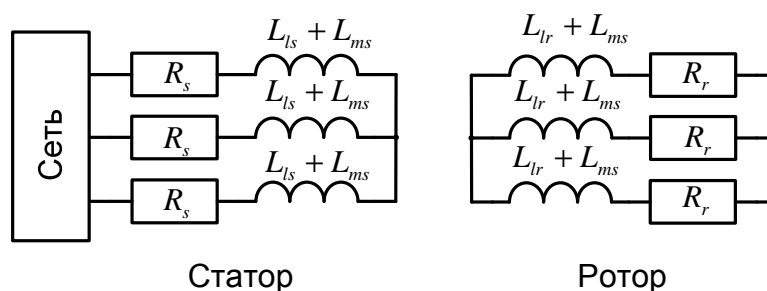


Рисунок 3.15 – Схема замещения асинхронного двигателя в фазных координатах. Все ветви индуктивно связаны. Индуктивные связи на рисунке не указаны

После дискретизации уравнений (26) – (28) по правилу трапеций они решаются относительно величин T_e , ω_r и θ_r на каждом временном шаге

$t = t_{n+1}$ совместно с уравнениями для электрической цепи составленными согласно алгоритму Доммеля.

Расчет параметров схем замещения ротора и статора проводится следующим образом: сначала определяются параметры Т-образной схемы замещения двигателя. Существуют различные подходы к определению этих параметров по паспортным данным, например, методика, основанная на методе последовательных приближений, описанная С. И. Гамазиным [25, 26]. Затем, из параметров Т - образной схемы определяются параметры схемы в фазных координатах [20].

В модели учтен эффект вытеснения тока в обмотке ротора – поверхностный эффект. Это сделано изменением активного и индуктивного сопротивления рассеяния ротора в зависимости от скольжения ротора. Сопротивления ротора уточняются по следующим формулами:

$$R_r(s) = R_{rc} + (R_{rp} - R_{rc}) \cdot \sqrt{s}, \quad (29)$$

$$x_{lr}(s) = \frac{x_{lrc} \cdot x_{lrp}}{x_{lrp} + (x_{lrc} - x_{lrp}) \cdot \sqrt{s}}, \quad (30)$$

где R_{rc} и x_{lrc} - активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния ротора в синхронном режиме, R_{rp} и x_{lrp} - активное и индуктивное сопротивления в режиме пуска [25].

Пример расчета для асинхронного двигателя рассмотрим для двигателя RA 100 LB4. Параметры этого двигателя приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры асинхронного двигателя М1 (RA 100 LB4)

$P_{ном}$, Вт	$U_{ном}$, В	n , об/мин	z	s	$I_{S_{ном}}$, А	КПД, %
3000	380	1395	2	0,07	7,3	78
$\cos \varphi_{ном}$	$k_{п}$	R_s , Ом	R'_r , Ом	L_s , Гн	L'_r , Гн	L_{sr} , Гн
0,8	5.5	3.28	0,167	0,1709	0,1709	0,167

В качестве примера приведены результаты моделирования пуска этого двигателя от источника неограниченной мощности напряжением 380 В.

На рисунке 3.16 показаны токи цепи статора двигателя, на рисунке 3.17 показаны токи цепи ротора. Пуск начинается момент времени $t = 0$ с. К моменту времени $t = 0,2$ с двигатель разгоняется до номинального значения угловой скорости. Разгон двигателя происходит при моменте сопротивления на валу ротора $T_M = 5$ Нм. Затем, после полного разгона, в момент 0.8 с. происходит увеличение нагрузки на валу ротора до номинального значения $T_M = 15$ Нм. В этот момент мы видим увеличение токов статора, а так же увеличение амплитуды токов ротора и увеличение их частоты. Это связано с тем, что при увеличении механической нагрузки у этого двигателя сильно возрастает скольжение. Поскольку мощность двигателя относительно невелика, то его угловая скорость сильно изменяется при изменении нагрузки. Как можно видеть из таблицы, двигатель имеет достаточно большое скольжение ($s = 0,07$) и низкий КПД, равный 78%. Далее, на рисунках 3.18 и 3.19, показана зависимость угловой скорости и скольжения от времени. Здесь мы видим процесс разгона двигателя, затем затухающие колебания угловой скорости и скольжения после его разгона. При увеличении нагрузки угловая скорость снижается. Имеется переходной процесс в виде колебаний. На рисунке 3.20 показано изменение мгновенного значения электромагнитного момента двигателя от времени. Здесь хорошо видно, что, расчет производится для динамического значения момента (мгновенные значения), что является важным положительным фактором при моделировании двигателей.

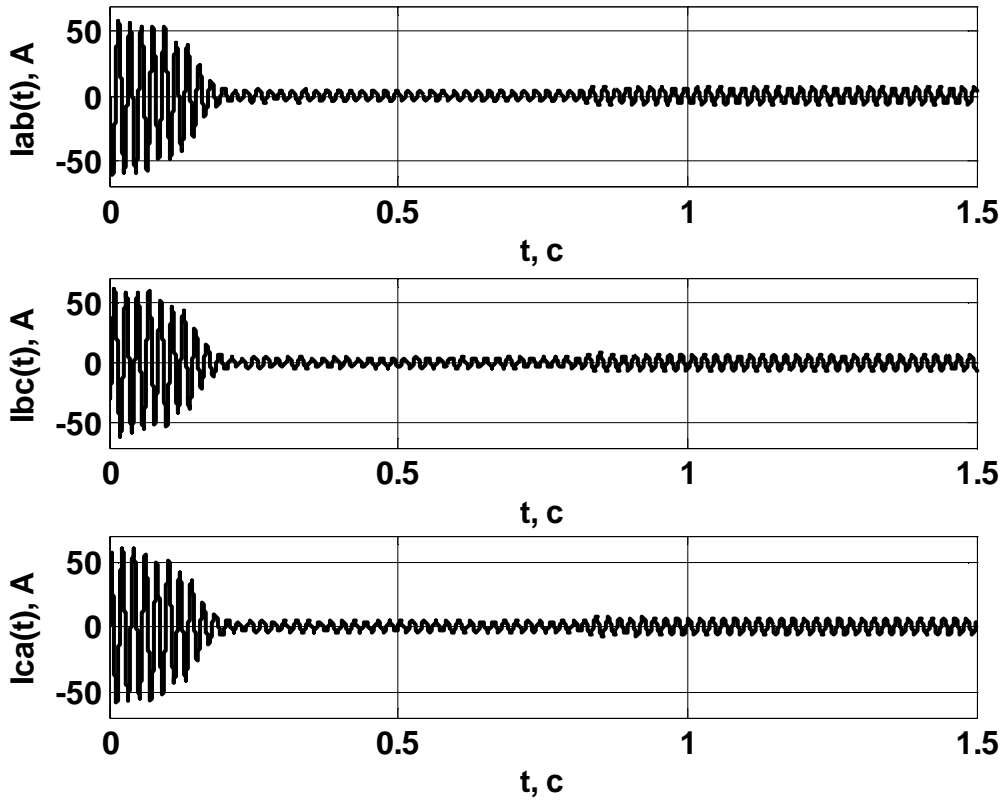


Рисунок 3.16 – Токи статора асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

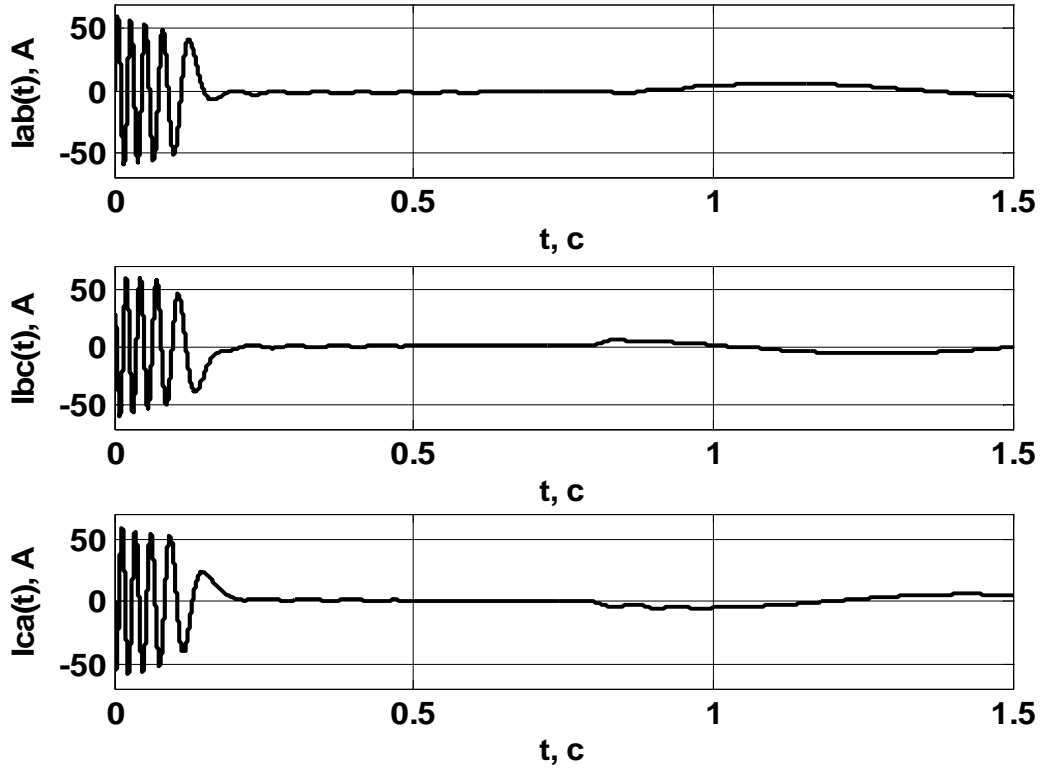


Рисунок 3.17 – Токи ротора асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

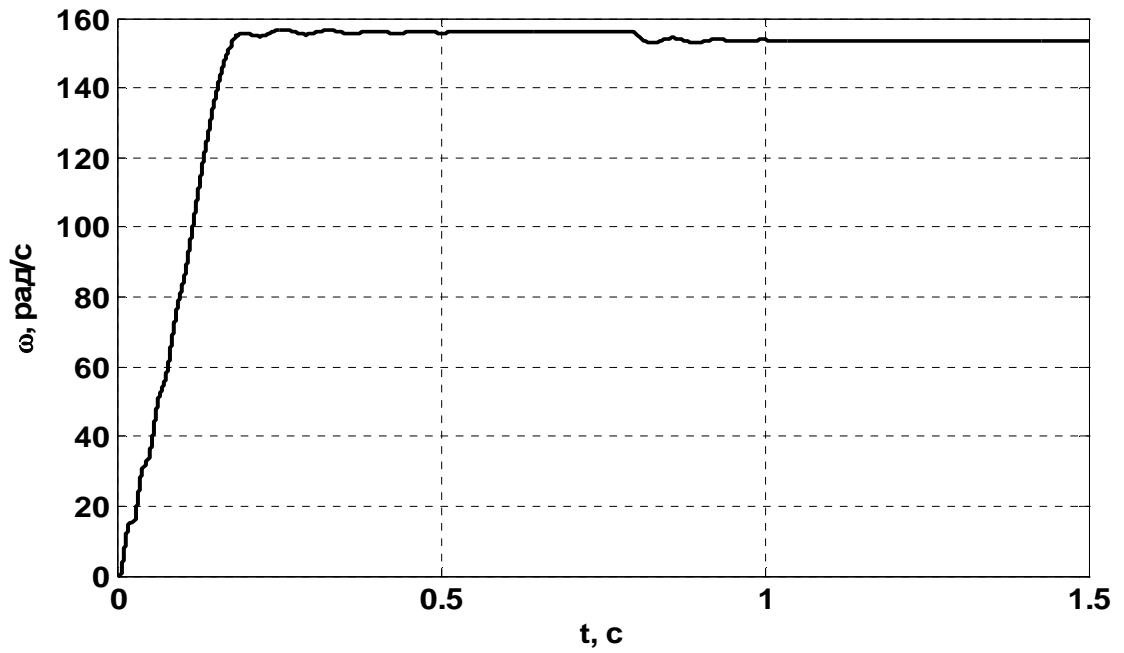


Рисунок 3.18 – Угловая скорость асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

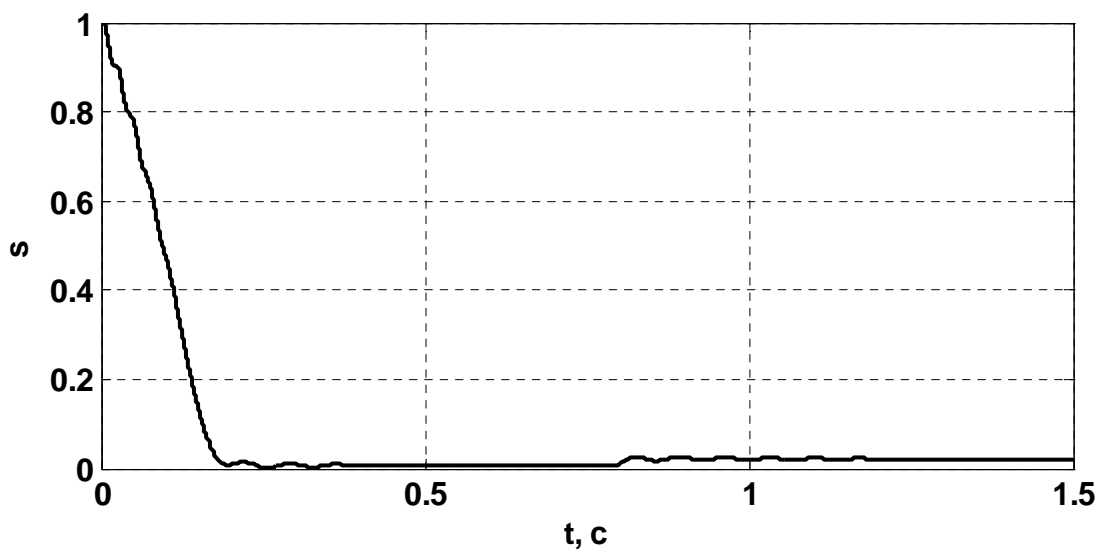


Рисунок 3.19 – Скольжение асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

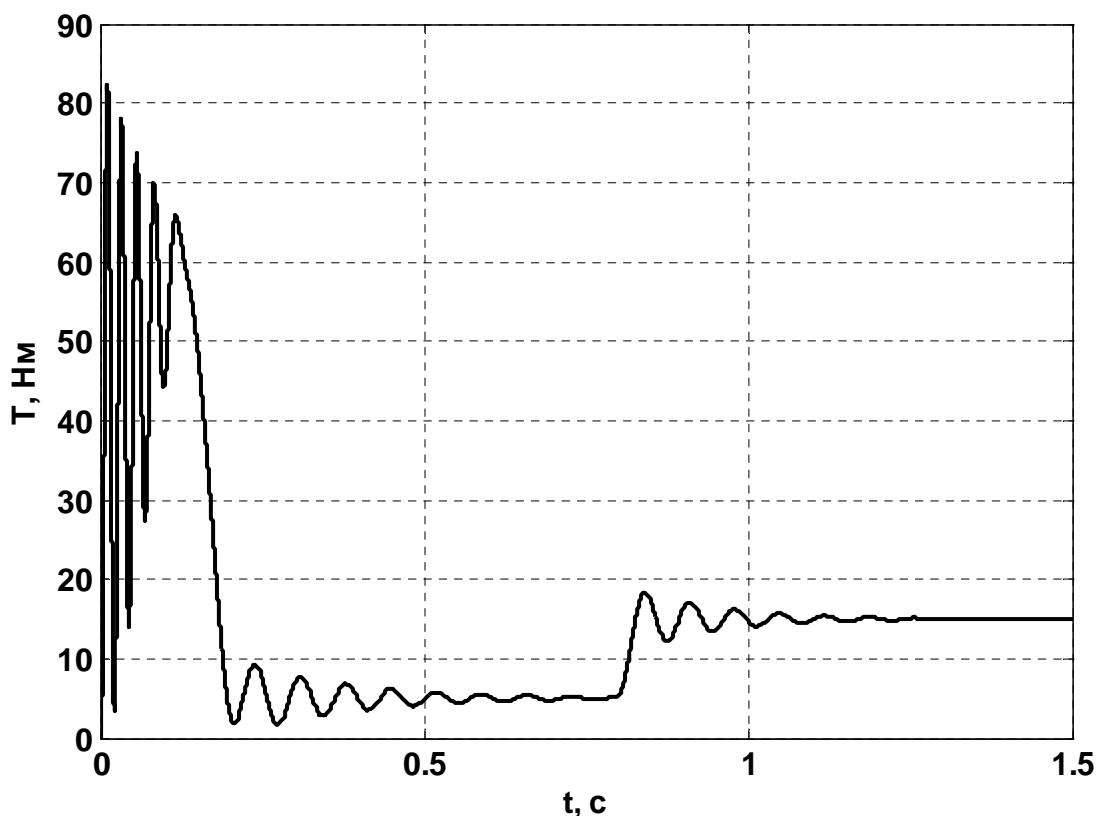


Рисунок 3.20 – Электромагнитный момент асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

Рассмотрение динамической характеристики момента позволяет оценить колебания и изменение значений момента во время всех переходных процессов в двигателе. Статические кривые позволяют рассмотреть только установившиеся (действующие) значения момента для заданных угловых скоростей и не дают в должной мере оценить перегрузки, которые испытывает двигатель при переходных процессах. На графике (рисунок 3.20) хорошо видно, что электромагнитный момент двигателя стремится уравновесить момент сопротивления на валу. Интерес представляет зависимость на рисунке 3.21. Это зависимость электромагнитного момента от угловой скорости двигателя. Здесь хорошо видно колебание момента при изменении угловой скорости. По сути, на данном графике изображен годограф механической характеристики двигателя во время разгона. На

рисунке 3.22 показан график этой зависимости в укрупненном масштабе для момента окончания разгона и установления стационарного режима.

Как можно видеть, годограф движется по спиралевидной траектории, в центре которой находится установившееся значение момента и угловой скорости. На данном графике хорошо видно, как ведут себя механические параметры двигателя при изменении нагрузки на валу.

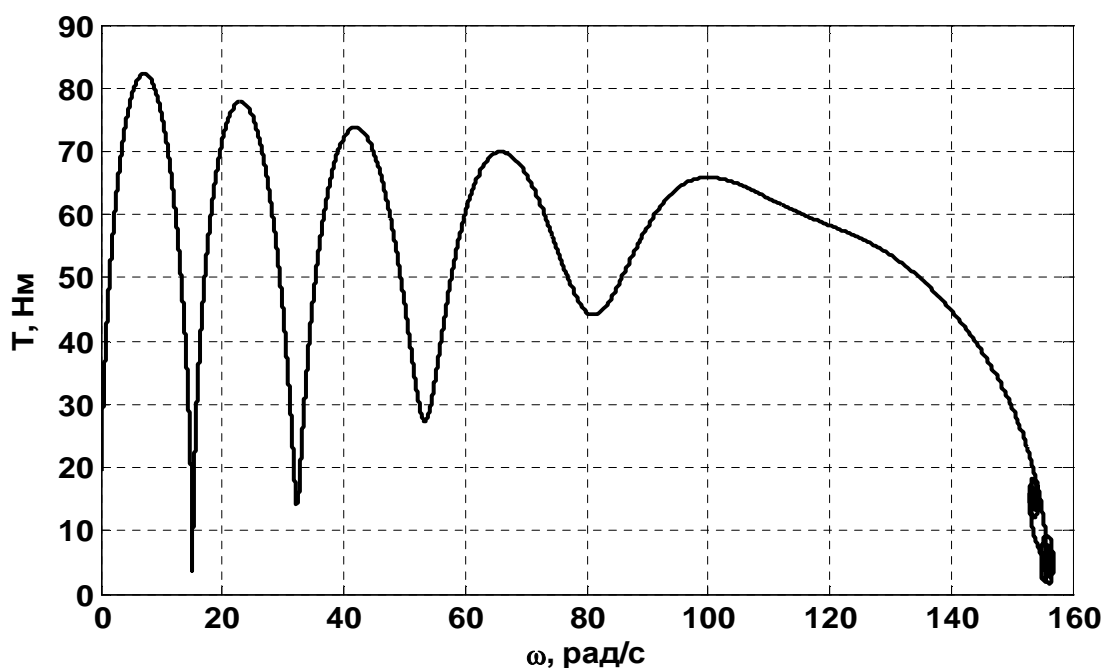


Рисунок 3.21 – Зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от его угловой скорости в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

Используемая в работе методика расчета переходных процессов и модель двигателя позволяют наглядно отобразить этот процесс, что является их достоинством. Следует отметить, что величина, длительность и частота колебаний электромагнитного момента и угловой скорости сильно зависят от момента инерции на валу двигателя. Поскольку чем меньше момент инерции, тем быстрее система приходит в установившийся режим. При больших моментах инерции можно наблюдать достаточно длительные и амплитудные колебания угловой скорости и электромагнитного момента, что может отрицательно влиять на работу механизмов. Эти колебания вызывают колебания амплитуды токов в цепях двигателя, а, следовательно, и в питающей сети, что сильно выражено для мощных высоковольтных

двигателей. Далее это будет продемонстрировано на примере узла нагрузки с мощным двигателем с номинальным напряжением 10 кВ.

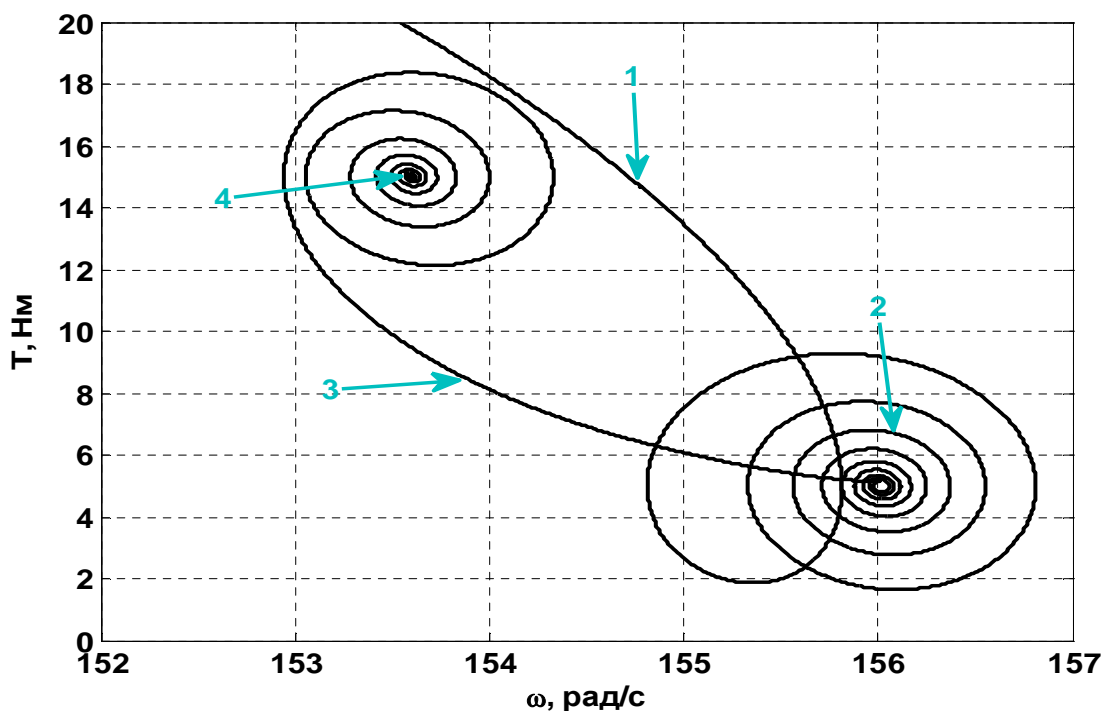


Рисунок 3.22 – Зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от его угловой скорости в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу (укрупненный масштаб для момента изменения механической нагрузки)

Рассмотрим пример моделирования пуска высоковольтного асинхронного двигателя мощностью 5 МВт от источника неограниченной мощности напряжением 10 кВ. Как видно из таблицы у данного двигателя высокий КПД и малое значение скольжения, что означает меньшие перепады угловой скорости при изменении нагрузки на валу. Параметры двигателя приведены в таблице 2.2.

Заметим, что в модели данного двигателя учтен поверхностный эффект в обмотках ротора по формулам (29) и (30).

Показан режим пуска двигателя при нагрузке на валу 500 Нм от источника неограниченной мощности. После разгона двигателя, в момент 1,5 с. после начала моделирования нагрузка на валу увеличивается до 14000 Нм, что близко к номинальному значению момента.

Таблица 2.2 – Параметры асинхронного двигателя (АЗМП-5000)

$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	n , об/мин	z	s	$I_{S_{\text{НОМ}}}$, А	КПД, %
5000	10	2985	1	0,005	328	98
$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	$k_{\text{П}}$	R_s , Ом	R'_r , Ом	L_s , Гн	L'_r , Гн	$L_{\text{ср}}$, Гн
0,9	7	0,13	0,112	0,1959	0,1992	0,1898

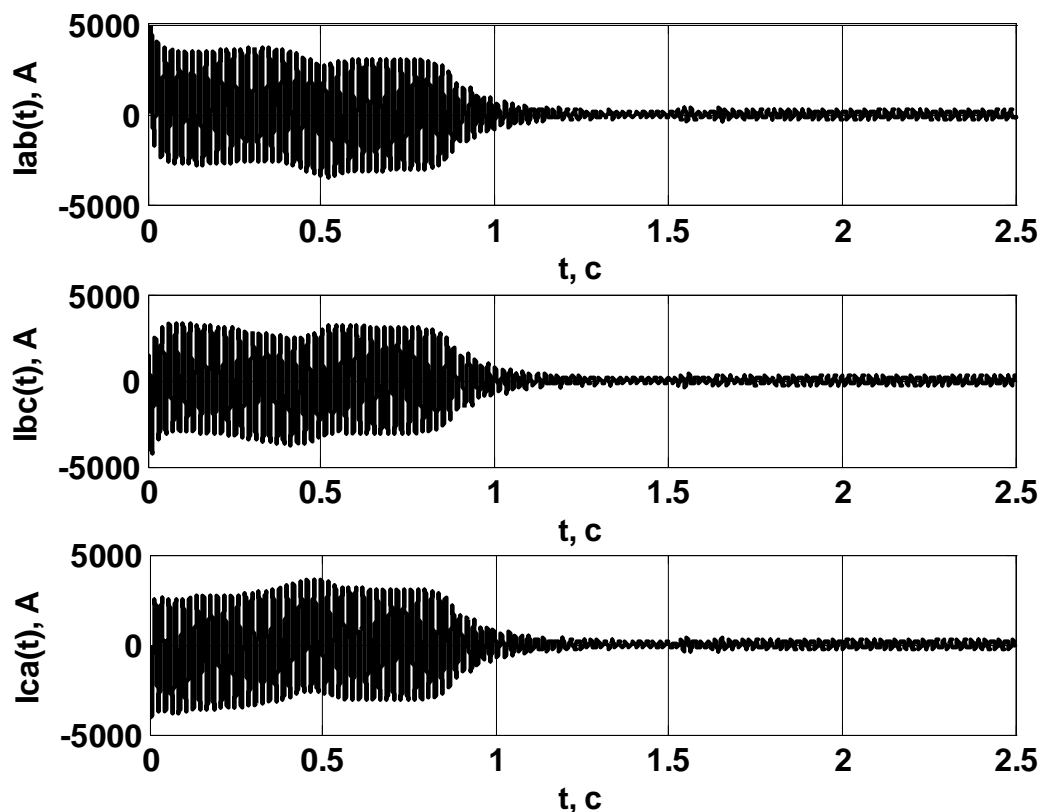


Рисунок 3.23 – Токи статора асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

При пуске двигателя видна аperiodическая составляющая на графиках тока. Сопоставляя графики токов на рисунках 3.23-3.24, и графики электромагнитного момента и угловой скорости на рисунках 3.25 и 3.26 заметим, что аperiodическая составляющая токов присутствует на интервалах времени, когда электромагнитный момент имеет большую амплитуду колебаний. Это происходит в начальный период разгона двигателя, пока угловая скорость мала. Затем аperiodическая составляющая достаточно быстро затухает. На графиках 3.23 – 3.27 этот момент наступает примерно в 0,55 с.

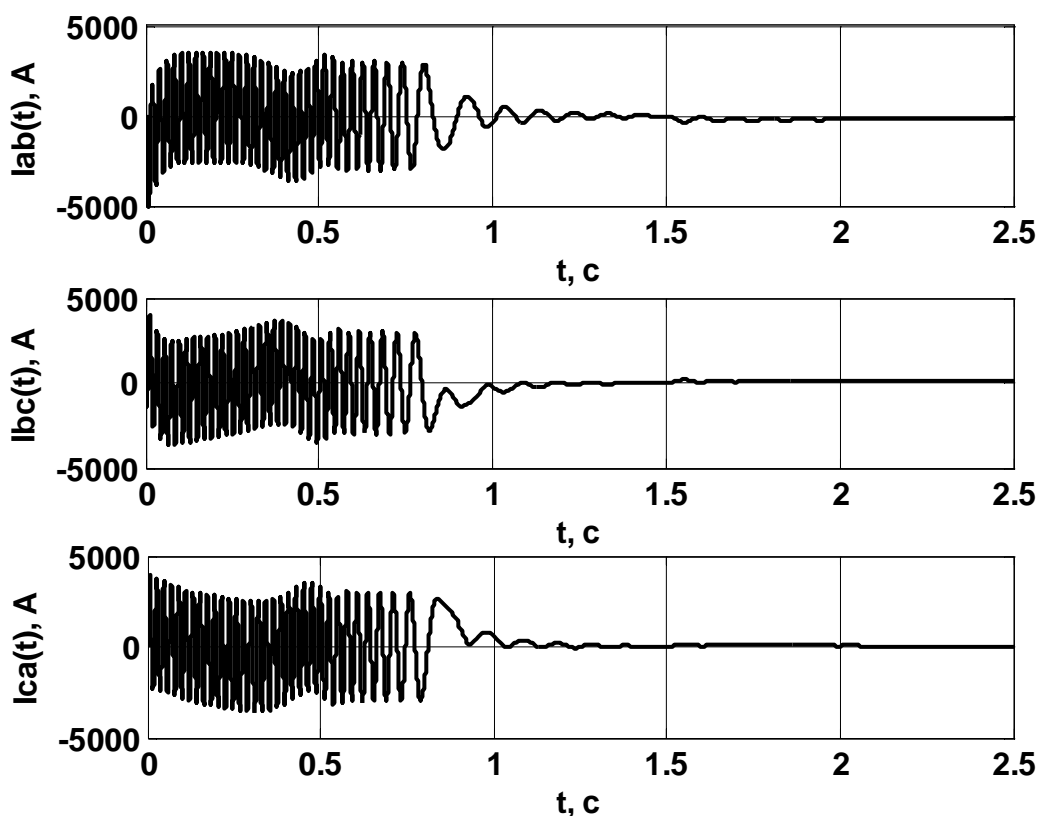


Рисунок 3.24 – Токи ротора асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

Как видно из графиков на рисунках 3.23 – 3.29 разгон двигателя заканчивается в момент времени 0,85 с. от начала пуска. Затем идет электромеханический переходной процесс, связанный с колебанием угловой скорости и электромагнитного момента двигателя относительно их установившегося значения. Продолжительность данного процесса гораздо больше, по сравнению с двигателем из предыдущего примера, это связано с большим моментом инерции ротора двигателя. На графиках тока ротора (рисунок 3.24) хорошо видны колебания, связанные с колебанием угловой скорости. Эти колебания вызваны изменением скорости вращения ротора относительно вращающегося магнитного поля статора. Затем, в момент времени 1,5 с. происходит увеличение нагрузки на валу ротора до значения 14000 Нм, что вызывает новый электромеханический переходный процесс. Колебания электромагнитного момента и угловой скорости при изменении нагрузки хорошо видны на рисунках 3.25 – 3.28. На рисунках 3.28 и 3.29

видно, что колебание электромагнитного момента при изменении нагрузки гораздо больше, чем у маломощного двигателя в предыдущем примере.

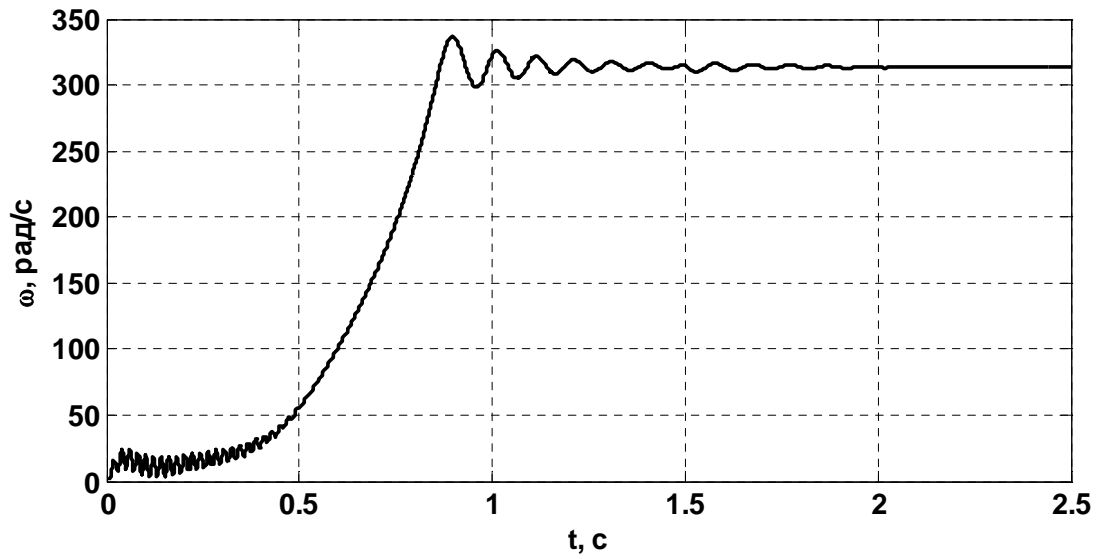


Рисунок 3.25 – Угловая скорость асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

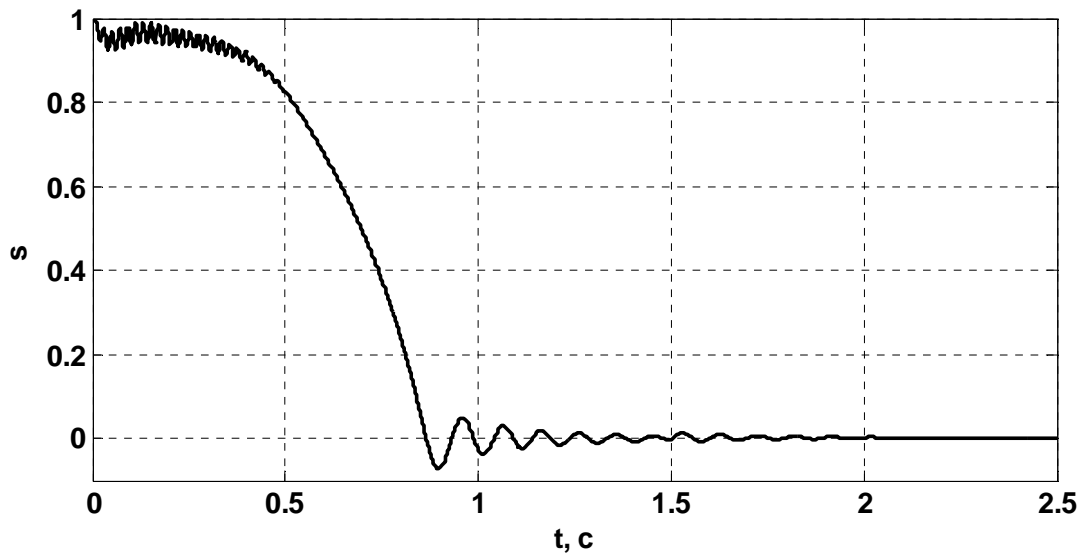


Рисунок 3.26 – Скольжение асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

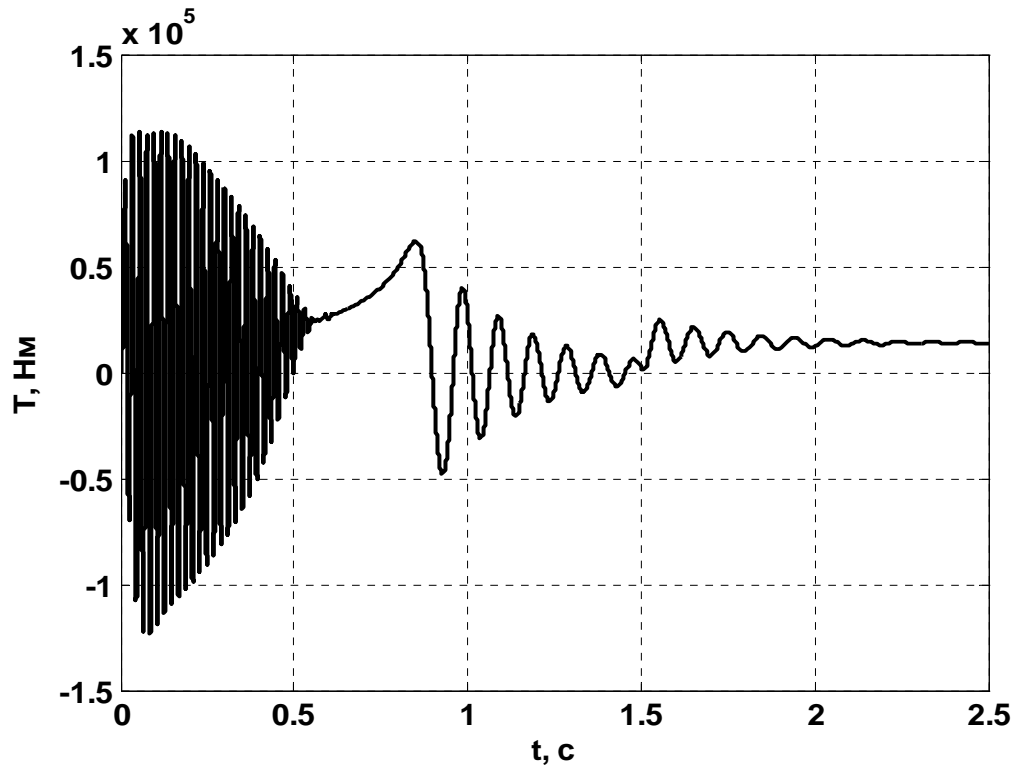


Рисунок 3.27 – Электромагнитный момент асинхронного двигателя в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

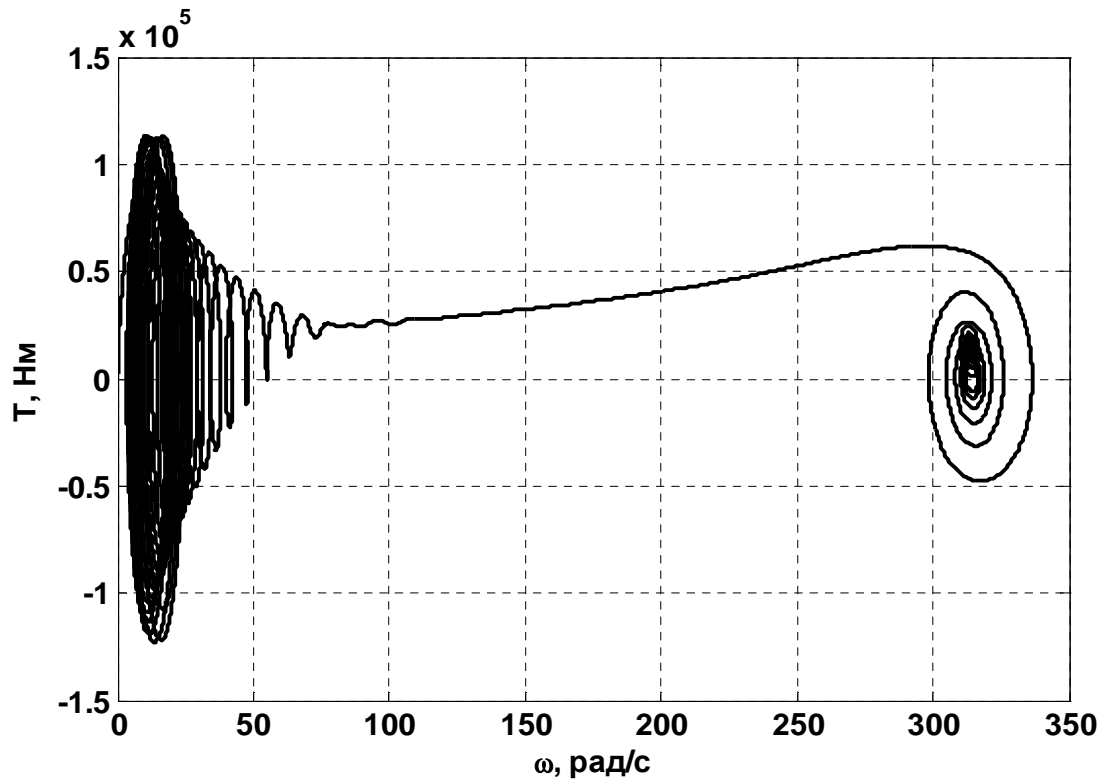


Рисунок 3.28 – Зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от его угловой скорости в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу

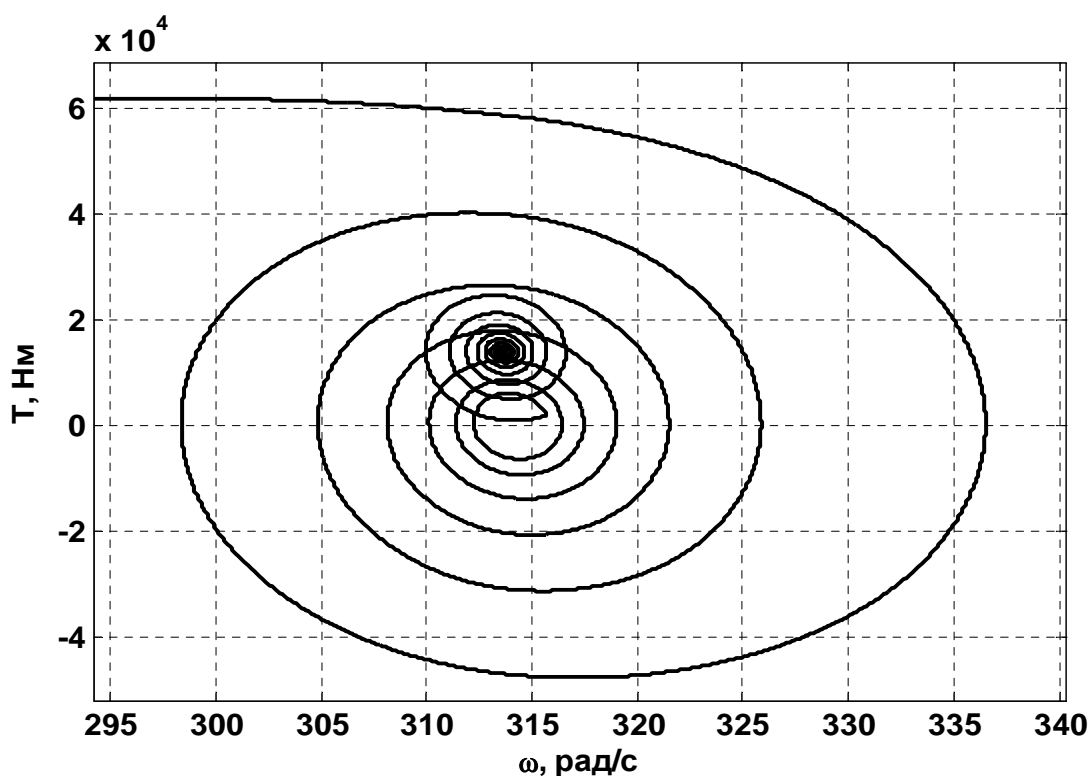


Рисунок 3.29 – Зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от его угловой скорости в режиме пуска и последующего изменения механической нагрузки на валу (укрупненный масштаб для момента изменения механической нагрузки)

В работе [51] показано, что поверхностный эффект в обмотках ротора положительно влияет на процесс разгона двигателя, увеличивая его пусковой момент. Сравним результаты моделирования пуска двигателя АЗМП-5000 с учетом поверхностного эффекта и без него. На рисунке 3.30 показан график токов статора и ротора двигателя при разгоне без учета поверхностного эффекта. Рисунок 3.31 иллюстрирует токи статора и ротора при разгоне с учетом поверхностного эффекта. Электромагнитные моменты и угловые скорости моделей показаны на рисунках 3.32 и 3.33.

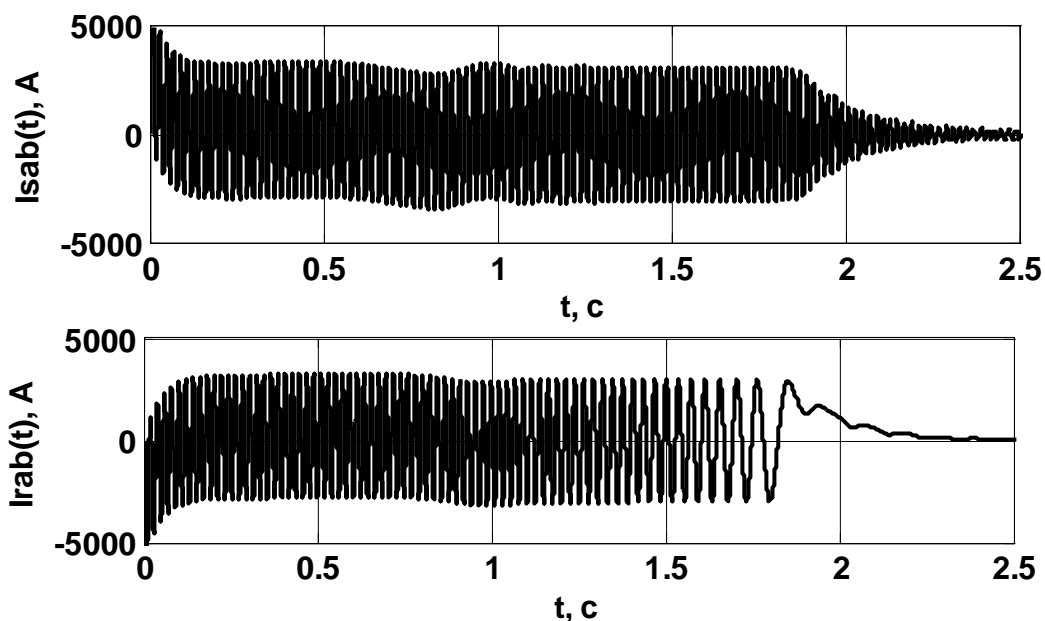


Рисунок 3.30 – Графики токов статора (I_{sab}) и ротора (I_{rab}) при пуске без учета поверхностного эффекта

Как видно из графиков токов статора и ротора, пуск в модели с учетом поверхностного эффекта происходит в 2.2 раза быстрее, чем в модели без учета поверхностного эффекта. Хорошо видно на графиках электромагнитного момента, что критическое значение электромагнитного момента выше для модели с учетом поверхностного эффекта. За счет этого пуск двигателя происходит быстрее. Следует отметить, что модель с учетом поверхностного эффекта ближе к реальности. Кроме того, на графиках угловой скорости (рисунок 3.33) видно, что номинальная угловая скорость достигается в 2.2 раза быстрее в модели с учетом поверхностного эффекта.

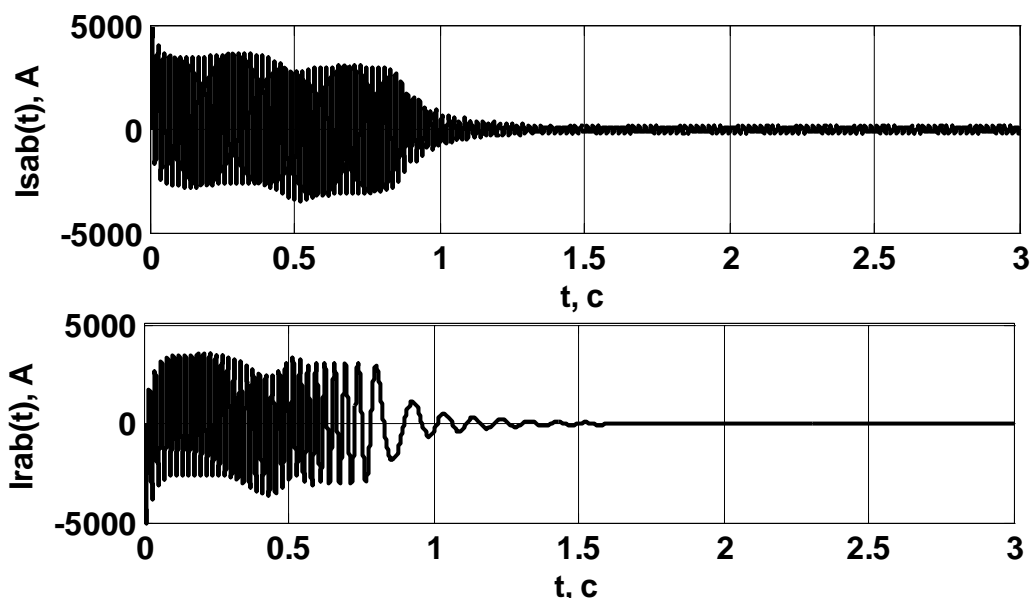


Рисунок 3.31 – Графики токов статора (I_{sab}) и ротора (I_{rab}) при пуске с учетом поверхностного эффекта

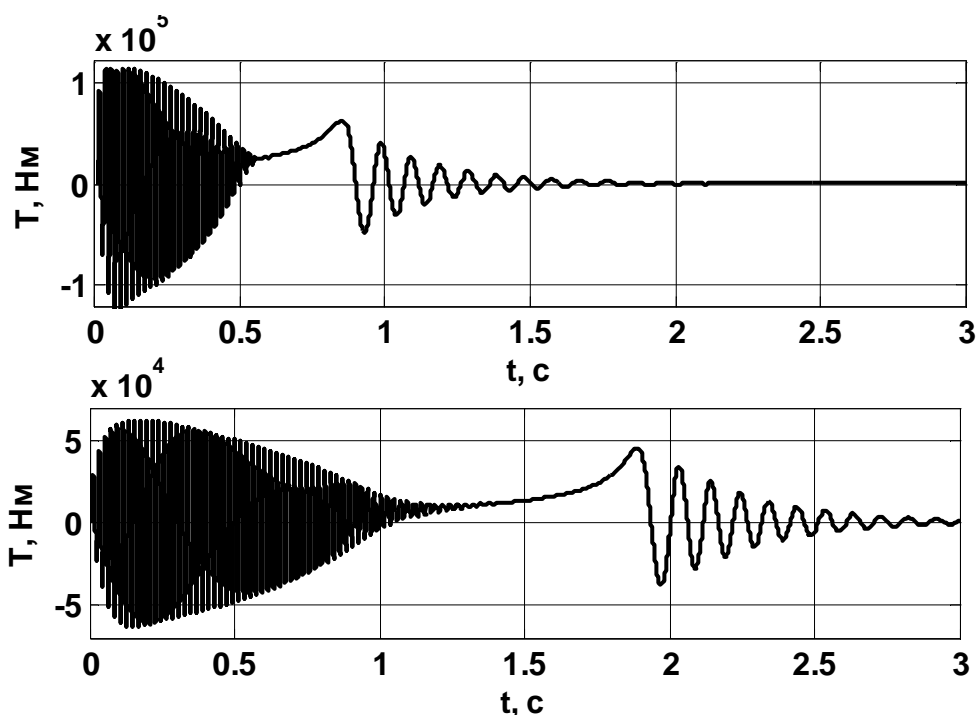


Рисунок 3.32 – Графики электромагнитного момента при пуске двигателя с учетом поверхностного эффекта и без него

Следует отметить, что общая тенденция развития переходного процесса при пуске двигателя в обеих моделях одинакова. Присутствуют апериодические составляющие в токах статора и ротора, их величина одинакова, отличается только скорость затухания. В общем случае, картины переходных процессов очень похожи, но для модели с учетом поверхностного эффекта процесс сжат во времени. Стоит заметить, что

колебания угловой скорости и электромагнитного момента в конце переходного процесса имеют близкую частоту для обеих моделей. Это может быть связано с тем, что при малых скольжениях поверхностный эффект почти не сказывается на сопротивлении цепей ротора и, следовательно, мало влияет на электромагнитный момент и угловую скорость.

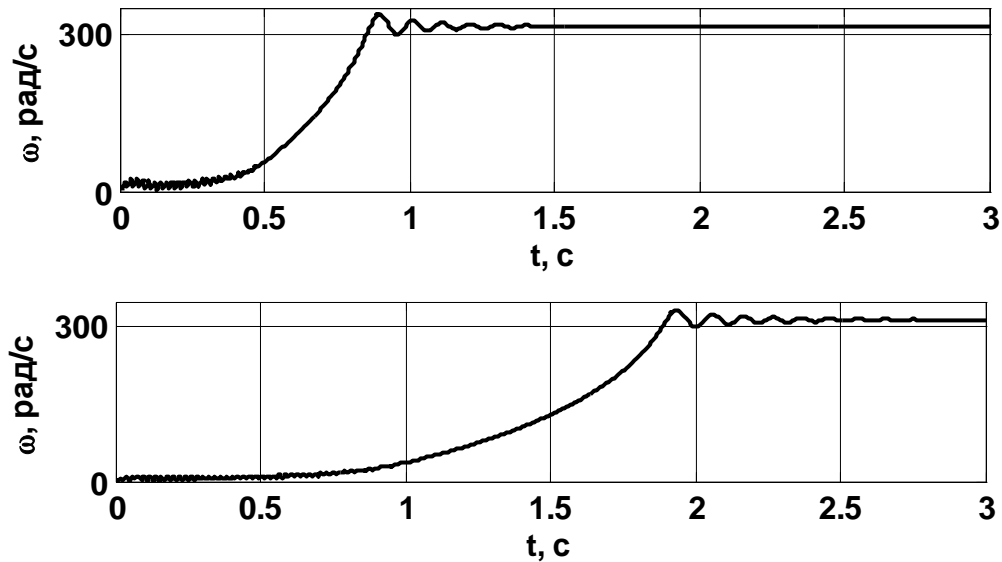


Рисунок 3.33 – Графики угловой скорости при пуске двигателя с учетом поверхностного эффекта и без него

Таким образом, учет поверхностного эффекта влияет на результаты моделирования процессов, когда скольжение сильно отличается от номинального. Это процессы пуска двигателя, выбега и самозапуска. Учет поверхностного эффекта может дать результаты при расчете режимов с отрицательными значениями скольжения двигателя.

Выводы по главе 3

В работе реализованы основные модели элементов, необходимых для моделирования узлов комплексной нагрузки, такие как: линии электропередач, трансформаторы, статическая нагрузка, а так же полупроводниковые комплексы. Все модели элементов реализованы в базе фазных координат и позволяют моделировать электрические сети с учетом режимов заземления нейтрали. В частности:

- 1) При моделировании нагрузок применены подходы к расчету схем с полупроводниковыми элементами.
- 2) Разработана и реализована методика учета нелинейной характеристики индуктивностей. Предлагаемый алгоритм позволяет оценить искажения сигналов в нелинейных индуктивных элементах и показать их влияние на другие участки цепи. Методика позволяет учесть различные физические особенности индуктивных элементов в сети, включая остаточную намагниченность (учет гистерезиса в характеристике намагничивания сердечника). Это может быть полезно при моделировании процессов в силовых комплексах и узлах нагрузки. Учет остаточной намагниченности предложенным в работе способом имеет важное преимущество – данный метод позволяет учесть внутренние петли гистерезиса, что позволяет более точно рассматривать переходные процессы при различных амплитудах сигналов.
- 3) Разработана и реализована математическая модель трансформатора, имеющая преимущества перед резистивными схемами без учета взаимной индуктивности. Используемая модель трансформатора лишена многих недостатков, в отличие от широко применяемой Т-образной схемы замещения, поскольку представляет трансформатор, как совокупность индуктивно связанных ветвей. В модели учет магнитных характеристик сердечника возможен путем непосредственного расчета зависимости магнитной индукции в сердечнике от напряженности магнитного поля с учетом остаточной намагниченности. Реализованные модели трехфазных трансформаторов позволяют проводить моделирование с учетом преобразования уровней напряжения и схем соединения обмоток.
- 4) Применена модель асинхронного двигателя в фазных координатах, которая в совокупности с алгоритмом Доммеля, имеет следующие важные достоинства:
 - а) возможность моделирования несимметричных режимов;

- б) отдельные цепи статора и ротора связанные матрицей индуктивных связей, что позволяет рассматривать и оценивать состояния этих цепей в отдельности;
- в) расчет состояния механических переменных двигателя во времени дает возможность отследить угловую скорость, электромагнитный момент и скольжение двигателя во время переходных процессов;
- г) модель дает возможность моделировать переходные процессы при несимметричных режимах работы двигателя;
- д) учет эффекта вытеснения тока в роторе позволяет более адекватно моделировать пусковые режимы двигателей;
- е) совокупность модели двигателя и методики расчета переходного процесса позволяет моделировать режим выбега АД в режиме рекуперации, что дает возможность оценить влияние данного режима на сеть;
- ж) методика позволяет задавать момент сопротивления на валу двигателя переменным, в зависимости от различных величин модели: времени, угловой скорости ротора или других величин.

ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ УЗЛОВ КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ

Разработанная методика использована для моделирования и анализа переходных режимов электрических систем с различными параметрами и нелинейными элементами. В частности, проведено моделирование систем, содержащих полупроводниковые элементы, индуктивности с учетом остаточной намагниченности сердечника, трансформаторы, электрические двигатели и другие элементы.

4.1 Моделирование силового полупроводникового комплекса с ШИМ управлением

Для демонстрации работы вышеописанной методики и моделей проведем моделирование работы двухфазного преобразователя частоты состоящего из мостового выпрямителя и мостового инвертора с ШИМ управлением [10]. Блок-схема преобразователя приведена на рисунке 4.1, а. Исследуемая схема приведена на рисунке 4.1, б., ее параметры: $E1 = 220\sin(2\pi \cdot 50 \cdot t)$, $R1 = 1$ Ом, $R2 = 40$ Ом, $L2 = 0,07$ Гн, $C7 = 700$ мкФ, $C16 = 70$ мкФ, $L17 = 0,1$ Гн, $R17 = 2$ Ом. Для упрощения, транзисторы инвертора моделируются ключами, управляемыми сигналами ШИМ. Диоды в схеме представлены как нелинейные элементы. Их вольтамперная характеристика задана таблично. Из описания модели следует, что рассчитывается схема с 8-ю нелинейными элементами. Частота ШИМ составляет 1200 Гц. Частота модулирующего сигнала ШИМ равна 60 Гц.

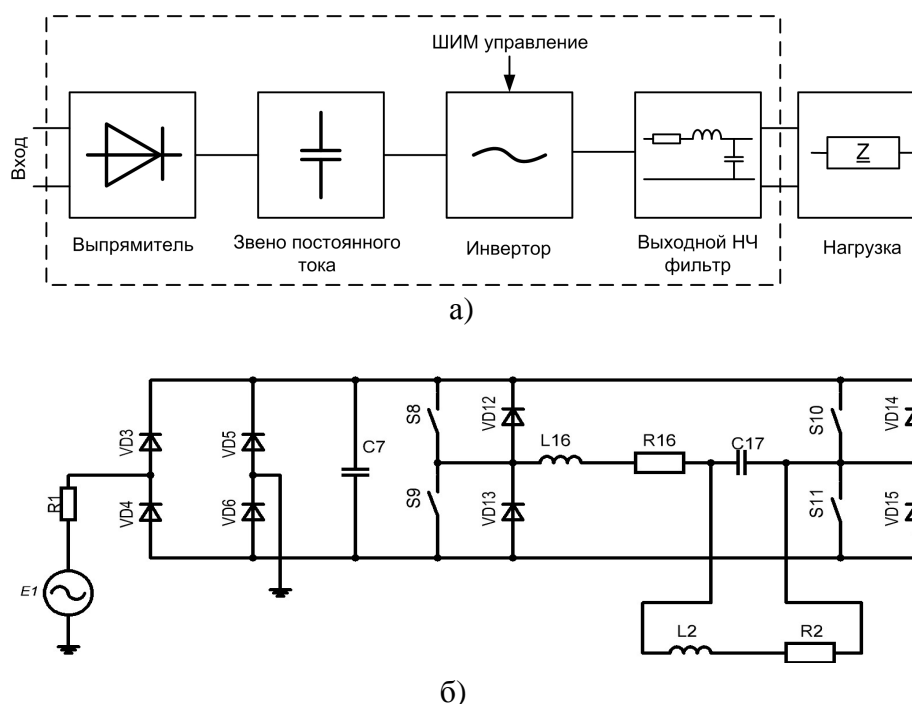


Рисунок 4.1 – Блок-схема (а) и электрическая схема (б) исследуемого преобразователя частоты

Для демонстрации работы методики были промоделированы несколько режимов работы рассматриваемой схемы при различных параметрах нагрузки.

В исследуемой схеме нагрузка представлена индуктивностью $L2$ и активным сопротивлением $R2$. Их соотношение принято таким, что $\cos \varphi$ нагрузки равен 0,8. Параметры фильтра $L18$, $R18$, $C19$ рассчитаны исходя из этой нагрузки. Фильтр рассчитывался при частоте среза 60 Гц.

Графики значений токов и напряжений, полученных при моделировании работы схемы с указанными параметрами, приведены на рисунке 4.2. Значения токов и напряжений взяты в характерных узлах и ветвях схемы. Графики построены для установившегося режима работы схемы после ее включения. Следует отметить, что при моделировании вычисляются значения токов и напряжений для всех элементов схемы в каждый момент времени для заданного шага моделирования.

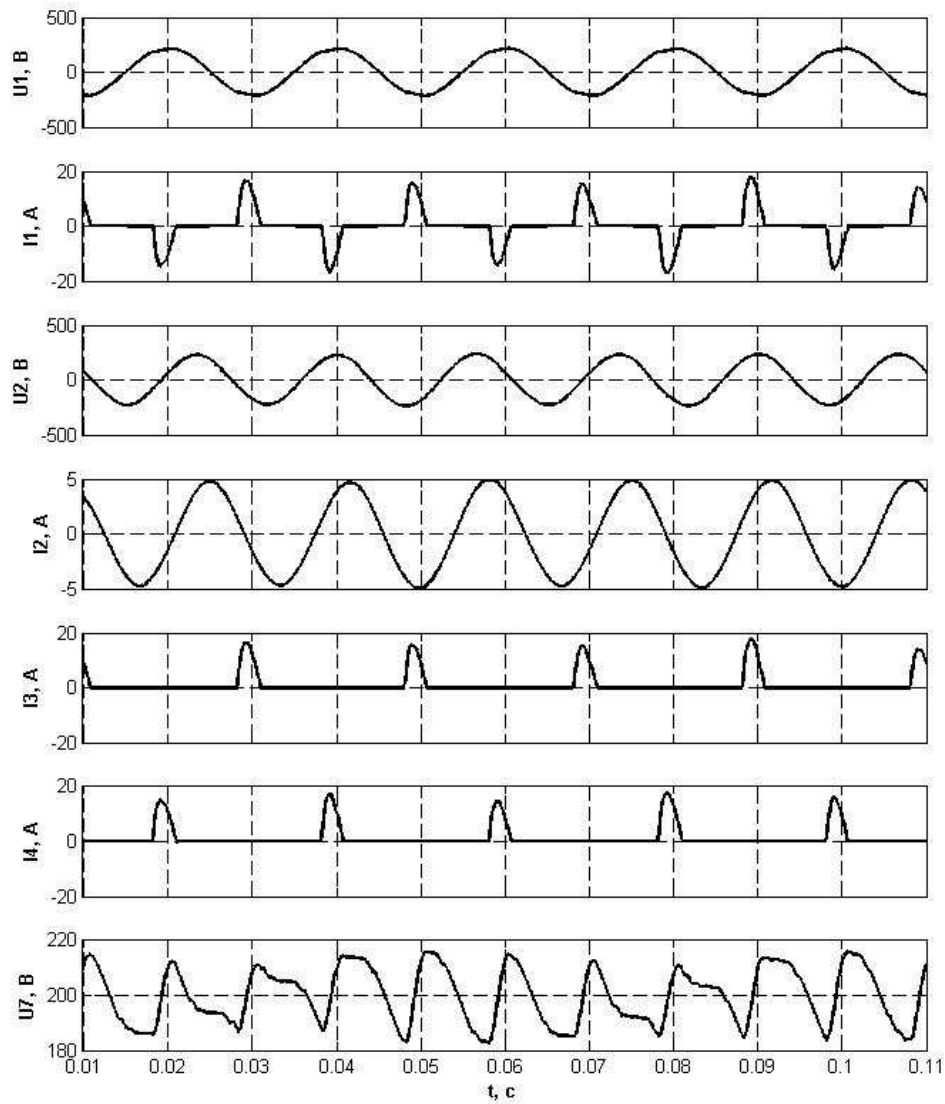


Рисунок 4.2 – Кривые токов и напряжений в отдельных ветвях и узлах схемы в номинальном режиме работы

Графики хорошо иллюстрируют работу диодов, как нелинейных элементов и выпрямителя с инвертором, как сложных устройств с нелинейными характеристиками. Из графиков на рисунке 4.2 хорошо видно влияние выпрямителя на питающую его сеть. Если напряжение $U1$ в ветви источника имеет небольшие искажения в районе максимумов синусоиды, в моменты коммутации диодов выпрямителя, то ток источника $I1$ имеет явно несинусоидальную форму. Если взять спектр сигнала тока $I1$, полученный при разложении в ряд Фурье (рисунок 4.3) то отчетливо видно, что величина нечетных гармоник сопоставима с величиной сигнала промышленной

частоты.

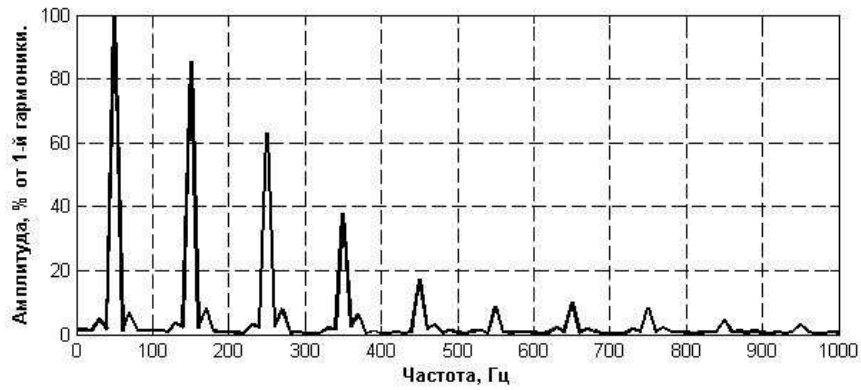


Рисунок 4.3 – Спектр сигнала тока в источнике

Графики напряжения U_2 и I_2 на рисунке 4.2 показывают напряжение и ток нагрузки. Как видно из графиков сигналы практически синусоидальны, что говорит о правильно подобранных параметрах выходного фильтра инвертора. Для примера произведен расчет схемы на рисунке 4.1,б с другими параметрами фильтра: $C16 = 20$ мкФ, $L17 = 0,1$ Гн. Ток и напряжение нагрузки при таких параметрах схемы показаны на рисунке 4.4, спектры напряжения и тока показаны на рисунке 4.5. На графиках сигналов, а так же на графике спектра хорошо видно наличие третьей гармоники 180 Гц при основной частоте работы нагрузки равной 60 Гц. Кроме того, в спектре можно обнаружить более высокие нечетные гармоники, но их амплитуда в нагрузке мала, благодаря наличию фильтра. Появление данных гармоник связано с ШИМ модуляцией работы инвертора.

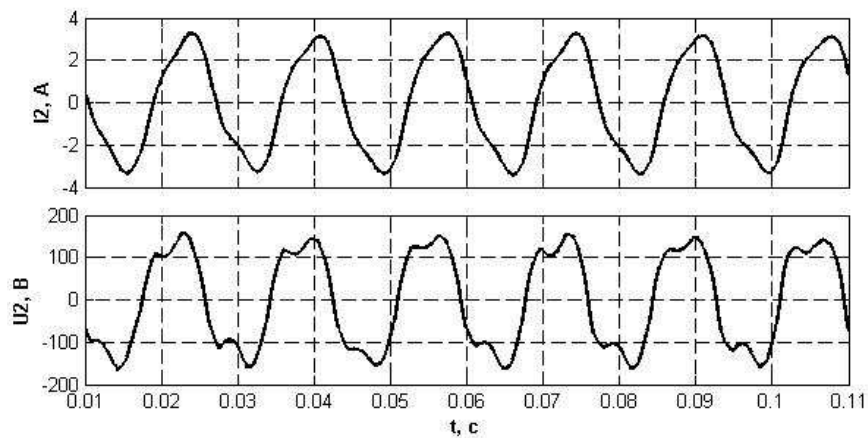


Рисунок 4.4 – Графики сигналов тока (а) и напряжения (б) нагрузки инвертора при неправильно подобранных параметрах выходного фильтра

Как отмечено выше, примененная методика не накладывает ограничений на форму сигналов и частоту управляющих импульсов для управляемых элементов схемы (в данном случае – управляемые ключи), которая ограничена только выбранным шагом дискретизации. Это дает возможность рассмотреть работу инвертора для разных частот ШИМ.

Рассмотрим спектр тока и напряжения нагрузки, когда частота ШИМ равна 6000 Гц. На рисунке 4.6 показаны графики спектров токов и напряжений на нагрузке при выходном фильтре инвертора с частотой среза 100 Гц (а) и при отсутствии выходного фильтра (б).

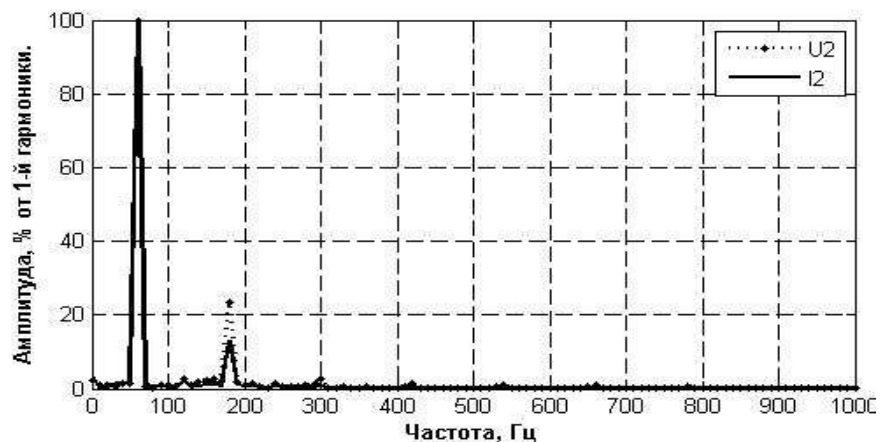


Рисунок 4.5 – Спектр сигналов тока и напряжения нагрузки инвертора при неправильно подобранных параметрах выходного фильтра

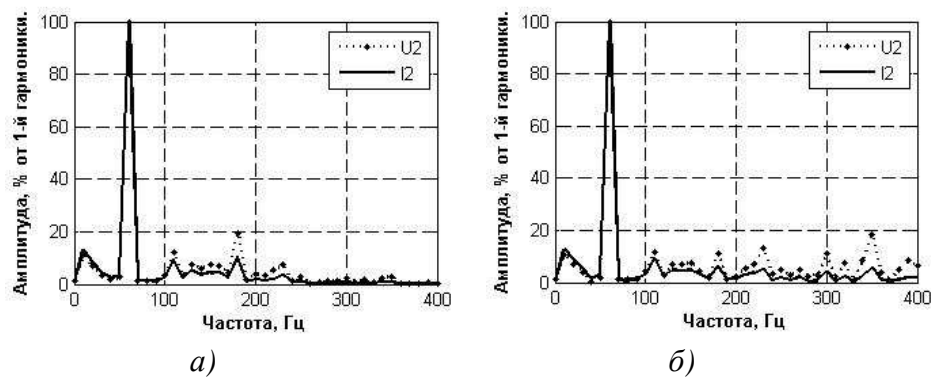


Рисунок 4.6 – Спектр сигналов тока и напряжения нагрузки, когда частота ШИМ равна 6 кГц, а – при наличии фильтра в схеме, б – при отсутствии фильтра в схеме

На графиках хорошо виден эффект от применения фильтра нижних частот. Кроме того, можно отметить наличие в спектре значительного пика левее первой гармоники. Этот пик соответствует частоте 10 Гц, которая появляется в выходном сигнале как разностная от 50 Гц и модулирующей

частоты ШИМ 60 Гц. Исследования проводились для частот ШИМ 0,6; 1,2 и 6 кГц. Для всех частот получены аналогичные результаты.

Таким образом, используемая методика и модели элементов позволяют оценить влияние различных параметров алгоритма управления ключами и параметров схемы на результаты ее работы. Возможно рассмотреть работу схем с полупроводниковыми и управляемыми элементами в целом и отдельных их элементов в различных стационарных и нестационарных режимах. Это может быть полезно для анализа работы преобразователей и их нагрузки, а так же для задач оптимизации алгоритма управления ключами.

4.2 Моделирование узла нагрузки СЭС с мощным асинхронным двигателем

В качестве примера, иллюстрирующего расчет переходных процессов в узле комплексной нагрузки, рассмотрим модель узла, показанного на рисунке 4.7.

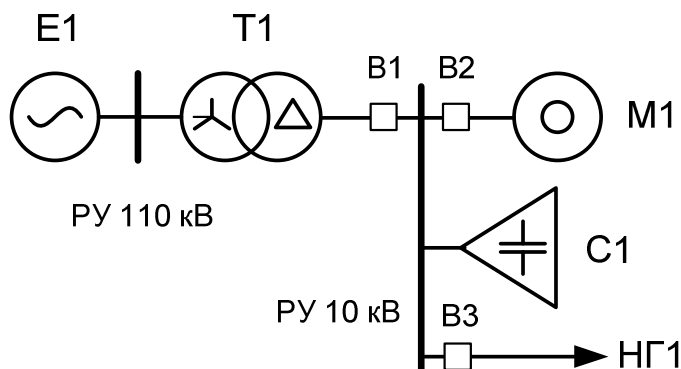


Рисунок 4.7 – Схема исследуемого узла нагрузки

Параметры элементов данного узла следующие:
 $E_1 = \sqrt{2} \cdot 115 \cdot \sin(2 \cdot 50 \cdot \pi)$, параметры трансформатора T1 описаны в таблице 4.1. Параметры двигателя M1 - в таблице 4.2, нагрузка: $S_{НГ1} = 1 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos \varphi_{НГ1} = 0,9$, компенсирующее устройство имеет мощность $Q_{C1} = 840 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$. Параметры обмоток трансформатора в именованных единицах рассчитаны приблизительно по паспортным данным.

Для демонстрации работы методики произведено моделирование нескольких режимов работы указанного узла нагрузки: пуск двигателя на вентиляторную нагрузку при работающем узле нагрузки, выбег двигателя при отключении питания узла нагрузки с последующим возобновлением питания, несимметричные режимы работы узла нагрузки.

Таблица 4.1 – Параметры трансформатора Т1

S, МВ·А	$U_{ВН}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	ΔP_K , кВт	u_K , %	ΔP_X , кВт
16	110	11	85	10,5	18
I_X , %	$R_{ВН}$, Ом	$L_{ВН}$, Гн	$R_{НН}$, Ом	$L_{НН}$, Гн	$M_{В-Н}$, Гн
0,7	2,21	1,3933	0,22	0,0139	0,1393

Таблица 4.2 – Параметры асинхронного двигателя М1 (АЗМП-5000)

$P_{НОМ}$, кВт	$U_{ном}$, кВ	n , об/мин	z	S	$I_{S_{НОМ}}$, А	КПД, %
5000	10	2985	1	0,005	330	98
$\cos \varphi_{НОМ}$	$k_{П}$	R_s , Ом	R'_r , Ом	L_s , Гн	L'_r , Гн	L_{sr} , Гн
0,9	7	0,13	0,112	0,1959	0,1992	0,1898

1. Пуск двигателя на вентиляторную нагрузку при работающем узле осуществляется с характеристикой механического момента сопротивления на валу, заданной по формуле (31). В этом режиме в начальный момент времени выключатели В1 В3 замкнуты, а выключатель В2 разомкнут. Пуск происходит в момент времени $t = 0.1$ с. при включении выключателя В2.

$$T_M = \omega^2 / 6,6 \quad (31)$$

Ток на шинах и скольжение двигателя показаны на рисунке 4.8. Графики на рисунке 4.8 иллюстрируют работу методики при переходных процессах в узле нагрузки, связанных с нестационарными режимами электродвигателя. Во время разгона двигателя в статоре и сети течет пусковой ток, амплитуда которого начинает уменьшаться только при

достижения скольжения, близкого к номинальному. Следует отметить значительное изменение амплитуды напряжения на стороне 10 кВ в силу большой пусковой мощности двигателя при самозапуске.

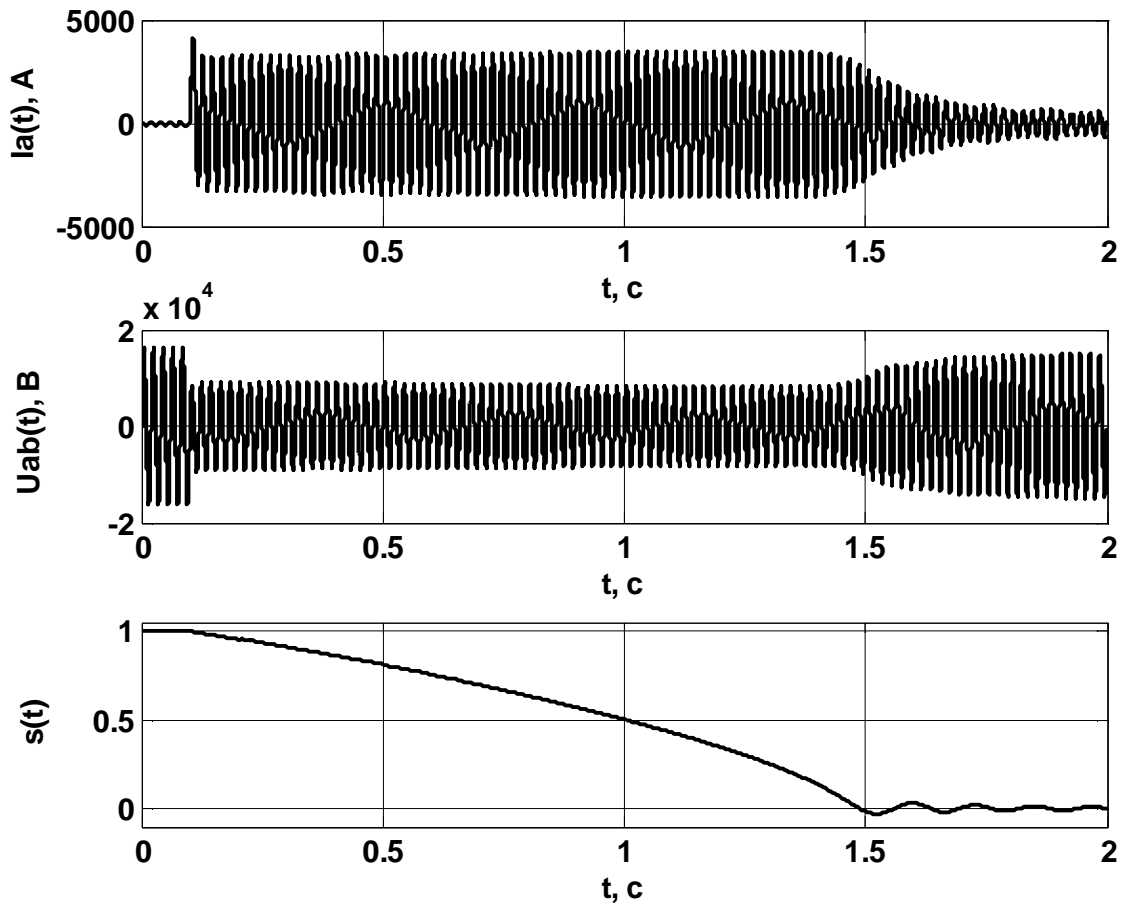


Рисунок 4.8 – График тока фазы А на шинах узла нагрузки и скольжения асинхронного двигателя при его пуске

На рисунке 4.9 показан график изменения электромагнитного момента двигателя во времени при рассматриваемом переходном процессе. На данном графике видно, что момент двигателя в конце переходного процесса стремится к номинальному значению механического момента. При заданной характеристике (31), равной $T_e = T_M = 14800$ Нм. Характеристику изменения момента во время запуска двигателя удобно рассматривать на графике зависимости изменения момента от угловой скорости, показанного на рис 4.10.

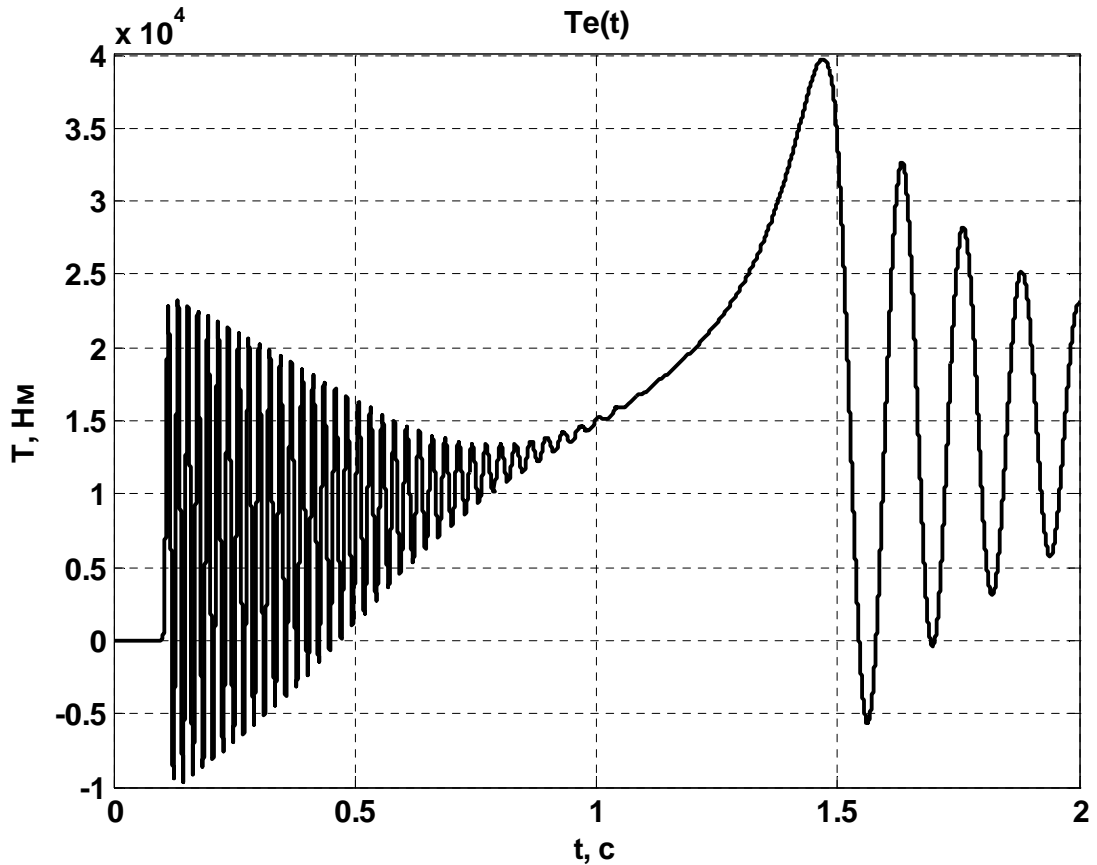


Рисунок 4.9 – График зависимости электромагнитного момента на валу двигателя от времени при его самозапуске на вентиляторную нагрузку

На графике отчетливо видно колебание мгновенных значений момента по мере увеличения угловой скорости, точку максимального электромагнитного момента и участок затухающих колебаний и электромагнитного момента вокруг установившихся значений обеих величин. В установившемся режиме годограф стремится в точку с координатами равными номинальной угловой скорости и моменту при данной нагрузке на валу двигателя.

Рассмотрение режима работы статической нагрузки, ток которой показан на рисунке 4.10, показывает сильное падение мощности на ней, что видно из графика тока нагрузки на рисунке 4.10 и графика напряжения на шинах на рисунке 4.8. Это говорит о том, что понижающий трансформатор мощностью 16 МВ·А не справляется с отбором мощности при прямом пуске асинхронного двигателя мощностью 5 МВт, что более чем в три раза меньше

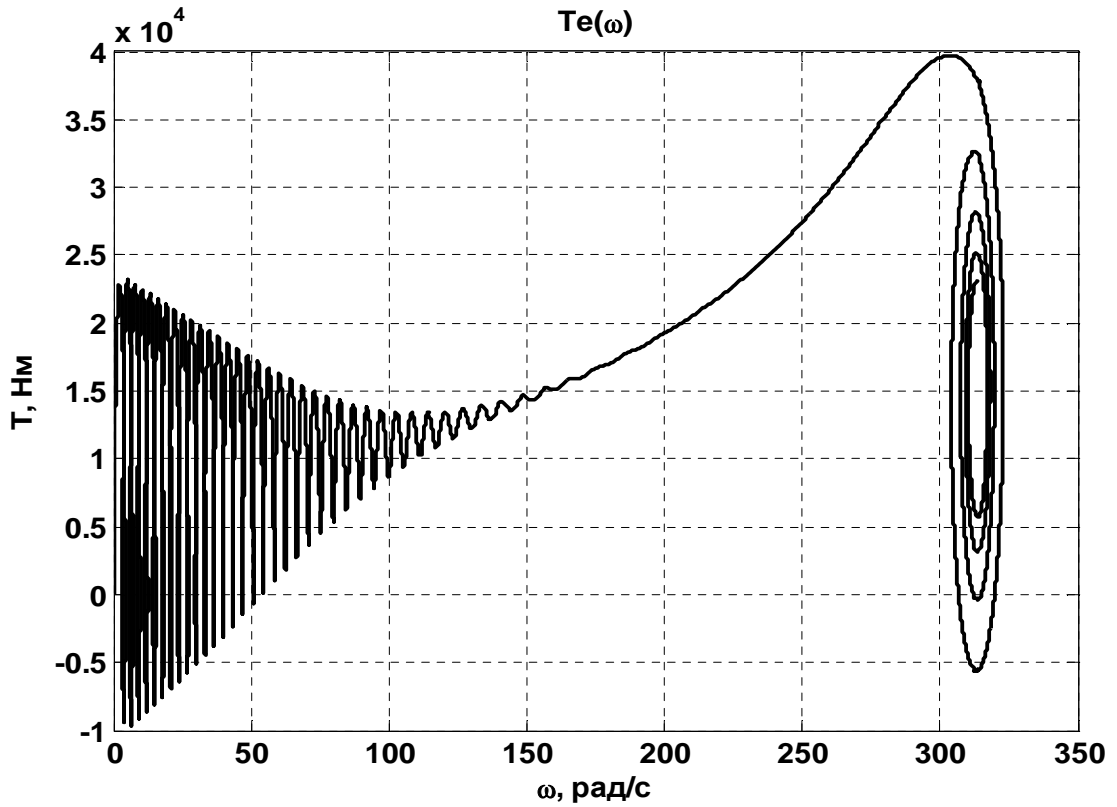


Рисунок 4.10 – График зависимости электромагнитного момента на валу двигателя от угловой скорости двигателя при его самозапуске на вентиляторную нагрузку

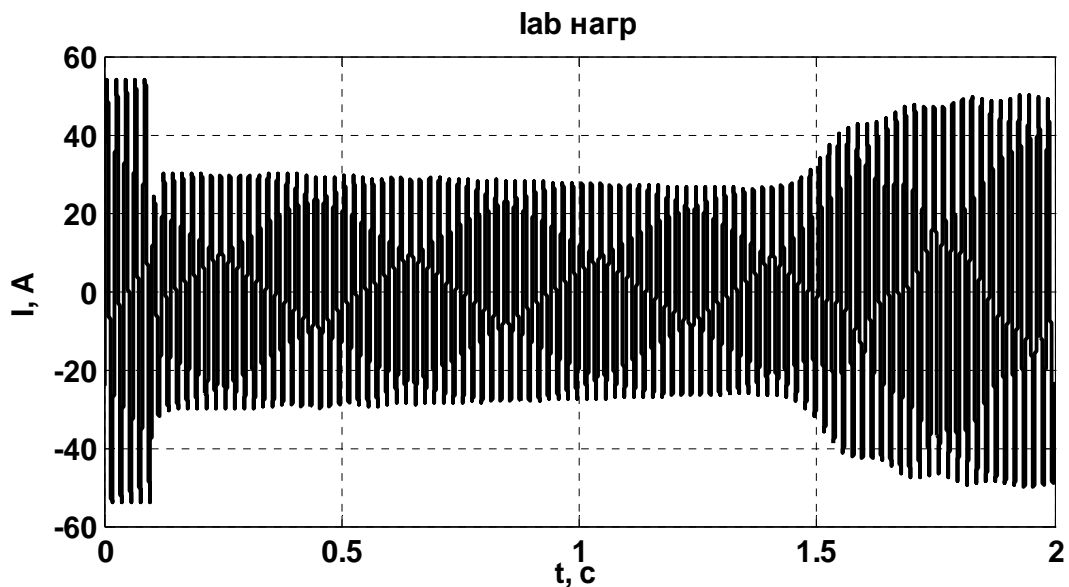


Рисунок 4.11 – График тока ветви фазы *AB* статической нагрузки узла при прямом пуске асинхронного двигателя

мощности трансформатора. Вследствие этого происходит значительный провал напряжения на шинах 10 кВ и снижение тока нагрузки (рисунок 4.11). Следует отметить, что такой провал напряжения не допустим по

современным нормам качества электроэнергии. Заметим, что мощность статической нагрузки в данной модели мала по сравнению с мощностью двигателя и мало влияет на работу узла нагрузки.

2. Выбег двигателя при отключении питания узла нагрузки с последующим возобновлением питания. Данный режим показан при начальных условиях установившегося режима работы узла, когда все выключатели включены. В момент времени $t = 0,1$ с. происходит отключение питания нагрузок узла отключением выключателя В1. Затем происходит включение питания нагрузок узла в момент времени $t = 1,5$ с включением выключателя В1.

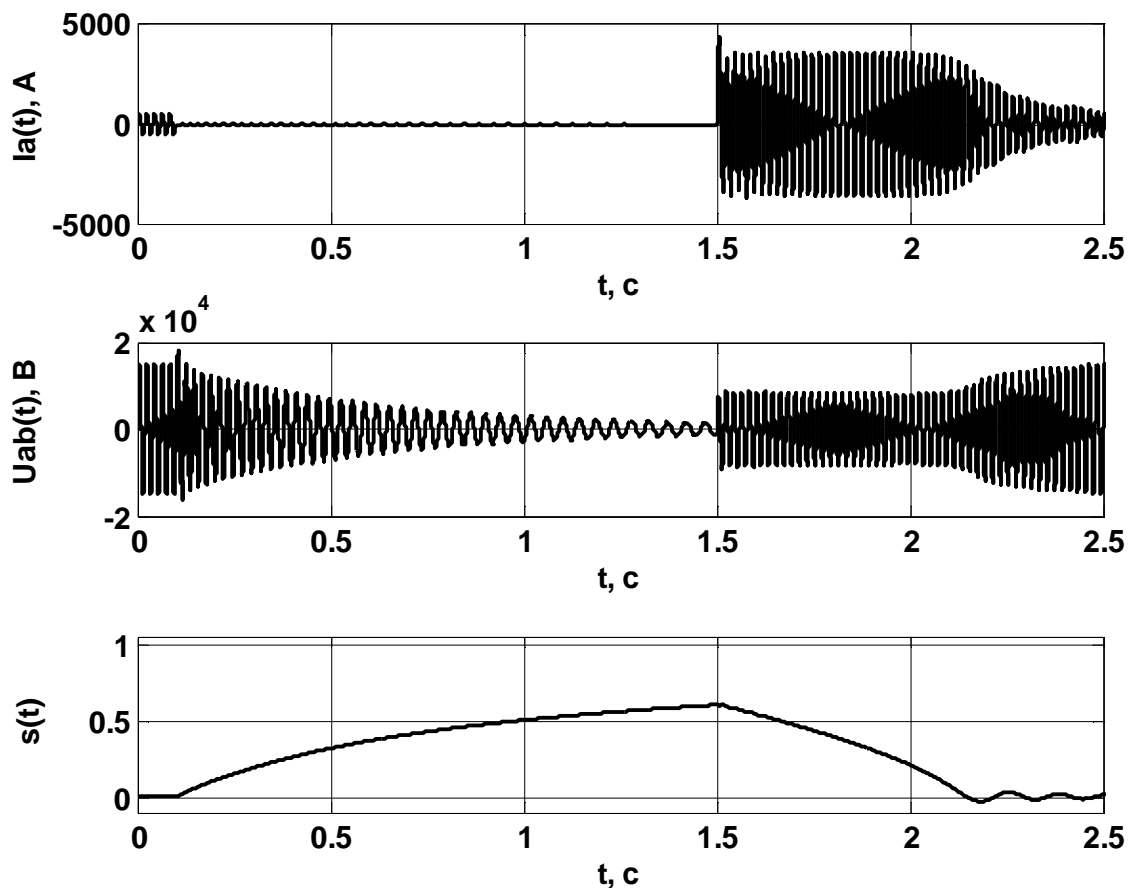


Рисунок 4.12 – График тока фазы А статора электродвигателя М1, напряжения на шинах узла нагрузки и скольжения двигателя М1

На рисунке 4.12 показан ток в статоре двигателя, поскольку в момент выбега именно двигатель является источником напряжения и через него течет суммарный ток узла. Из графиков видно, что, как и предполагается,

напряжение в узле пропадает не мгновенно, а начинает постепенно спадать. При этом частота сети зависит от частоты вращения ротора двигателя, поскольку двигатель работает в генераторном режиме. Кроме того, переходный процесс при отключении верхней стороны трансформатора приводит к появлению высших гармоник на резонансной частоте индуктивной составляющей нагрузки и емкостью устройства компенсации реактивной мощности, что видно на рисунке 4.13.

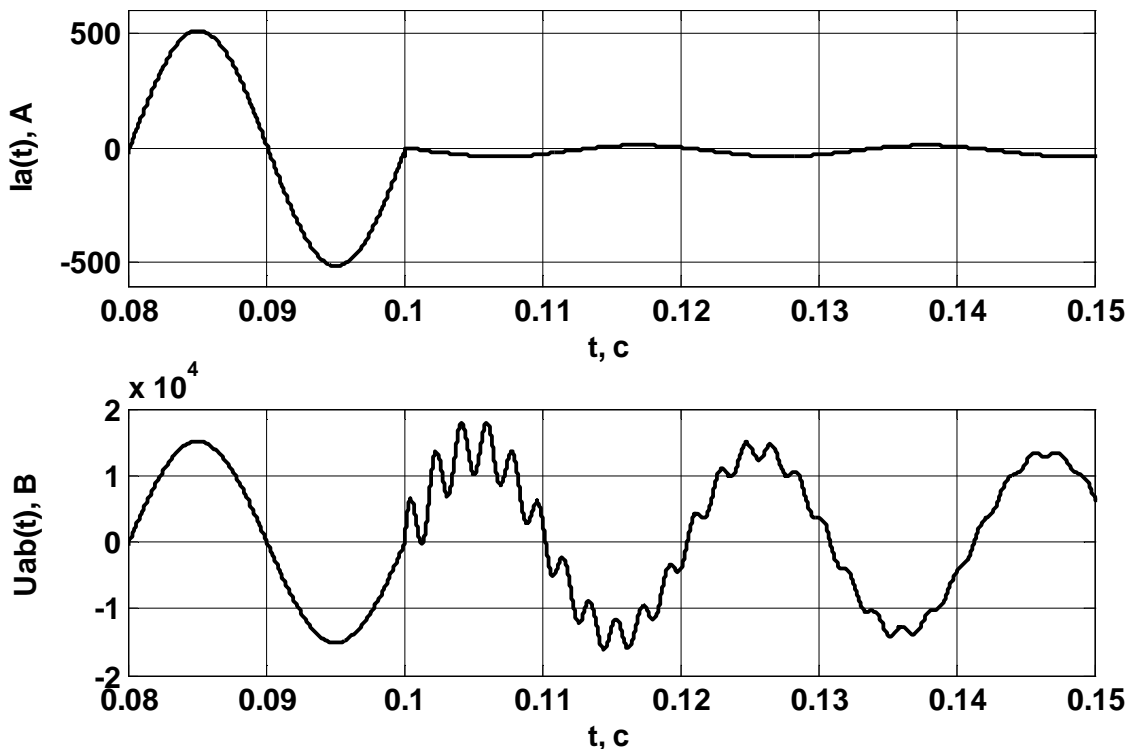


Рисунок 4.13 – График тока фазы А статора электродвигателя М1 и напряжения на шинах узла нагрузки М1 в начале переходного процесса при отключении шин 10 кВ со стороны трансформатора Т1

Электромагнитный момент двигателя, показанный на рисунке 4.14, при отключении питания переходит в отрицательную область, что свидетельствует о режиме выбега с рекуперацией. По мере спадания рекуперативного тока в двигателе, электромагнитный момент двигателя стремится к нулю. После возобновлении питания, изменение электромагнитного момента повторяет картину, полученную при пуске двигателя. Поскольку самозапуск происходит из режима рекуперации, что

видно из рисунка 4.15, при ненулевой скорости вращения ротора, картина нарастания угловой скорости и колебания момента при разгоне

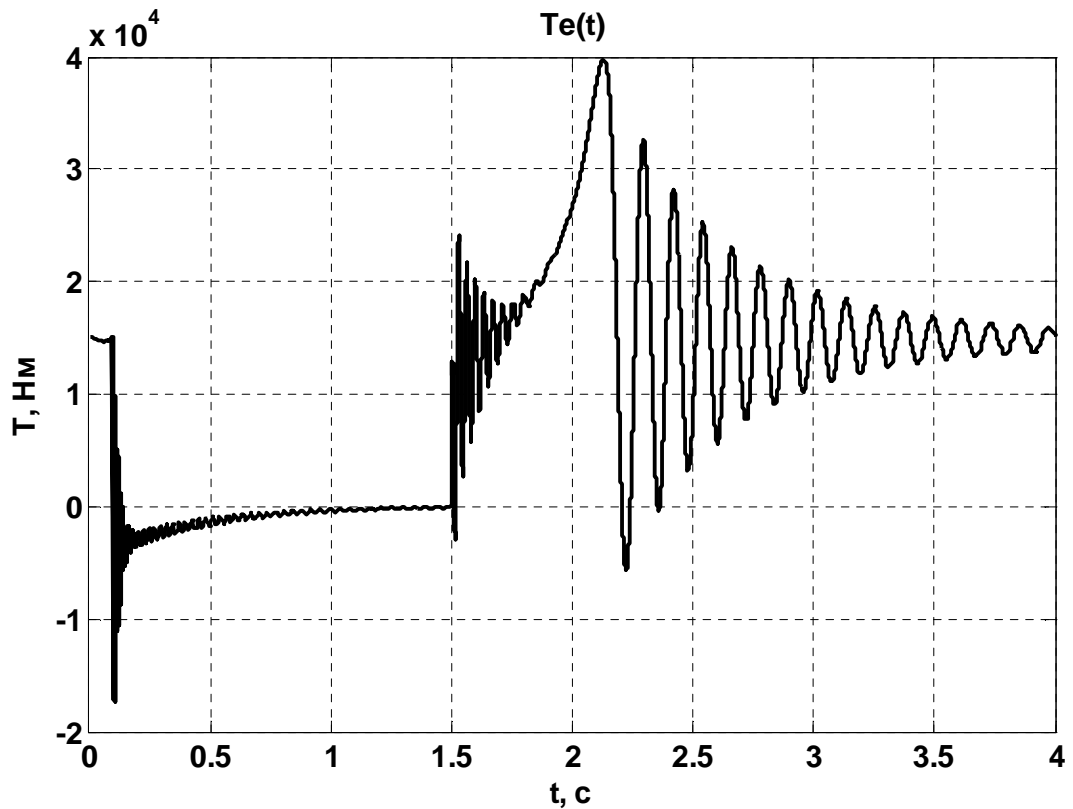


Рисунок 4.14 – График зависимости электромагнитного момента на валу двигателя от времени при его выбеге и последующем самозапуске

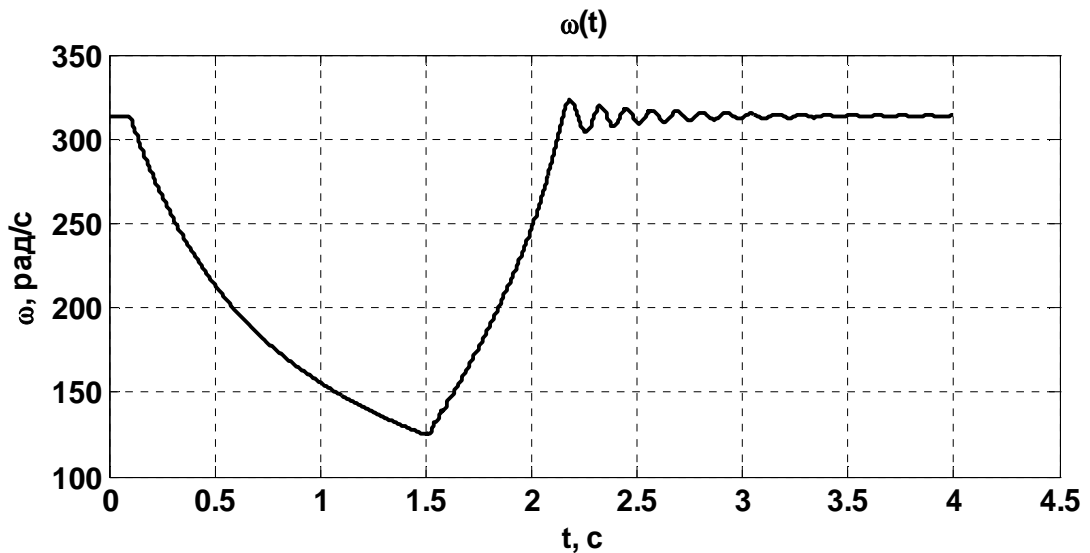


Рисунок 4.15 – График зависимости угловой скорости двигателя от времени при его выбеге и последующем самозапуске

укорочена относительно пуска из состояния покоя, но имеет аналогичный характер.

Рассмотрим годограф электромагнитного момента и угловой скорости двигателя, характеризующий изменение его механических параметров, показанный на рисунке 4.16.

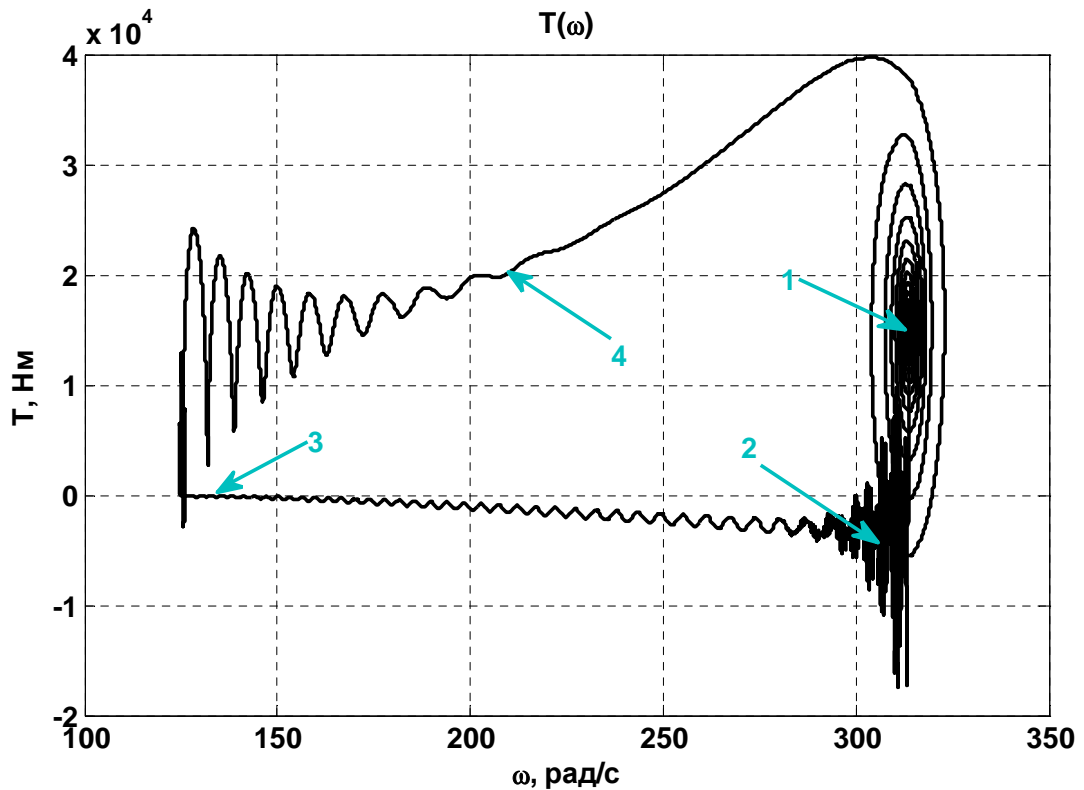


Рисунок 4.16 – График зависимости электромагнитного момента на валу двигателя от угловой скорости двигателя при его выбеге и последующем самозапуске

Выбег двигателя начинается из установившегося режима (стрелка 1). В момент отключения внешнего питания двигатель переходит в режим рекуперации (стрелка 2) характеризующийся спадом угловой скорости и отрицательным значением электромагнитного момента. При этом электромагнитный момент стремится к нулевому значению по мере выбега, то есть, по мере перехода механической энергии запасенной двигателем в электромагнитную, потребляемую элементами узла нагрузки подключенными к шинам 10 кВ. В это время двигатель генерирует в сеть напряжение и ток уменьшающейся амплитуды и частоты (рисунок 4.12). На участке 4 рисунка 4.16 наблюдаем режим самозапуска двигателя из режима неполного выбега, когда скольжение двигателя $s = 0,6$. Этот режим аналогичен по своей картине режиму запуска из состояния покоя.

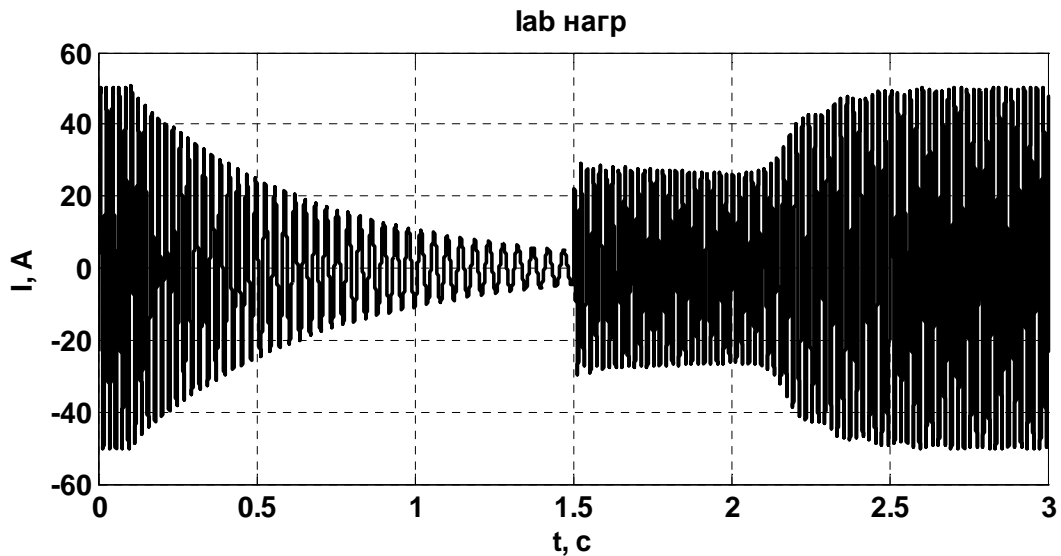


Рисунок 4.17 – График тока ветви АВ статической нагрузки узла при выбеге двигателя с рекуперацией и последующем его самозапуще

Ток статической нагрузки (рисунок 4.17) и напряжение на шинах при рассматриваемом переходном процессе имеют сходную форму. В режиме рекуперации двигателя, мощность, отдаваемая в сеть, уменьшается по мере выбега двигателя, и частота напряжения на нагрузке уменьшается пропорционально уменьшающейся частоте вращения двигателя. Данный режим может негативно сказаться на работе статической нагрузки в силу уменьшения питающего напряжения, а также может быть опасным для нагрузок, чувствительных к изменениям частоты сети.

3. Режим узла нагрузки при возникновении междуфазного замыкания на статической нагрузке с последующим ее отключением. Данный режим моделируется в следующей последовательности: в момент времени равным нулю, все выключатели включены и узел работает в стационарном режиме. В момент времени 0,1 с. включается ветвь замыкания фаз *A-B* статической нагрузки через сопротивление 0,1 Ом. В момент времени 0,2 с. статическая нагрузка отключается от узла выключателем ВЗ. Графики токов и напряжений показаны на рисунках 4.18 и 4.19.

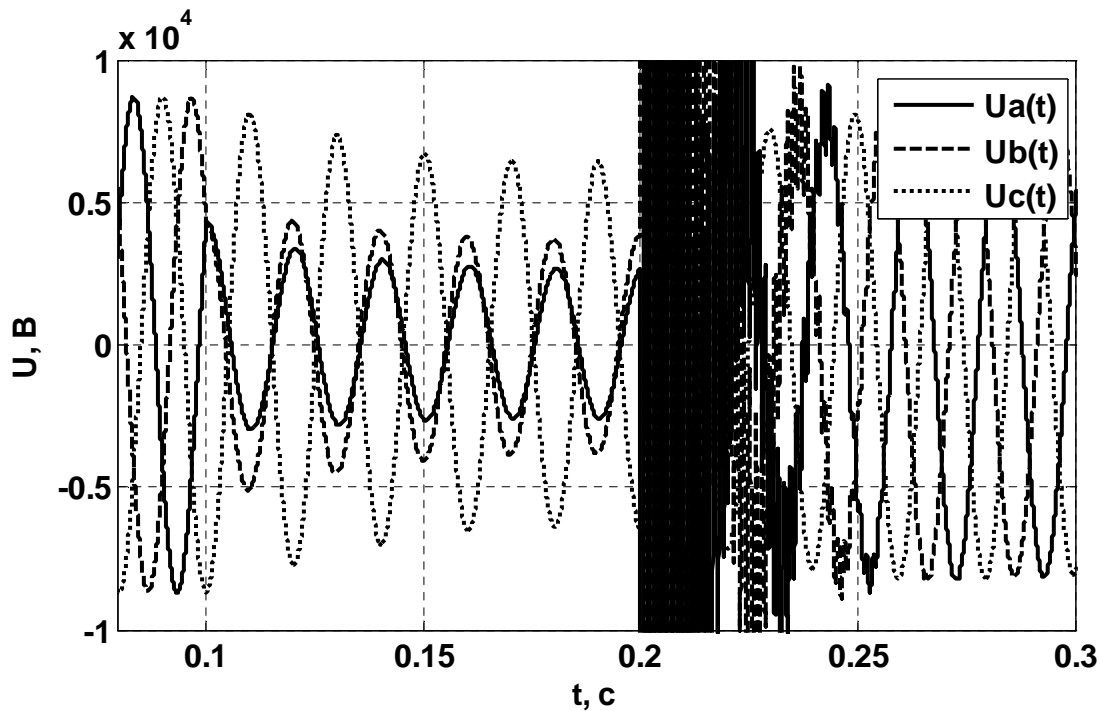


Рисунок 4.18 – Фазные напряжения на шинах 10 кВ при замыкании на статической нагрузке

Фазное напряжение на шинах 10 кВ показано на рисунке 4.18. Здесь мы видим, что фазное напряжение на шинах, как и предполагается при междуфазном замыкании в поврежденных фазах выравнивается по углу и амплитуде. Напряжение в неповрежденной фазе изменяется в меньшей степени. Токи статора двигателя показаны на рисунке 4.19. В фазе *A* имеет место значительный бросок тока и появляется апериодическая составляющая. Токи обмоток неповрежденных фаз тоже возрастают. Они оказываются одинаковыми по фазе и в сумме близки к значению тока поврежденной фазы.

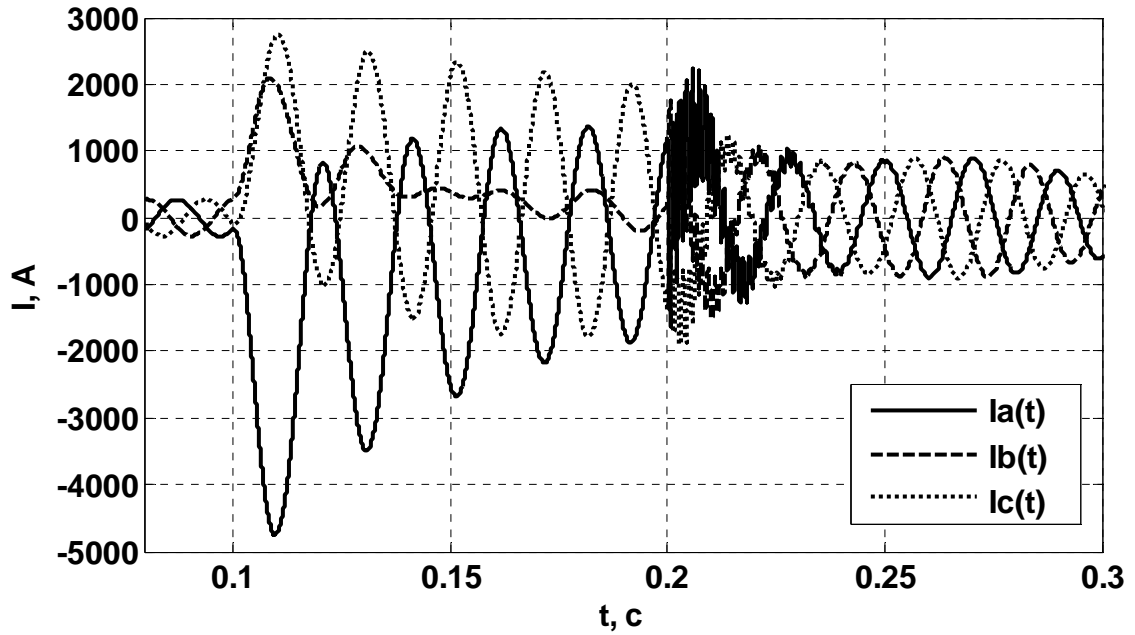


Рисунок 4.19 – Токи в обмотках статора при междуфазном замыкании на статической нагрузке

Для этого режима рассмотрим графики электромагнитного момента и угловой скорости двигателя (рисунки 4.20 и 4.21 соответственно).

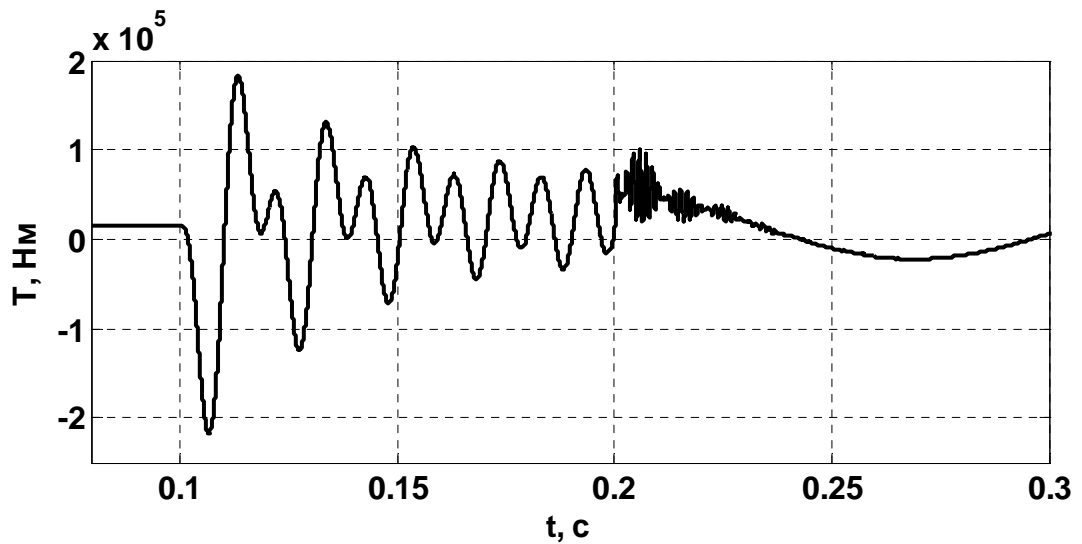


Рисунок 4.20 – Электромагнитный момент двигателя при междуфазном замыкании в ветви статической нагрузки

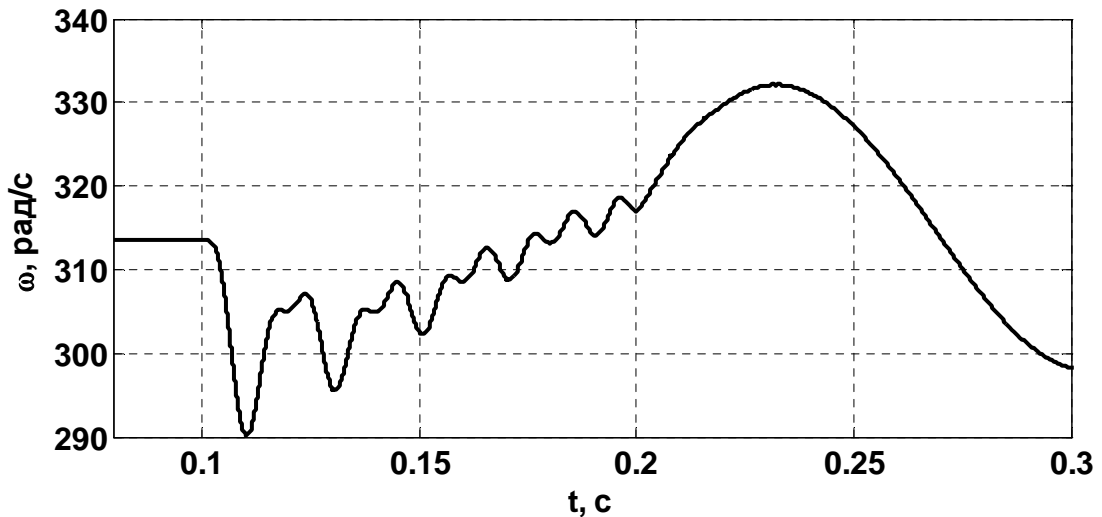


Рисунок 4.21 – Угловая скорость двигателя при междуфазном замыкании на статической нагрузке

Электромагнитный момент двигателя во время междуфазного замыкания начинает колебаться с амплитудой, на порядок превышающей амплитуду колебаний при запуске двигателя. Значения момента во время колебаний, помимо основной частоты, содержат вторую гармонику. Вторая гармоника появляется из-за несимметрии токов статора. Колебания момента затухают по мере изменения аperiodической составляющей токов. Колебания электромагнитного момента вызывают колебания угловой скорости, как показано на рисунке 4.21. Поскольку в первый момент после возникновения междуфазного замыкания электромагнитный момент совершает скачок в отрицательную область – угловая скорость снижается, после чего постепенно нарастает, по мере нормализации момента.

В момент времени 0,2 с. в модели происходит отключение ветви статической нагрузки. В этот момент на графиках напряжений наблюдается возникновение быстро затухающих высокочастотных колебаний, вызванных переходными процессами обмена энергией между емкостью устройства компенсации реактивной мощности и индуктивностями двигателя и трансформатора. На графиках токов статора двигателя также наблюдаются высшие гармоники, которые отражаются на электромагнитном моменте, но в меньшей степени в силу инерционности электромеханических процессов.

На графиках момента и угловой скорости наблюдается начало переходного процесса в виде колебаний низкой частоты, в течение которого данные параметры возвращаются к своим нормальным рабочим значениям. Заметим, что эти низкочастотные колебания отражаются на амплитуде токов статора.

Следует подчеркнуть, что в модели двигателя, используемой в данной работе, не учитываются прочностные механические характеристики. В модели принято допущение об абсолютной механической прочности устройства. Данное допущение не влияет на характеристики модели при рассмотрении электромагнитных и электромеханических переходных процессов. Тем не менее, стоит отметить, что в моделируемом режиме значения электромагнитного момента, а следовательно и сил, воздействующих на электрическую машину могут быть опасны для ее механической целостности.

4.3 Режимы работы узла комплексной нагрузки с двумя асинхронными двигателями

Рассмотрим режимы узла нагрузки с двумя мощными асинхронными двигателями. В данном параграфе рассматривается схема (рисунок 4.22) с двумя асинхронными двигателями, подключенными к одним шинам 10 кВ и питающимися через трансформатор. Проанализируем модель с двумя

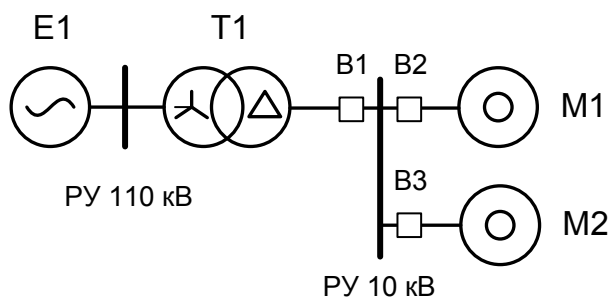


Рисунок 4.22 – Схема исследуемого узла нагрузки

асинхронными двигателями АЗМП-5000, параметры которых приведены в предыдущем параграфе (таблица 4.1). Двигатели питаются от трансформатора мощностью 16 МВ·А (таблица 4.2).

Рассмотрим режим поочередного пуска обоих двигателей. Механические нагрузки на валах обоих двигателей равны 500 Нм. В момент времени 0 с. выключатели В2 и В3 выключены, выключатель В1 включен. Далее, в момент времени 0,1 с. от начала моделирования производится подача питания на двигатель М1, включением выключателя В2. После разгона двигателя М1, в момент времени 4,1 с. производится подача питания на двигатель М2, включением выключателя В3. Исследуем режим работы узла нагрузки, а также режимы обоих двигателей при совместной работе.

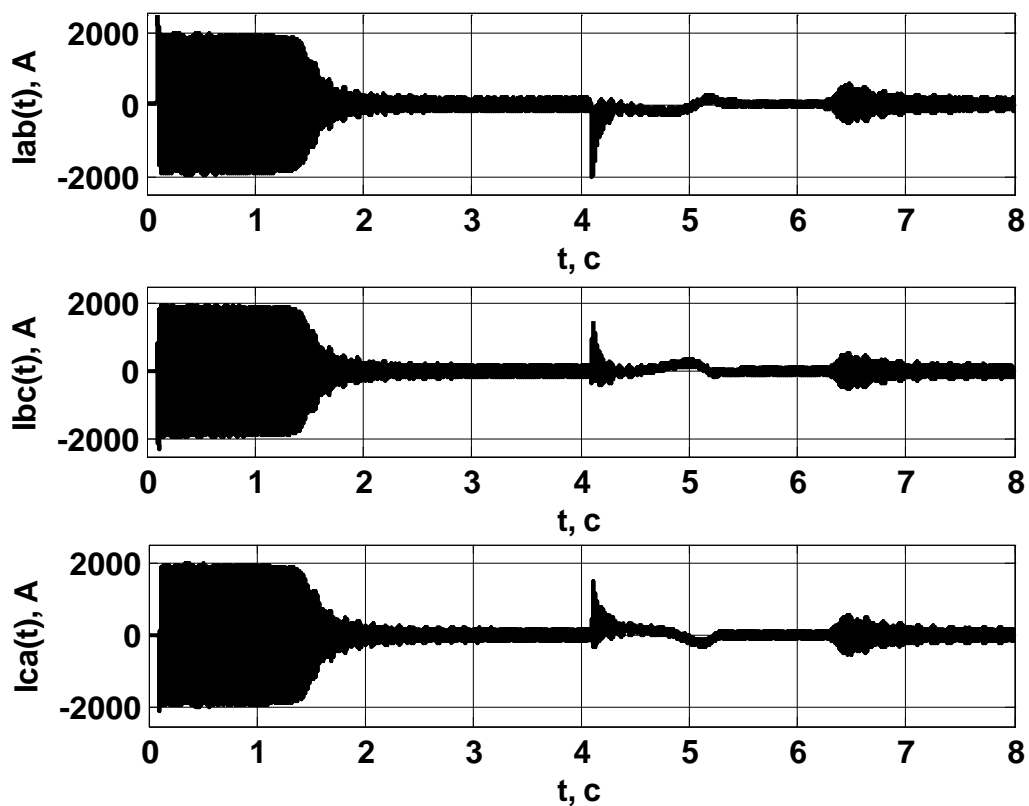


Рисунок 4.23 – Графики токов статора двигателя М1

Как видно из графиков на рисунках 4.23, 4.27, 4.28 характер режима пуска двигателя М1 мало отличается от режимов пуска одиночного двигателя, проанализированных в главе 3. Отличие заключается в большей продолжительности пуска в силу влияния сопротивления трансформатора в схеме рассматриваемого узла нагрузки. От источника неограниченной мощности этот двигатель запускался примерно за 0,85 с., а при наличии трансформатора мощностью 16 МВ·А двигатель запускается за 1,4 с.

Влияние внешнего сопротивления сети (трансформатора) видно по снижению амплитуды напряжения на вторичной стороне трансформатора. На рисунке 4.26 амплитудное линейное значение напряжения уменьшается до 9 кВ в момент включения двигателя в сеть и, затем, увеличивается к номинальному значению, по мере уменьшения пускового тока двигателя. Следует отметить меньшую амплитуду пускового тока в статоре двигателя (рисунок 4.23) питаемого через трансформатор 16 МВ·А, по сравнению с пуском при питании двигателя непосредственно от источника неограниченной мощности.

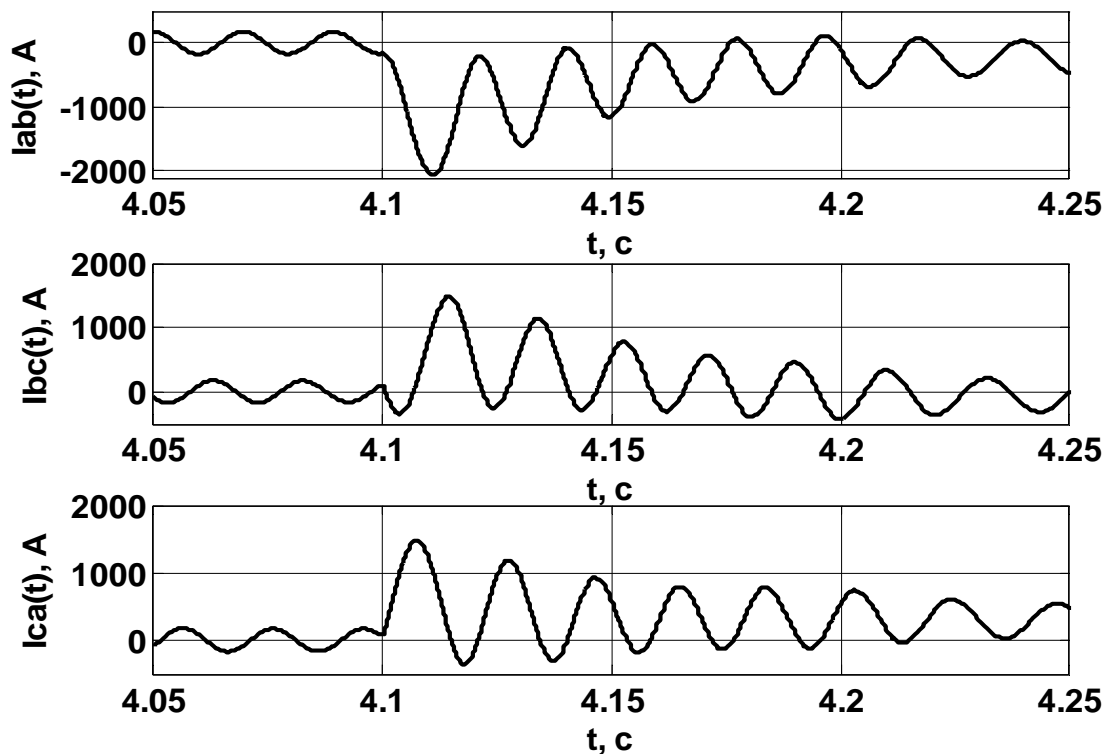


Рисунок 4.24 – Графики токов статора двигателя М1 (момент включения двигателя М2)

Особый интерес представляет режим запуска двигателя М2, при работающем двигателе М1. Токи статора двигателя М2 показаны на рисунке 4.25. Как видно из графика угловой скорости (рисунок 4.28), запуск двигателя М2 характеризуется большей длительностью и составляет около 2,2 с. В токах статора (рисунок 4.25) наблюдаются апериодические составляющие. Наличие апериодических составляющих

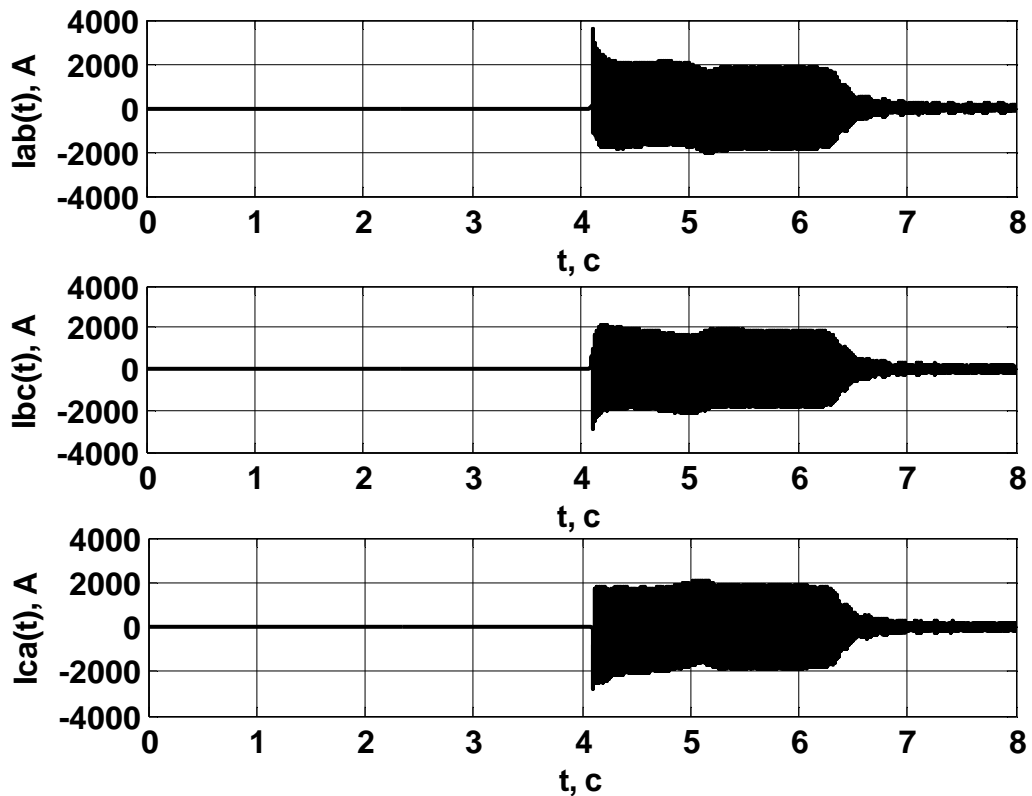


Рисунок 4.25 – Графики токов статора двигателя М1

может быть связано, как с предшествующим режимом работы двигателя М1, так и с броском в его тока статора. Режим пуска двигателя М2 для всей сети аналогичен трехфазному КЗ за его пусковым сопротивлением. Естественно, что при этом двигатель М1 переходит в генераторный режим, отдавая мощность двигателю М2. На рисунке 4.24 показаны токи статора двигателя М1 в момент пуска двигателя М2. На них просматривается резкое изменение токов фазах двигателя и апериодическая составляющая, связанная с включением М2. Резкое изменение токов статора двигателя М1, работающего, до пуска двигателя М2, в стационарном режиме, вызывает в нем электромеханический переходный процесс, о чем свидетельствуют графики электромагнитного момента (рисунок 4.27) и угловой скорости (рисунок 4.28). Как видно из графиков изменения механических параметров двигателя М1, на его валу возникают значительные колебания электромагнитного момента и угловой скорости.

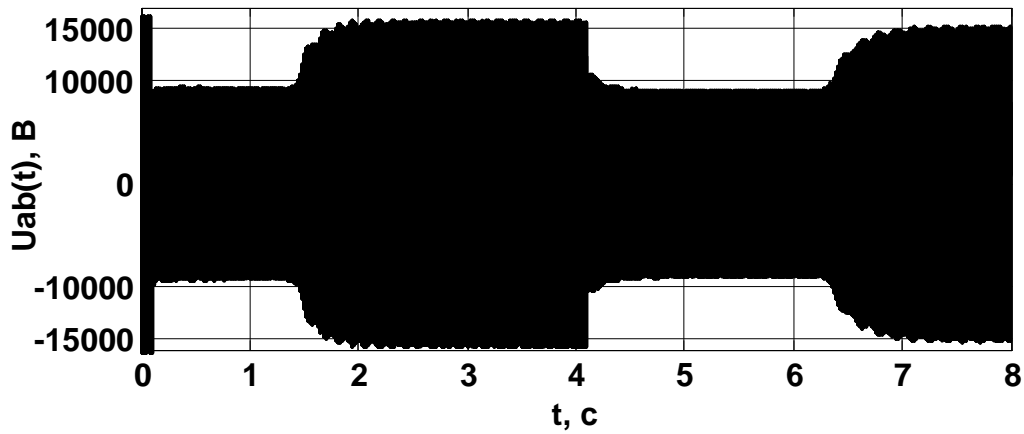


Рисунок 4.26 – График напряжения на шинах 10 кВ

Электромагнитные и электромеханические переходные процессы в двигателе М1 влияют на параметры запуска двигателя М2. Сравнение графиков электромагнитного момента двигателей М1 и М2 при их запуске показывают, что электромагнитный момент двигателя М2 колеблется с гораздо большей амплитудой относительно значения момента сопротивления на валу. Эти колебания приводят к значительным колебаниям угловой скорости двигателя на начальном этапе разгона и увеличивают суммарное время его запуска.

Следует отметить изменение напряжения на обмотках трансформатора со стороны нагрузки. При запуске двигателей наблюдается существенное уменьшение амплитуды напряжения на вторичных обмотках. В начальный момент разгона двигателей амплитуда снижается от номинального амплитудного значения, до 9 кВ. Такое сильное снижение напряжения на шинах питающей подстанции может существенно сказаться на работе остальных нагрузок, если они будут подключены к данному узлу.

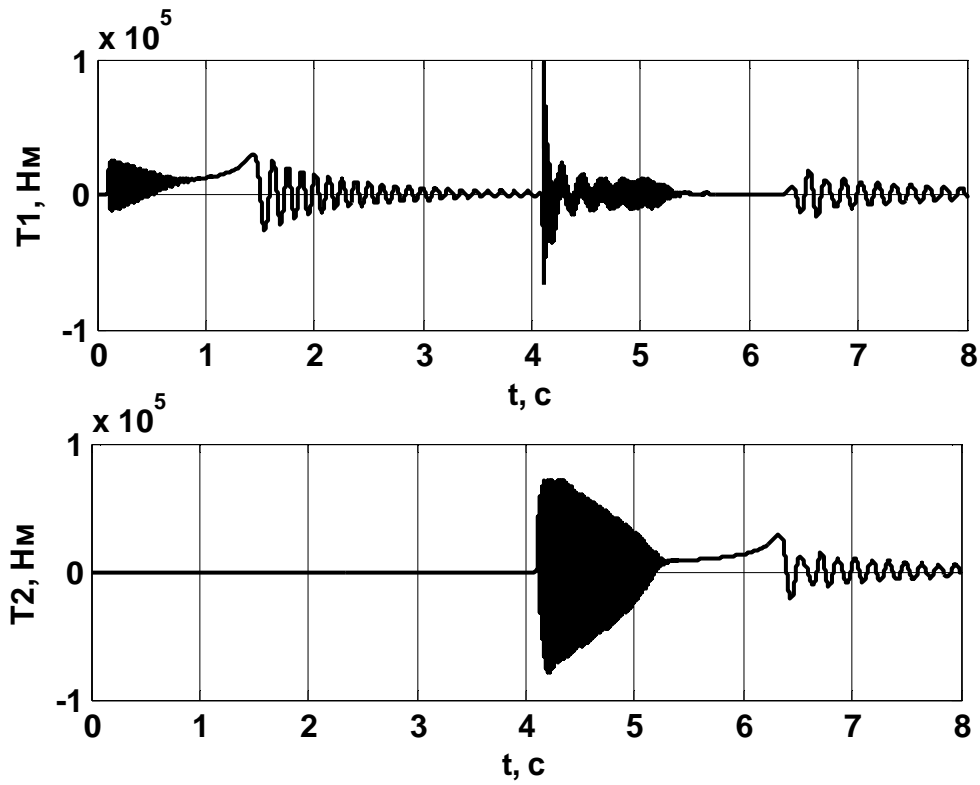


Рисунок 4.27 – Графики электромагнитных моментов двигателей.
 T_1 для двигателя М1, T_2 для двигателя М2

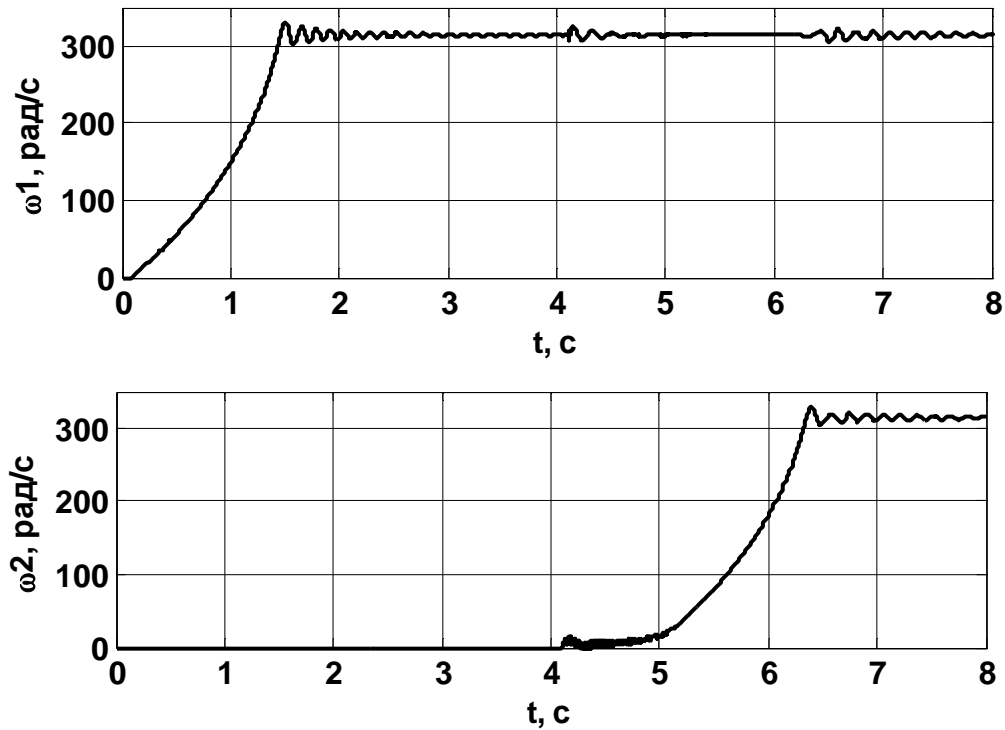


Рисунок 4.28 – Графики угловых скоростей двигателей.
 ω_1 для двигателя М1, ω_2 для двигателя М2

Таким образом, с помощью разработанной методики появляется возможность оценить взаимное влияние двух асинхронных двигателей, работающих в одном узле комплексной нагрузки при их совместном пуске, а также при выбеге двигателей. Это влияние распространяется как на электромагнитные переходные процессы – изменение токов в обмотках двигателей, так и электромеханические – изменения моментов двигателей и угловых скоростей обоих двигателей при изменении режимов одного из них.

Рассмотрим режим совместного выбега указанных электродвигателей. Для наглядности, моменты на валу двигателей приняты различными. Двигатель М1 имеет момент сопротивления на валу 500 Нм, для двигателя М2 задана вентиляторная нагрузка по выражению (31). Считаем, что к моменту времени начала моделирования (0 с.) все выключатели включены и двигатели работают в стационарном режиме.

В момент времени 0,1 с. происходит отключение выключателя В1 и двигатели остаются подключёнными к одной шине без внешнего питания и дополнительной электрической нагрузки. Электродвигатели начинают совместный выбег, работая на общие шины. Для упрощения, на рисунках 4.29 и 4.30 показаны токи и напряжения только одной фазы статора каждого двигателя, поскольку двигатели работают в симметричном режиме и отсутствуют переходные процессы, нарушающие симметрию токов и напряжений фаз.

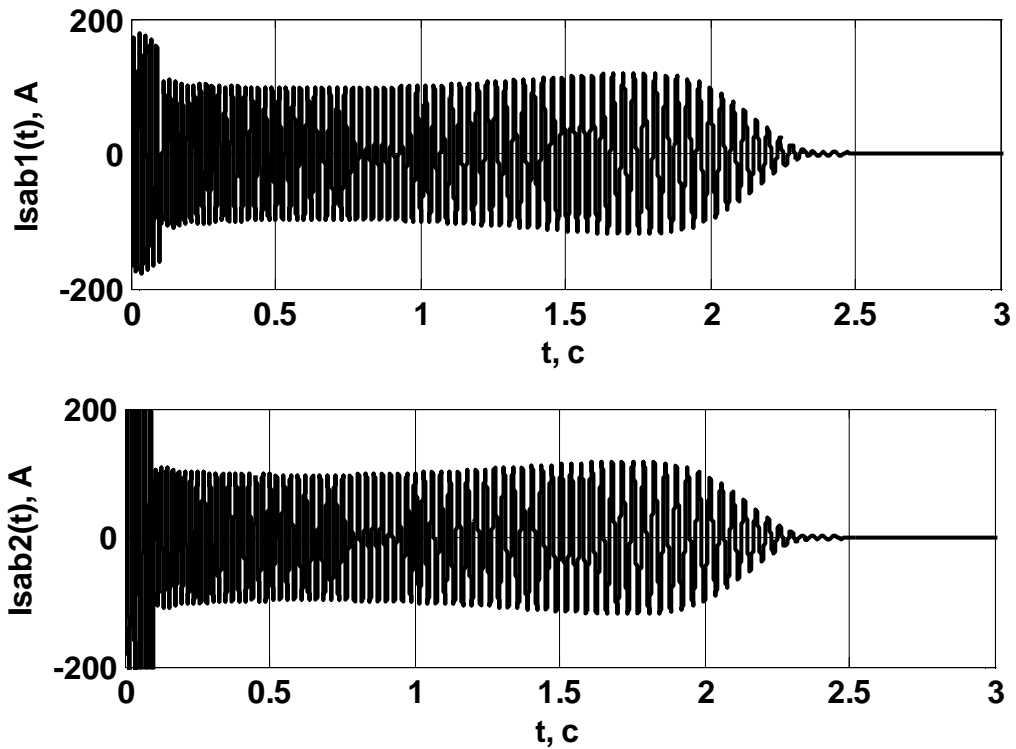


Рисунок 4.29 – Графики токов фаз статоров двигателей при совместном выбеге.
Isab1 для двигателя M1, Isab2 для двигателя M2

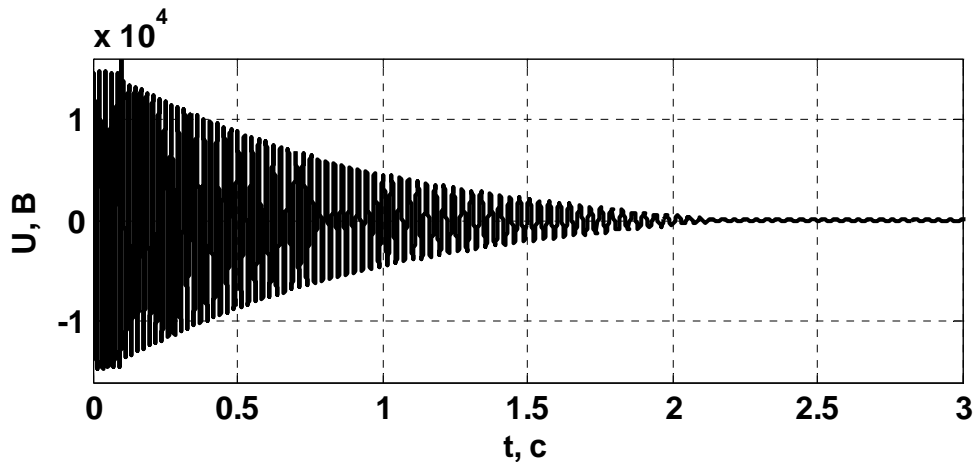


Рисунок 4.30 – График напряжения на обмотках А-В статоров двигателей при совместном выбеге

На графиках токов фаз обоих двигателей отчетливо видно, что токи равны. Токи одноименных обмоток двигателей противоположны по фазе. Рассматривая графики токов и напряжений обмоток двигателей (рисунки 4.29 и 4.30) заметим, что их частота уменьшается по мере выбега.

Рассмотрим графики угловой скорости обоих двигателей на рисунке 4.31. Видим, что в начале выбега угловые скорости обоих двигателей очень

близки. Можно сказать, что в первую секунду изменение скорости вращения двигателей происходит практически синхронно [26].

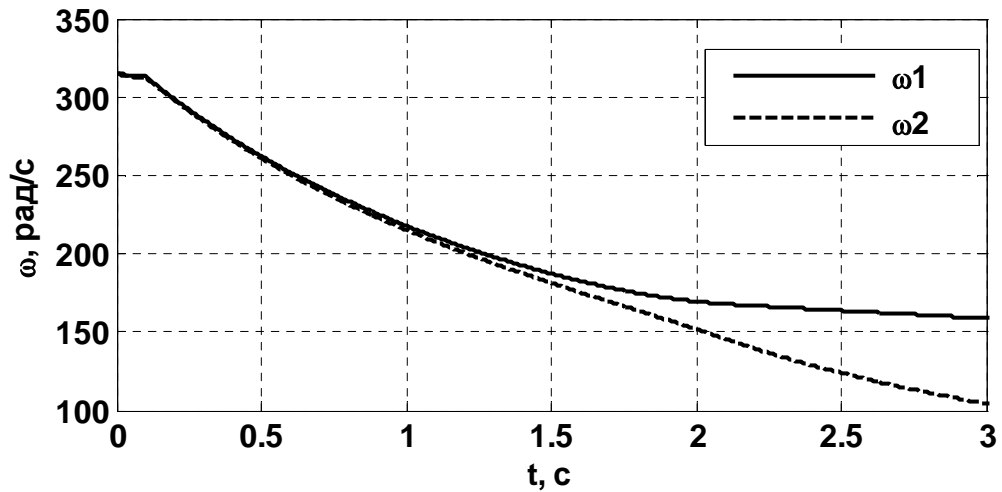


Рисунок 4.31 – Графики угловых скоростей двигателей при совместном выбеге. ω_1 для двигателя М1, ω_2 для двигателя М2

Графики на рисунке 4.32 показывают, что во время совместного выбега электромагнитные моменты двигателей становятся одинаковыми по модулю и противоположными по знаку. Этот факт говорит о том, что один двигатель

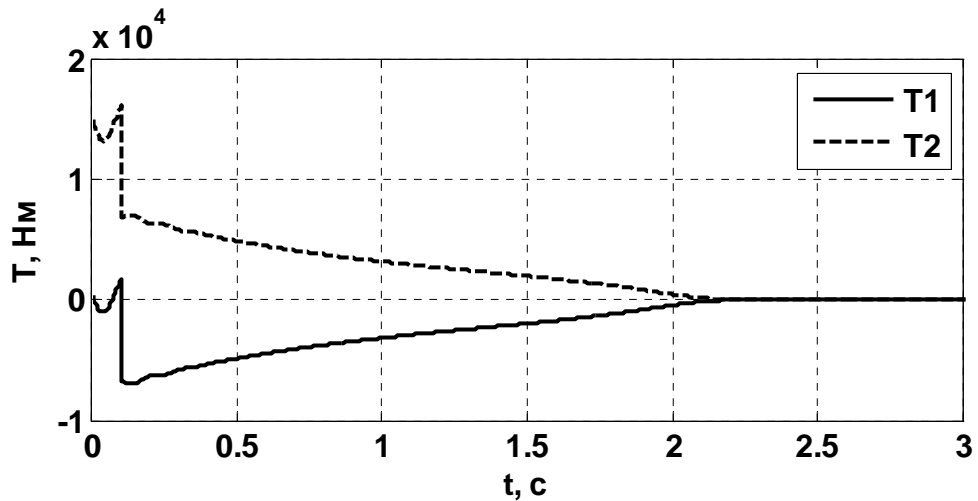


Рисунок 4.32 – Графики электромагнитных моментов двигателей при совместном выбеге. T_1 для двигателя М1, T_2 для двигателя М2

во время выбега работает в генераторном режиме, а второй – в двигательном. При этом момент T_1 двигателя М1 отрицателен – он работает в генераторном режиме, а момент T_2 двигателя М2 положителен – он работает в двигательном режиме. Напомним, что механический момент сопротивления у двигателя М1 фиксирован, и равен 500 Нм, а у двигателя М2 задана

вентиляторная нагрузка, которая при номинальной угловой скорости дает момент сопротивления $T_{M2} = 14800$ Нм.

Для сравнения рассмотрим режим одиночного выбега обоих двигателей с аналогичной нагрузкой и другими параметрами модели. Графики угловых скоростей обоих двигателей для этого режима приведены на рисунке 4.33.

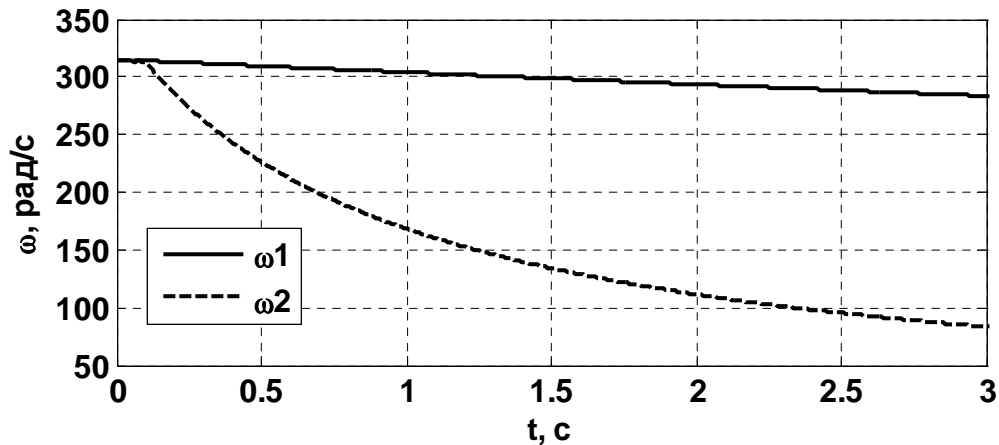


Рисунок 4.33 – Графики угловых скоростей двигателей при одиночном выбеге. ω_1 для двигателя М1, ω_2 для двигателя М2

Проводя сравнительный анализ угловых скоростей двигателей при совместном и одиночном выбеге, заметим, что при одиночном выбеге двигатель М1 с нагрузкой 500 Нм (меньшей) останавливается гораздо медленнее, чем при совместном выбеге. Так, например при совместном выбеге скорость 300 рад/с достигается им за 0,1 с. после отключения питания, а при одиночном выбеге – за 1,2 с. Двигатель М2 с вентиляторной нагрузкой (большей) выбегает немного медленнее. Так, при совместном выбеге, скорость 150 рад/с достигается им за 1,9 с. после отключения питания, а при одиночном выбеге за – за 1,2 с. Таким образом, совместный выбег приводит к более быстрой остановке менее нагруженного двигателя и более медленной остановке более нагруженного двигателя.

Анализ показывает, что при прочих равных условиях, совместный выбег двух двигателей оказывается более приближенным к синхронному на

значительном интервале времени после отключения внешнего питания, что подтверждается практическими и теоретическими положениями [26]. Это происходит за счет обмена мощностью между двигателем с большим запасом энергии и двигателем с меньшим запасом энергии посредством уравнивающих токов в обмотках статоров.

4.4 Переходные процессы в узле нагрузки с трехобмоточным трансформатором

В данном параграфе исследованы режимы работы узла нагрузки питающегося от сети 110 кВ через трехобмоточный трансформатор Т1 110/35/10 кВ. В состав узла, на стороне 10 кВ трансформатора, входят мощный электродвигатель М1, статическая нагрузка НГ1 и батарея конденсаторов С1, предназначенная для компенсации реактивной мощности. Со стороны 35 кВ трехобмоточного трансформатора к шинам подключены две линии электропередач Л1 и Л2 с нагрузками НГ2 и НГ3 на концах. Схема узла нагрузки показана на рисунке 4.34. Она выбрана с целью иллюстрации расчетов переходных процессов и анализа взаимного влияния элементов СЭС на разных уровнях напряжения в одном узле нагрузки. Естественно, что набор элементов для других узлов может быть иным. Задача заключается не в исследовании конкретного узла нагрузки, как такового, а в демонстрации метода анализа режимов при различных переходных процессах.

Параметры узла следующие: $E_1 = \sqrt{2} \cdot 115 \cdot \sin(2 \cdot 50 \cdot \pi + \varphi)$, где φ - угол фазы (А, В, С), параметры трансформатора Т1 представлены в таблице 4.3. Параметры двигателя М1 принимаются по таблице 4.1 параграфа 4.2, нагрузка: $S_{НГ1} = 1$ МВ·А, $\cos \varphi_{НГ1} = 0,9$, $S_{НГ2} = 5$ МВ·А, $\cos \varphi_{НГ2} = 0,95$, $S_{НГ3} = 1$ МВ·А, $\cos \varphi_{НГ3} = 0,95$, компенсирующее устройство имеет мощность $Q_{C1} = 840$ кВ·Ар. Параметры модели трансформатора рассчитаны исходя из паспортных данных. Параметры линий электропередач

показаны в таблицах 4.4 и 4.5. Следует отметить, что линии электропередач моделируются в виде цепочек из Π -схем, описанных в параграфе 3.1.

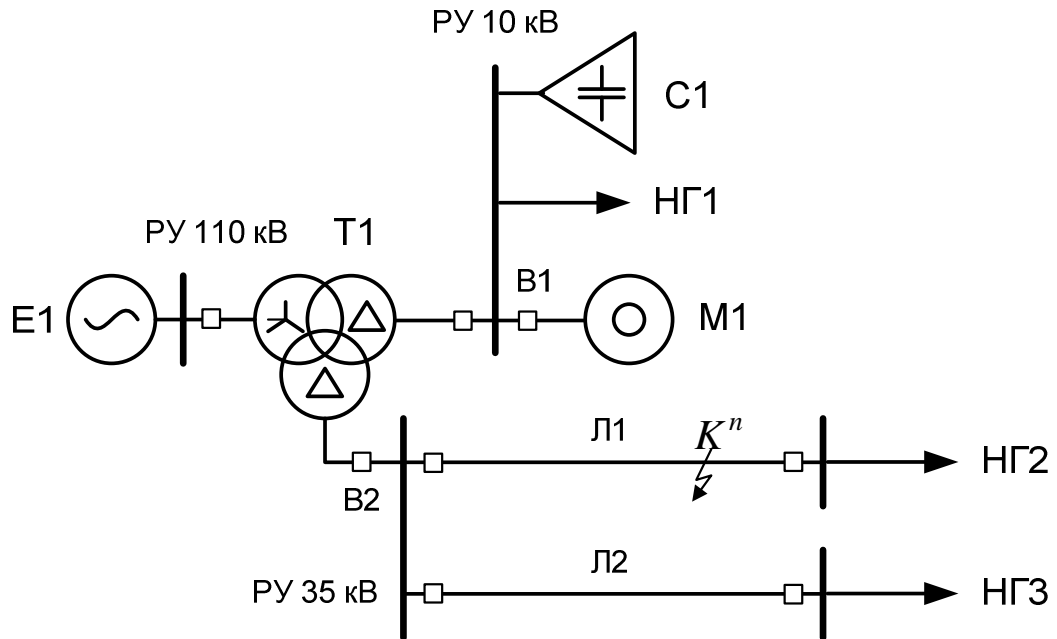


Рисунок 4.34 – Схема исследуемого узла нагрузки

Такая модель учитывает междуфазные емкости и емкости фаза-земля, а так же взаимные индуктивности между проводами фаз линии. Это дает возможность исследовать переходные процессы при замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью. В схеме узла нагрузки (рисунок 4.34) обозначены только те выключатели, коммутация которых производится во время моделирования. Состояние остальных выключателей считается неизменным на протяжении всего процесса моделирования.

Таблица 4.3 – Параметры трансформатора Т1

S , МВ·А	U_{BH} , кВ	U_{HH} , кВ	U_{CH} , кВ	ΔP_K , кВт	ΔP_X , кВт	
16	115	11	34,5	100	21	
u_{KB-C} , %	u_{KB-H} , %	u_{KC-H} , %	I_X , %	R_B , Ом	L_B , Гн	
10,5	17,5	6,5	0,8	25,3	414,3872	
R_H , Ом	L_H , Гн	M_{B-H} , Гн	R_C , Ом	L_C , Гн	M_{B-C} , Гн	M_{C-H} , Гн
0,23	3,7914	39,5974	0,7262	39,2949	124,1919	124,1919

Таблица 4.4 – Параметры линии Л1

Тип провода	A-50
Тип опор	CB-110
Длина линии, км	30
Количество П-схем	3
Длина участка ЛЭП заменяемого П-схемой, км	10
Продольное сопротивление П-схемы R_1 , Ом	6,2772
Продольная индуктивность П-схемы L_1 , Гн	0,0246
Поперечная емкость на землю П-схемы C_2 , Ф	$3,3304 \cdot 10^{-8}$
Поперечное сопротивление на землю П-схемы R_2 , Ом	1,0463
Поперечная междуфазная емкость П-схемы C_3 , Ф	$1,0007 \cdot 10^{-7}$
Поперечное междуфазное сопротивление П-схемы R_3 , Ом	0,0822
Междуфазная взаимная индуктивность П-схемы M , Гн	0,0135

Таблица 4.5 – Параметры линии Л2

Тип провода	A-50
Тип опор	CB-110
Длина линии, км	50
Количество П-схем	1
Длина участка ЛЭП заменяемого П-схемой, км	50
Продольное сопротивление П-схемы R_1 , Ом	31,34
Продольная индуктивность П-схемы L_1 , Гн	0,1230
Поперечная емкость на землю П-схемы C_2 , Ф	$1,6658 \cdot 10^{-7}$
Поперечное сопротивление на землю П-схемы R_2 , Ом	5,2319
Поперечная междуфазная емкость П-схемы C_3 , Ф	$5,0061 \cdot 10^{-7}$
Поперечное междуфазное сопротивление П-схемы R_3 , Ом	0,4114
Междуфазная взаимная индуктивность П-схемы M , Гн	0,0674

Рассмотрим несколько последовательных режимов узла и взаимное влияние элементов разного класса напряжения. К моменту времени начала моделирования (0 с.) считаем, что узел работает в стационарном режиме и двигатель М1 отключен от сети выключателем В1. В начальный момент времени происходит включение выключателя В1. Начинается разгон асинхронного двигателя М1. Разгон двигателя заканчивается к моменту времени 1,5 с. В момент времени 2 с. моделируется однофазное замыкание на

землю на линии электропередач Л1 на расстоянии 20 км от питающих шин. С момента времени 2,2 с. моделируется переход однофазного замыкания на землю в двухфазное замыкание на землю в том же месте модели. В момент времени 2,3 с. моделируется отключение выключателя В2 на шинах 35 кВ, что приводит к отключению питания линий Л1 и Л2. Отключение этого выключателя может быть вызвано неселективным действием релейной защиты. Этот пример показан для наглядности переходных процессов.

4.4.1 Режим пуска мощного асинхронного двигателя в узле нагрузки с трехобмоточным трансформатором

Сначала обратим внимание на режим пуска двигателя и его влияние на работу всего узла. На рисунках 4.35 - 4.40 показаны токи и напряжения на всем временном диапазоне моделирования. Рассмотрим временной участок моделирования до 2 с.

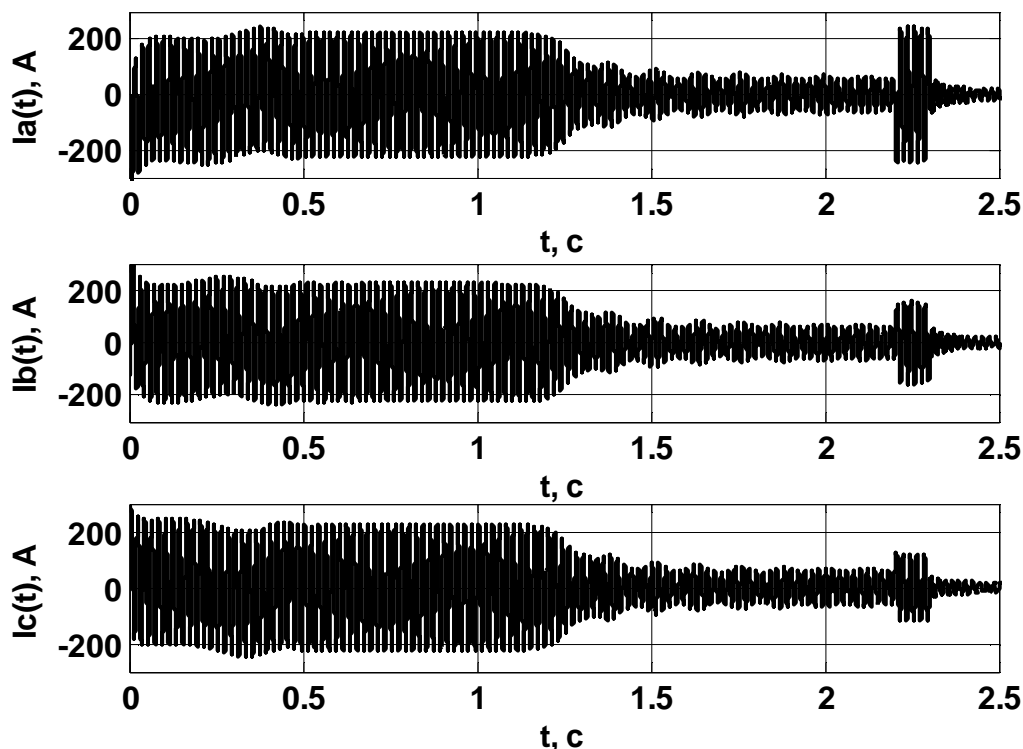


Рисунок 4.35 – Токи на шинах 110 кВ

Рассмотрим режим работы на стороне 110 кВ (рисунки 4.35 и 4.36) и стороне 10 кВ (рисунки 4.37 и 4.38) моделируемого узла нагрузки при пуске

двигателя М1 мало отличаются от режимов, рассмотренных в параграфе 4.2. Токи на стороне 110 и 10 кВ (рисунки 4.35 и 4.37 соответственно) имеют большую амплитуду и ярко выраженные аperiodические составляющие в период запуска двигателя. Амплитуда напряжения на шинах 10 кВ (рисунок 4.38) значительно снижается. На стороне 110 кВ, амплитуда напряжения остается неизменной, поскольку модель узла питается от источника неограниченной мощности.

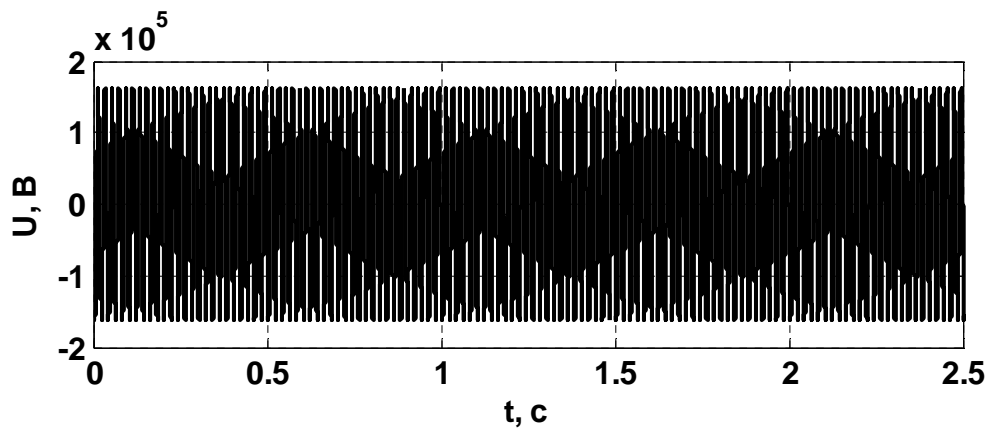


Рисунок 4.36 – Напряжение фазы А шины 110 кВ

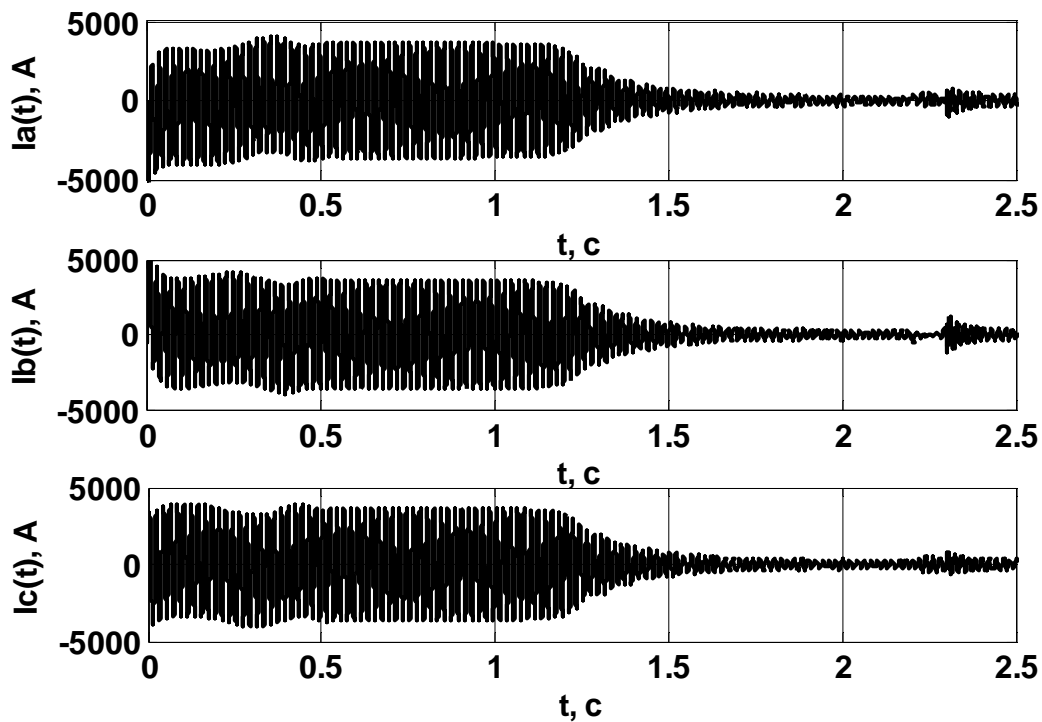


Рисунок 4.37 – Токи на шинах 10 кВ

В режиме запуска двигателя М1 также интерес представляет его влияние на параметры режима сети стороны среднего напряжения трансформатора Т1.

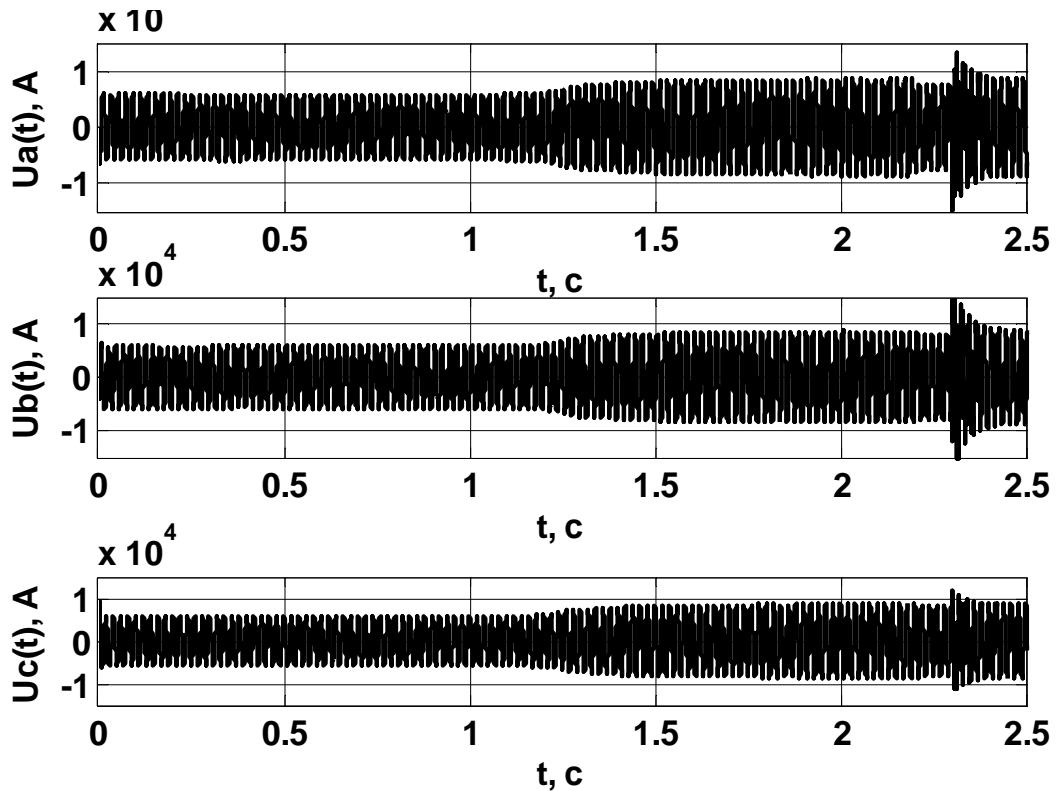


Рисунок 4.38 – Фазные напряжения на шинах 10 кВ

Как видно из рисунка 4.40, при запуске двигателя М1 на стороне 10 кВ, на шинах 35 кВ наблюдается довольно сильно снижение амплитуды напряжения. Амплитуда фазного напряжения опускается до 23 кВ, тогда как в норме амплитуда должна быть близка к 28,5 кВ. На графиках токов (рисунок 4.39) также видно, что при пуске двигателя их амплитуда снижается по сравнению с номинальным режимом. Это связано с повышенным отбором мощности двигателем, поскольку его пусковой ток в примерно в 5 раз превышает номинальный рабочий. Следовательно, отбираемая двигателем мощность сильно превышает номинальную мощность питающего трансформатора. Таким образом, при данных параметрах узла нагрузки прямой пуск двигателя мощностью 5 МВт вызывает серьезный дефицит мощности на стороне нагрузки питающего трансформатора.

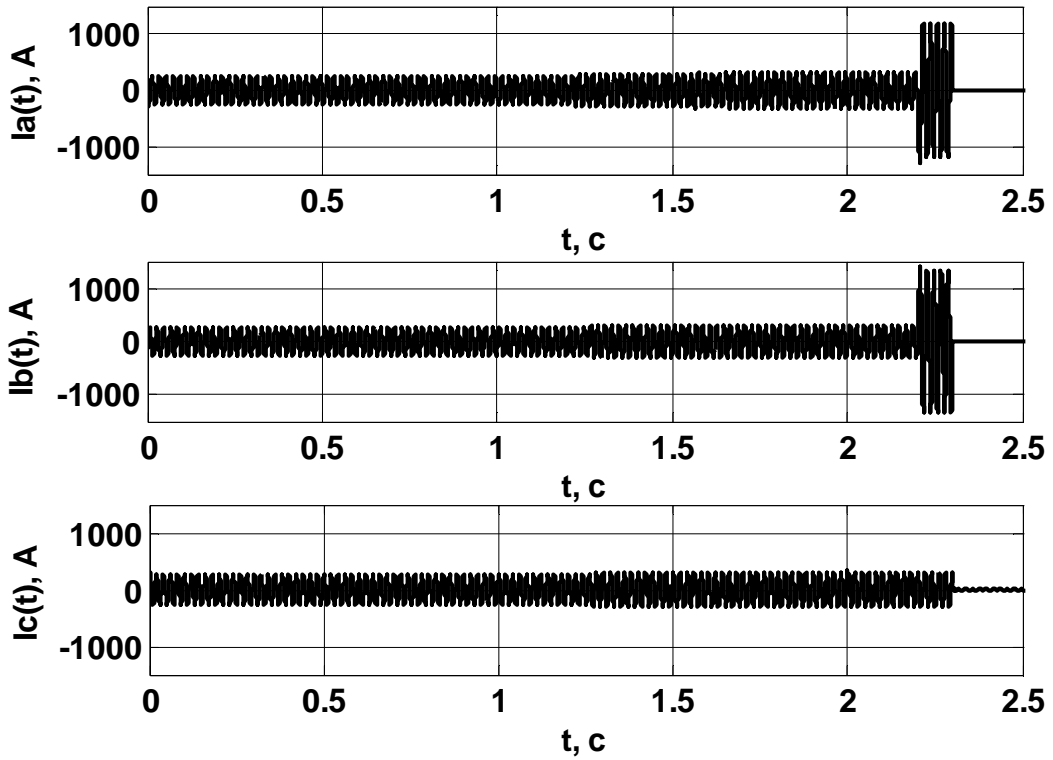


Рисунок 4.39 – Токи на шинах 35 кВ

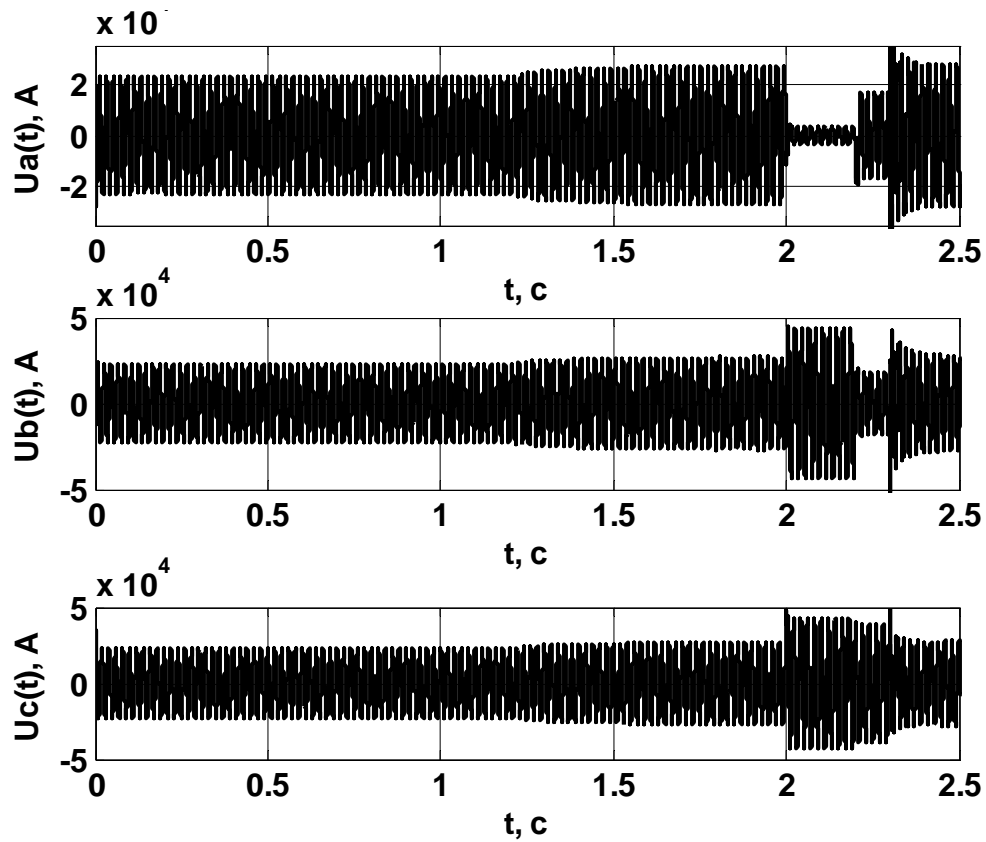


Рисунок 4.40 – Фазные напряжения на шинах 35 кВ

Нагрузка, питающаяся от трансформатора Т1, помимо двигателя, потребляет мощность параллельно с двигателем. Поэтому, пуск двигателя оказывается затянут по времени по сравнению с пуском от источника неограниченной мощности, показанным в главе 3. В данном опыте пуск двигателя занимает примерно 1,5 с. При пуске от источника неограниченной мощности, двигатель запускается за 0,85 с. Стоит обратить внимание, что в данном опыте нагрузка на валу двигателя составляет 100 Нм, а в опыте, продемонстрированном в главе 3, нагрузка составляет 500 Нм, что должно увеличивать время запуска.

Таким образом, данный опыт демонстрирует, что пуск мощного электродвигателя влияет на работу нагрузок и сетей всех уровней напряжения, входящих в данный узел. Результаты говорят о том, что запаса мощности питающего трансформатора, в данной конфигурации модели, недостаточно для питания узла с мощным электродвигателем при его прямых пусках. Следует подбирать трансформатор большей мощности, либо производить запуск двигателя в более щадящих для сети режимах.

4.4.2 Режим однофазного замыкания на землю на стороне среднего напряжения трехобмоточного трансформатора

Рассмотрим более подробно влияние режимов повреждения линии электропередач на стороне среднего напряжения трансформатора Т1 на работу всего узла нагрузки. Включение ветви замыкания на землю производится в момент 2 с. от начала моделирования. Ветвь замыкания включается в фазе А линии Л1 на расстоянии 20 км от питающих шин.

Линия Л1, на которой моделируется замыкание, работает в сети с изолированной нейтралью. Замыкания на землю на воздушных линиях электропередач, в сетях с изолированной нейтралью, характеризуются малыми аварийными токами. Эти токи обусловлены распределенной емкостью между фазами линии и землей. Поэтому величина этих токов определяется суммарной емкостью всей сети, питающейся от данных шин.

Модель ЛЭП, используемая для данного узла нагрузки, учитывает емкости фаз на землю и междуфазные емкости. В рассматриваемой модели узла нагрузки сеть состоит из двух ЛЭП и их суммарная емкость относительно мала. Поэтому, как можно видеть из рисунка 4.41, токи в сети 35 кВ практически не изменяют свою амплитуду при возникновении замыкания.

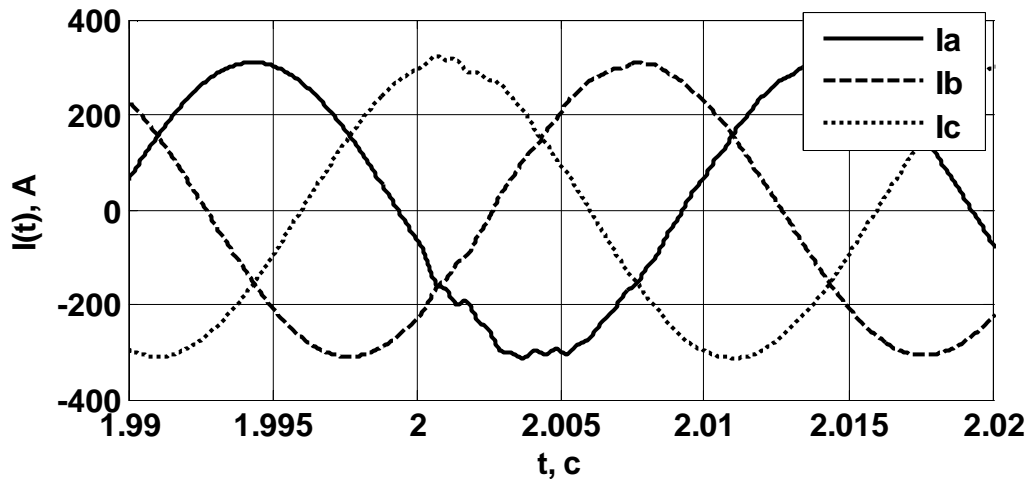


Рисунок 4.41 – Токи на вводах 35 кВ в момент возникновения замыкания фазы А на землю на линии Л1

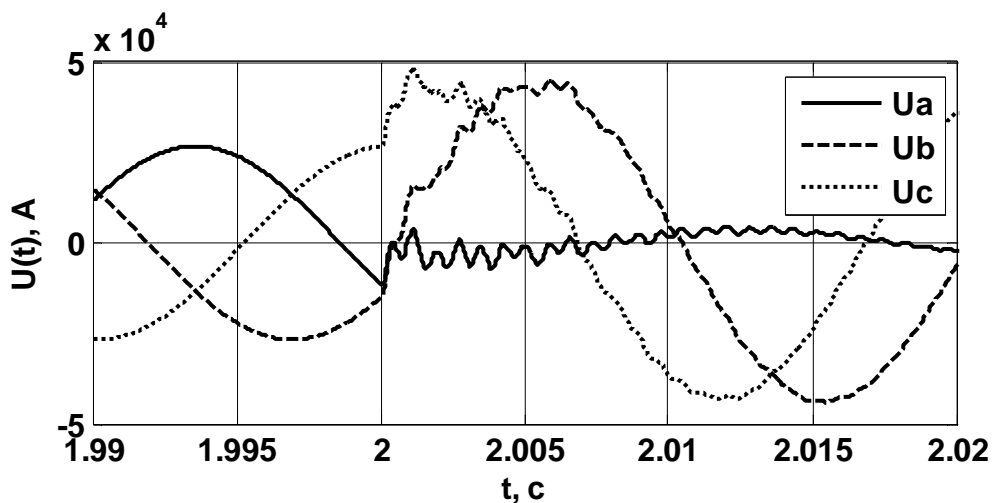


Рисунок 4.42 – Фазные напряжения на шинах 35 кВ в момент возникновения замыкания фазы А на землю на линии Л1

На рисунках 4.41 и 4.42 показаны токи и напряжения на шинах 35 кВ в начале переходного процесса при моделировании замыкания. Из графиков напряжения видно, что составляющая 50 Гц фазного напряжения фазы А в месте наблюдения снижается в несколько раз, относительно предшествующего режима. Напряжение в неповрежденных фазах

увеличивается в 1,73 раза. При таком изменении напряжения в фазах, потенциал поврежденной фазы приближается к потенциалу земли, но линейные напряжения остаются номинальными [98]. В месте наблюдения, напряжение поврежденной фазы не снижается до нулевого значения, вследствие удаленности его от места замыкания.

На графиках тока фаз и напряжения на шинах среднего напряжения (рисунки 4.41, 4.42) ярко выражено наличие высших гармоник промышленной частоты, появляющихся после включения ветви повреждения. Они вызваны переходными процессами, обусловленными емкостями линий и индуктивностями линий и трансформатора. Эти колебания вызваны разрядом емкостей линий, поэтому они быстро затухают.

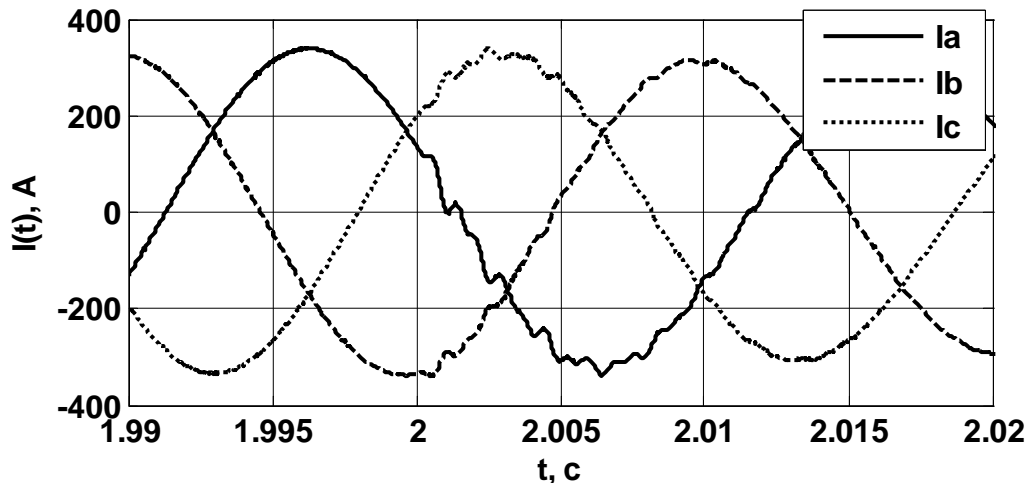


Рисунок 4.43 – Токи на шинах 10 кВ в момент возникновения замыкания фазы А на землю на линии Л1

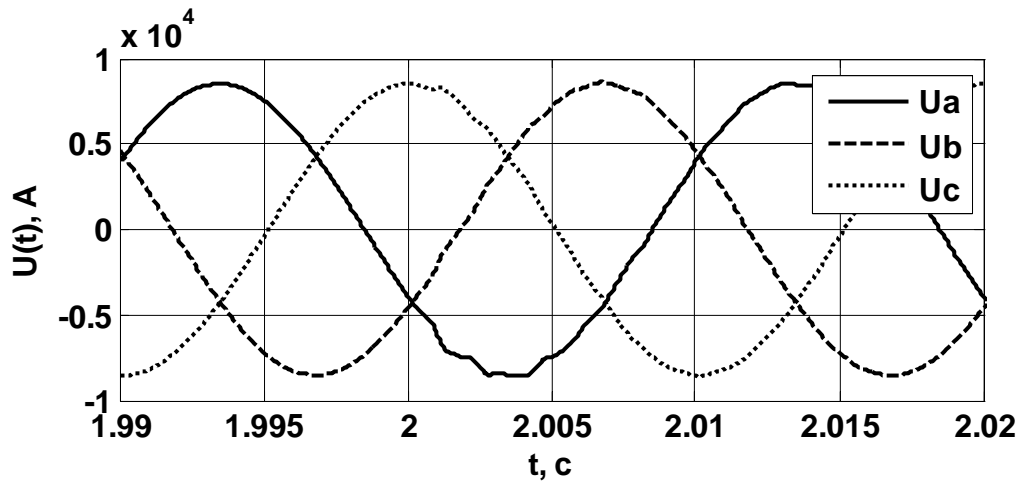


Рисунок 4.44 – Фазные напряжения на шинах 10 кВ в момент возникновения замыкания фазы А на землю на линии Л1

Обратим внимание на токи в ветвях и напряжения на шинах низшего напряжения в момент замыкания в сети 35 кВ (рисунки 4.43 и 4.44 соответственно). Видно наличие высокочастотных колебаний в токах и напряжениях на шинах 10 кВ. Наличие высших гармоник прослеживается и в поврежденной, и в неповрежденных фазах. Эти гармоники проходят на шины 10 кВ через трансформатор.

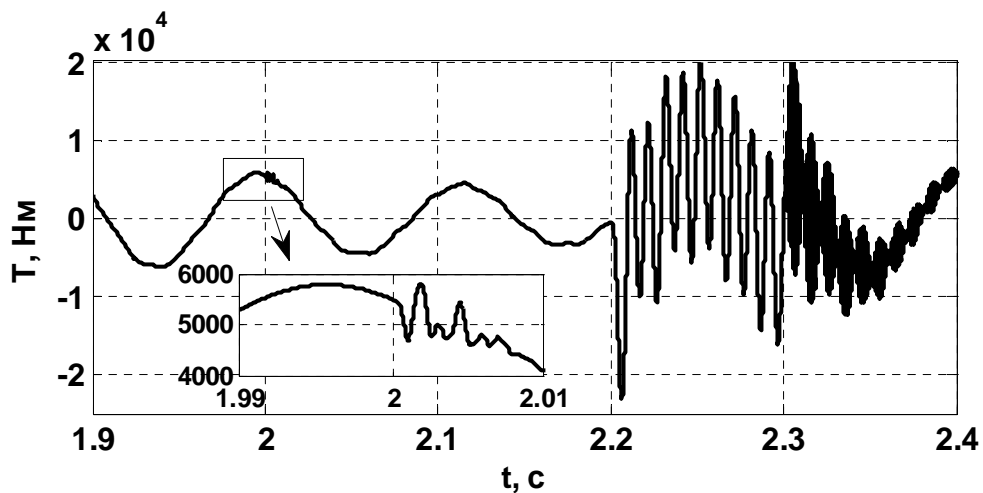


Рисунок 4.45 – Электромагнитный момент двигателя М1 во время замыканий и отключения линии Л1

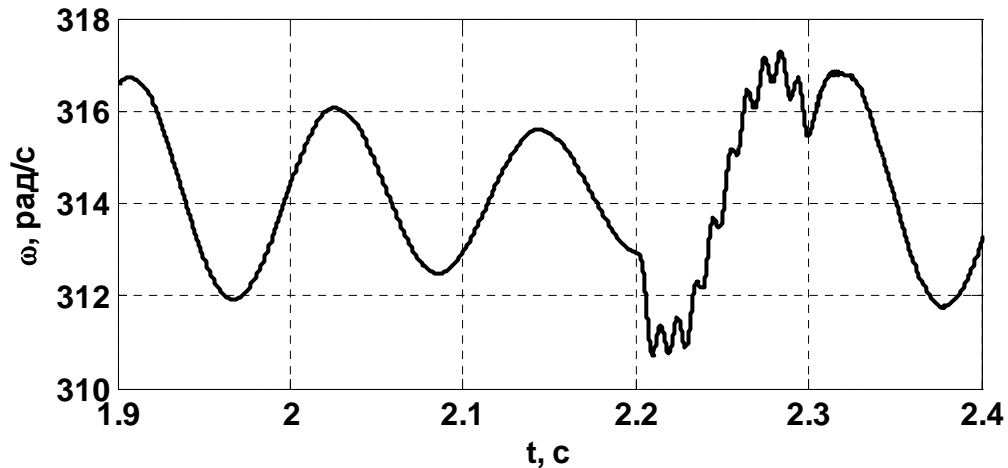


Рисунок 4.46 – Угловая скорость двигателя М1 во время замыканий и отключения линии Л1

Влияние высших гармоник, наведенных со стороны среднего напряжения мало сказывается на работе двигателя М1. На рисунке 4.45 показан электромагнитный момент двигателя во время замыканий на линии Л1. В момент времени 2 с. на рисунке видны незначительные возмущения значения электромагнитного момента во время возникновения однофазного замыкания. Эти возмущения вызваны наличием высших гармоник в питающем напряжении. В силу инерционности механических параметров двигателя, такие изменения не могут существенно повлиять на режим работы двигателя, что видно из графика угловой скорости на рисунке 4.46.

4.4.3 Режим двухфазного короткого замыкания на землю на стороне среднего напряжения трехобмоточного трансформатора

Далее рассмотрим режим, когда однофазное замыкание на землю на линии Л1, рассмотренное в предыдущем параграфе, переходит в двухфазное замыкание на землю фаз *A* и *B*.

В режиме двухфазного замыкания наблюдается значительное возрастание амплитуды токов поврежденных фаз (рисунок 4.50). При этом токи становятся противоположны по направлению. Ток неповрежденной

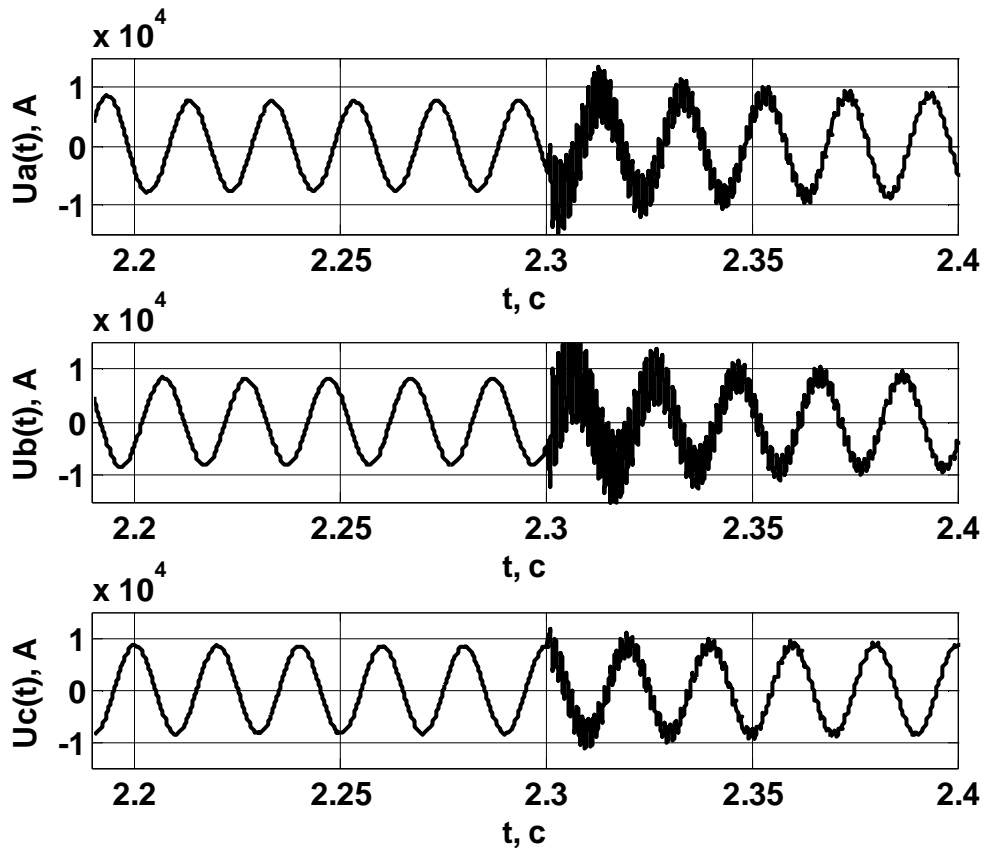


Рисунок 4.47 – Фазное напряжение на шинах 10 кВ во время замыканий и отключения линии Л1

фазы изменяется незначительно. Напряжение в поврежденных фазах (фазное) изменяется и по углу и по амплитуде (рисунок 4.49). Амплитуда напряжений в поврежденных фазах уменьшается и становится равной для обеих фаз, их угол становится противоположным. В неповрежденной фазе напряжение продолжает быть в 1,73 раза больше номинального фазного напряжения линии, но изменяется по углу относительно предшествующего режима. Таким образом, за счет удаленности повреждения от питающих шин, линейное напряжение на них в меньшей степени теряет симметрию, поскольку обмотки на стороне 35 кВ трансформатора соединены по схеме

треугольник.

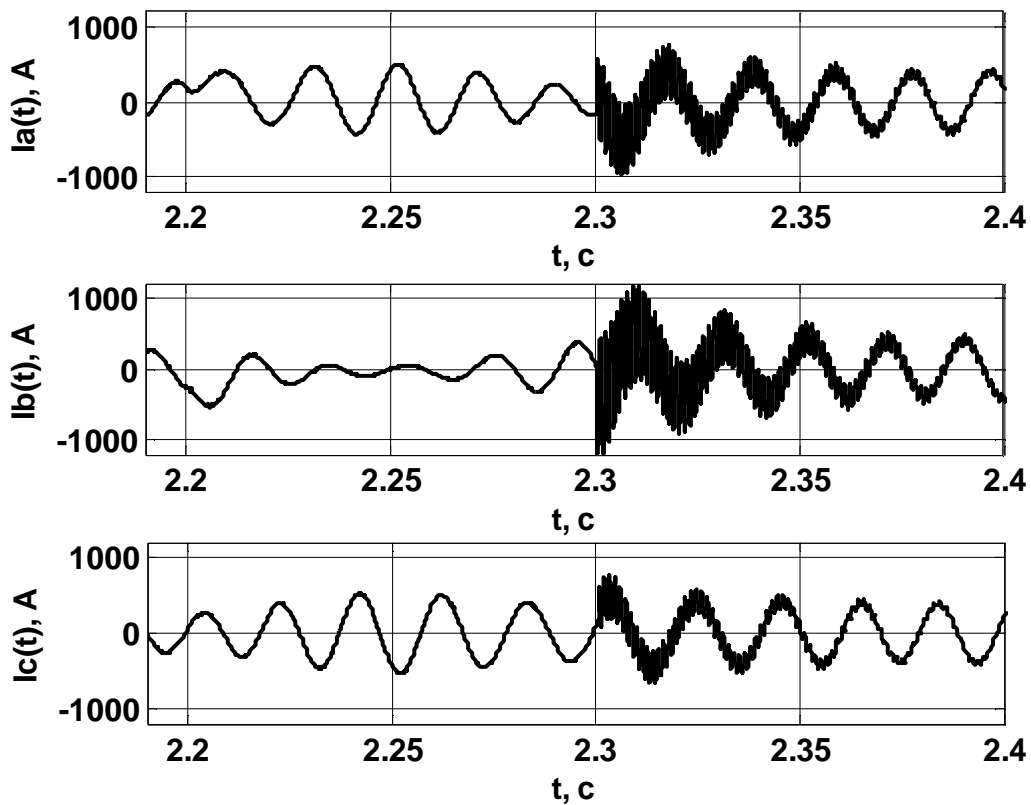


Рисунок 4.48 – Ток на шинах 10 кВ во время замыканий и отключения линии Л1

На стороне 10 кВ в данном режиме наблюдается незначительное изменение фазы и амплитуды напряжений (рисунок 4.47). Обратим внимание на токи шин 10 кВ (рисунок 4.48). В момент возникновения междуфазного замыкания у них значительно меняется угол, и наблюдаются гармонические колебания амплитуды. Это вызвано резким возрастанием потоков мощности в фазах на стороне 35 кВ в сторону повреждения. Вследствие этого, элементы на стороне низшего напряжения начинают отдавать запасенную энергию через трансформатор в направлении повреждённого участка. В результате, двигатель М1 начинает частично работать в генераторном режиме, чем и вызвано резкое изменение направления тока на шинах 10 кВ, а также колебание его амплитуды. Такая картина токов связана с изменением фазы

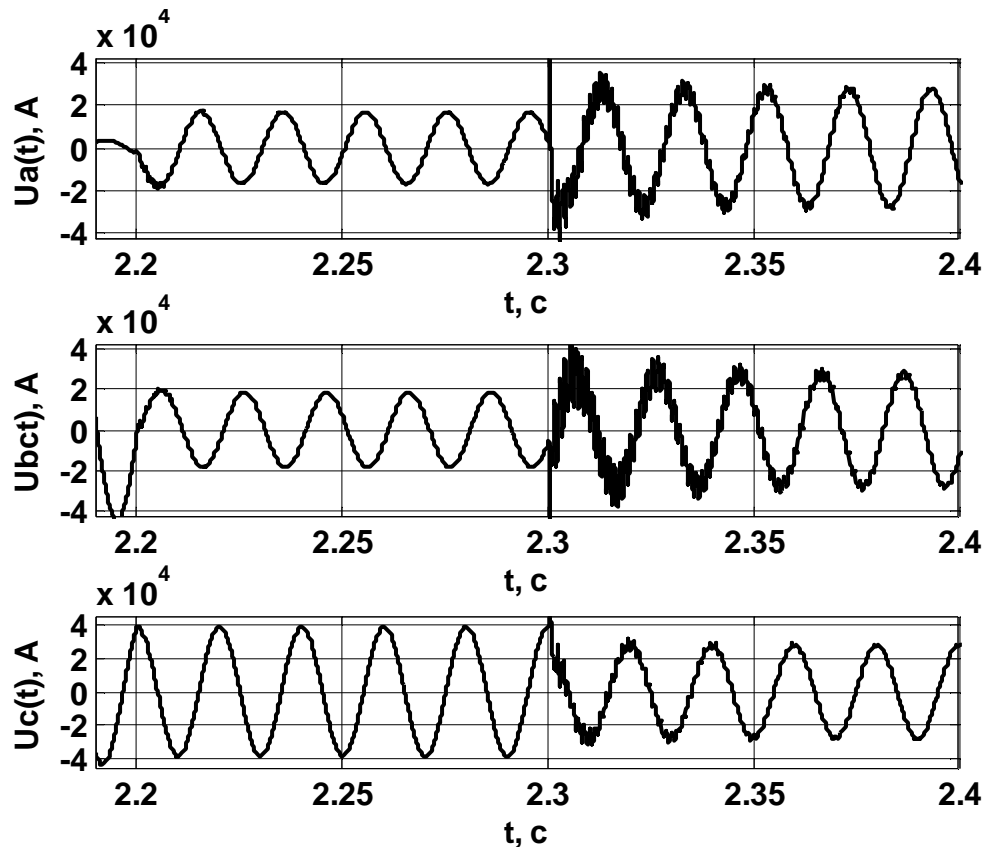


Рисунок 4.49 – Фазное напряжение на шинах 35 кВ во время замыканий и отключения линии Л1

тока статора двигателя. Поскольку двигатель начинает отдавать мощность в сеть, а токи в роторе не успевают изменить своего направления, то ток, текущий в статоре под действием приложенного напряжения сети, и ток, наведенный от вращающегося магнитного поля, индуцируемого ротором, образуют суммарный ток изменяющейся амплитуды. Ток, наводимый от поля ротора, имеет частоту, отличную от частоты сети, что также оказывает влияние на данный процесс. Из графиков электромагнитного момента на валу двигателя (рисунок 4.45) и угловой скорости (рисунок 4.46) видно, что возникновение междуфазного замыкания на линии Л1 существенно изменяет режим работы двигателя. Электромагнитный момент и угловая скорость начинают колебаться с высокой частотой, а амплитуда низкочастотных колебаний этих параметров возрастает. Такие процессы могут привести к опасным механическим вибрациям в двигателе и приводимых им в движение механизмах.

4.4.4 Режим отключения нагрузки на стороне среднего напряжения

Рассмотрим режим, когда нагрузки на стороне 35 кВ отключается в результате замыкания на линии. В момент 2,3 с. от начала моделирования происходит отключение линий Л1 и Л2 от шин 35 кВ выключателем В2.

При отключении нагрузки и поврежденной линии от шин стороны среднего напряжения наблюдаем нормализацию уровня фазных напряжений на шинах (рисунок 4.49). На шинах 35 кВ появляются

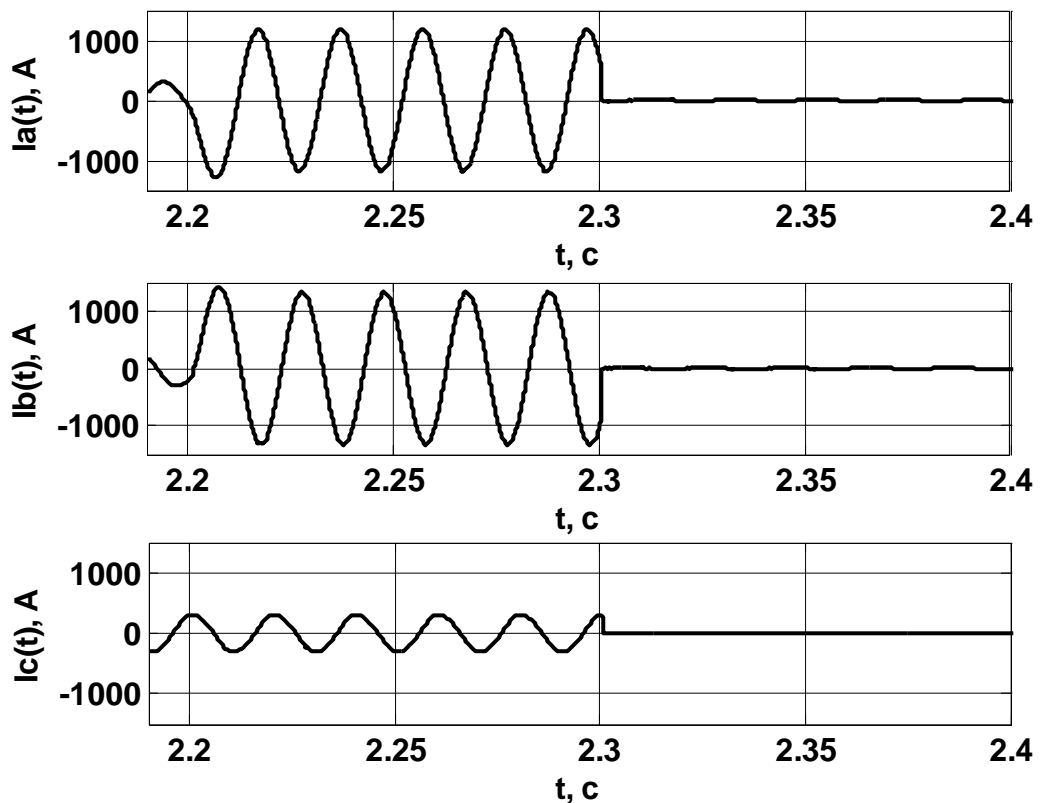


Рисунок 4.50 – Ток на шинах 35 кВ во время замыканий и отключения линии Л1

высокочастотные колебания напряжения. В момент отключения нагрузки наблюдается импульсный скачок напряжения на шинах, вызванный перенапряжением при обрыве токов на индуктивностях обмоток среднего напряжения трансформатора.

Обратим внимание на токи и напряжения фаз *A* и *B* стороны 10 кВ (рисунки 4.47 и 4.48). Именно эти фазы были повреждены на линии Л1 до отключения. На графиках наблюдаются высокочастотные колебания, с амплитудой превышающей основную гармонику. Они связаны с

переходными процессами между емкостью устройства компенсации и индуктивностями на стороне 10 кВ, вследствие изменения режима их работы при отключения нагрузки на стороне 35 кВ. Наличие высших гармоник на стороне среднего напряжения вызвано процессами на стороне нижнего напряжения.

Выводы по главе 4

1. Показаны возможности моделирования цепей с неуправляемыми полупроводниковыми элементами и управляемыми ключами. Продемонстрирована работа модели с указанными элементами на примере мостового преобразователя частоты с ШИМ управлением. Показаны особенности переходных процессов в таких схемах. Произведен анализ сигналов токов и напряжений в различных точках схемы. Показаны особенности работы схемы при различных ее параметрах.
2. Методика хорошо подходит для моделирования схем с неуправляемыми полупроводниковыми элементами и управляемыми ключами в составе одной модели. Используемый подход позволяет задавать различные алгоритмы управления ключами. Расчет в мгновенных значениях величин позволяет отслеживать форму сигналов при всех моделируемых переходных процессах и применять различные способы анализа сигналов. Важным фактором является возможность отслеживать токи и напряжения во всех узлах моделируемой схемы в любой момент времени.
3. Проведено моделирование комплексных узлов нагрузок на разных уровнях напряжения в базисе фазных координат. Построены модели узлов нагрузок, содержащие в себе трехфазные двухобмоточные и трехобмоточные трансформаторы, электрические двигатели, статическую нагрузку, линии электропередач, а также статические устройства компенсации реактивной мощности в виде батарей конденсаторов. Показаны переходные процессы при питании узлов комплексных нагрузок от двухобмоточных и

трехобмоточных трансформаторов с учетом преобразования уровней напряжения. Учтены различные схемы соединения обмоток трансформаторов и способы заземления нейтрали сетей на разных уровнях напряжения.

4. Показаны различные переходные процессы для указанных моделей. Произведено моделирование включения узла нагрузки, пусков и выбегов электродвигателей в различных конфигурациях, несимметричные режимы и переходные процессы при каскадных видах повреждений. Показана совместная работа разных видов нагрузок в узлах, совместная работа в различных режимах узлов нагрузок с электродвигателями. Показано взаимное влияние различных видов нагрузок на разных уровнях напряжения

5. Для указанных моделей проведен анализ протекания различных электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

Заключение

1. Методика моделирования цепей через синтетические схемы постоянного тока (алгоритм Г. Доммеля) адаптирована к расчету переходных процессов в системах электроснабжения. При использовании реализованной методики расчет ведется для мгновенных значений параметров, поэтому она применима как к установившимся, так и переходным процессам и позволяет:

- учитывать различные виды нелинейности в элементах энергосистемы;
- рассмотреть не только процессы, происходящие в сложном электротехническом устройстве, но и оценить его влияние на питающую сеть и другие элементы узла нагрузки;

моделировать переходные процессы с различным гармоническим составом токов и напряжений. Частотная область исследования переходных процессов ограничивается только свойствами моделей элементов и шагом моделирования;

- варьировать любые параметры схемы замещения и управляющих воздействий, менять параметры и конфигурацию схемы замещения на временном диапазоне моделирования, что увеличивает спектр рассматриваемых режимов и позволяет строить гибкие модели различных электротехнических комплексов и систем;

- моделировать узлы нагрузки в фазных координатах, что дает возможность учитывать различные виды несимметрии трехфазных сетей и нагрузок;

- результаты моделирования получаются в виде массивов выборок с выбранным временным шагом, что делает удобным применение к ним методов цифровой обработки сигналов и их импортирование в цифровые форматы осциллограмм.

2. Реализована модель системы с полупроводниковыми элементами и управляемыми ключами на примере преобразователя частоты на основе инвертора с управлением с широтно-импульсной модуляцией.

3. Реализована методика учета нелинейной характеристики индуктивностей. Предлагаемый алгоритм позволяет оценить искажения сигналов в нелинейных индуктивных элементах и показать их влияние на другие участки цепи, учесть различные физические особенности индуктивных элементов, включая остаточную намагниченность (учет гистерезиса в характеристике намагничивания сердечника). Учет остаточной намагниченности предложенным в работе способом имеет важное преимущество – метод позволяет проводить расчет с учетом внутренних петель гистерезиса, что дает возможность более точно анализировать переходные процессы в силовых комплексах и узлах нагрузки.

4. Разработана и реализована модель трансформатора, представляющая его как совокупность индуктивно связанных ветвей и имеющая преимущества перед резистивными схемами без учета взаимной индуктивности. Магнитные характеристики сердечника учтены путем непосредственного расчета зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля в сердечнике с учетом остаточной намагниченности.

5. Применена модель асинхронного двигателя в фазных координатах, которая в совокупности с алгоритмом Доммеля, имеет следующие важные достоинства:

- возможность моделирования переходных процессов при несимметричных режимах работы двигателя;
- отдельные цепи статора и ротора, связанные матрицей индуктивных связей, позволяют оценивать состояние этих цепей в отдельности;
- расчет состояния механических переменных двигателя во времени дает возможность отследить угловую скорость, электромагнитный момент и скольжение двигателя во время переходных процессов, задавать момент

сопротивления на валу двигателя переменным во времени в зависимости от режима работы;

- учет эффекта вытеснения тока в роторе позволяет более адекватно моделировать пусковые режимы двигателей;

- совокупность модели двигателя и методики расчета переходного процесса позволяет моделировать режим выбега асинхронных двигателей в режиме рекуперации, что дает возможность оценить влияние данного режима на сеть;

6. Разработанные подходы и алгоритмы универсальны для любых электрических сетей. На их основе реализовано программное обеспечение, на которое имеется два авторских свидетельства.

7. Реализованные методика и программное обеспечение использованы для анализа переходных процессов в комплексных узлах нагрузки с трехобмоточными трансформаторами и мощными асинхронными двигателями. Показано взаимовлияние и влияние на питающую сеть элементов нагрузки на разных уровнях напряжения при пусковых режимах двигателей, коммутациях, различных видах коротких замыканий в трехфазных сетях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адкинс Б. Общая теория электрических машин / Б. Адкинс. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 272 с.
2. Александров Г. Н. Особенности магнитного поля трансформаторов под нагрузкой / Г. Н. Александров // Электричество. – 2003. – №5. – С. 19-26.
3. Алиев И. И. Электротехнический справочник. 5-е изд. / И. И. Алиев. – М. : ИП РадиоСофт, 2010. – 384 с.
4. Андерсон П. Управление энергосистемами и устойчивость / П. Андерсон, А. Фуад (пер. с англ.). – М. : Энергия, 1980. – 568 с.
5. Атабеков Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей / Г. И. Атабеков – М.-Л. : ГЭИ, 1957. – 344 с.
6. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. В 3-х ч. Ч. 1. Линейные электрические цепи : Учебник для вузов / Г. И. Атабеков. – 5-е изд. испр. и доп. – М. : Энергия, 1978. – 592 с.
7. Баглейбтер О. Реализация модели трансформатора тока в Simulink на основе теории гистерезиса Джилса-Атертона (Jiles-Atherton) / О. Баглейбтер // Релейщик. – М. : ИД «Вся Электротехника». – 2014. – №1. – С. 10-15.
8. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 3-е изд., перераб и доп. - М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2003. – 632 с.
9. Белов А. В. Устойчивость электрических систем. Учеб. пособие / А. В. Белов, Ю. В. Коровин. – Челябинск : изд-во ЧГАУ, 2010. – 137 с.
10. Белов Г. А. Системы управления полупроводниковыми преобразователями / Г. А. Белов, А. Г. Иванов, А. Г. Сергев. –Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – 448 с.
11. Бернас С. Математические модели элементов электроэнергетических систем: пер. с польск. / С. Бернас, З. Цёк. – М. : Энергоиздат, 1982. – 312 с.

12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 9-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов.– М. : Высшая школа, 1996. – 638 с.
13. Бобров А. Э. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: Электрон. учеб. пособие / А. Э. Бобров, А. М. Дьков, В. Б. Зорин и др. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 176 с.
14. Бугров В. Г. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: Учебное пособие / В. Г. Бугров. – Тверь : ТГТУ, 2005. – 115 с.
15. Булат В. А. Переходные процессы в электроэнергетических системах / В. А. Булат. – Минск : БНТУ, 2010. – 70 с.
16. Бушуев В. В. Динамические свойства электроэнергетических систем / В. В. Бушуев. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
17. Валеев Г. С. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения : Учеб. пособие / Г. С. Валеев, В. В. Пястолов. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 41 с.
18. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М.-Л. : изд-во Энергия, 1964. – 410 с.
19. Веников В. А. Электрические системы. Электрические сети: Учеб. для электроэнерг. спец. вузов / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др.; под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1998. – 511 с.
20. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново. – 2008. – 298 с.
21. Винославский В. Н. Переходные процессы в системах электроснабжения : Учеб. для вузов / В. Н. Винославский, Г. Г. Пивняк и др. - 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2003. – 548 с.
22. Волков Е. А. Численные методы: Учеб. пособие для вузов / Е. А. Волков. – 2-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит, 1987. – 248 с.

23. Вольдек А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: Учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 350 с.
24. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.
25. Гамазин С. И. Переходные процессы в системах электроснабжения с электродвигательной нагрузкой / С. И. Гамазин, Т. А. Садыбеков. – Алма-Ата : Гылым, 1991. – 302 с.
26. Гамазин С. И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С. И. Гамазин, В. А. Ставцев, С. А. Цырук. – М. : Издательство МЭИ, 1997. – 421 с.
27. Гашко Е. Г. Энергоэффективность как основа стратегии развития региона / Е. Г. Гашко, Е. В. Репецкая // Энергосбережение. – 2010. – №5. – С. 16-19.
28. Голоднов Ю. М. Самозапуск электродвигателей / Ю. М. Голоднов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
29. ГОСТ 13109-97 (2002). Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Межгосударственный стандарт. 33 с.
30. ГОСТ 21027-75 (2005). Системы энергетические. Термины и определения. Межгосударственный стандарт. 6 с.
31. Гуревич Ю. Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, А. А. Окин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
32. Гуревич Ю. Е. Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю. Е. Гуревич, Э. А. Либова, Э. А. Хачатрян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 208 с.
33. Гуревич Ю. Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности

электроснабжения промышленных предприятий / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова. – М. : Элекс-КМ, 2008. – 246 с.

34. Данилов Л. В. Теория нелинейных электрических цепей / Л. В. Данилов, П. Н. Матханов, Е. С. Филиппов. – Л. : Энергоатомиздат, 1990 – 256 с.

35. Демирчан К.С. Моделирование и машинный расчет электрических цепей: Учеб. пособие для электр. электроэнерг. спец. вузов. / К. С. Демирчан, П. А. Бутырин. – М. : Высш. шк., 1988. – 335 с.

36. Демирчан К. С. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1 / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 463 с.

37. Дмитриев М. В. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной системы / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – №2. – С. 37-48.

38. Долгов А. П. Переходные процессы в системах электроснабжения: Учеб. пособие / А. П. Долгов, Л. И. Пушкарева. – Новосибирск : НЭТИ, 1988. – 83 с.

39. Донской Н. В. Асинхронный двигатель в системах автоматического управления : монография / Н. В. Донской. – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – 283 с.

40. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. - М. : Энергия, 1979. – 456 с.

41. Закарюкин В. П. Сложносимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та – 2005. – 273 с.

42. Законьшек Я. В. Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени / Я. В. Законьшек, А. Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №1. – С. 66 -74.

43. Законьшек Я. В. Использование цифровых программно-аппаратных комплексов моделирования энергосистем в режиме реального времени RTDS для исследования функционирования устройств РЗА / Я. В. Законьшек, А. Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: материалы международной научно-практической конференции и выставки. – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та. – 2012. – С. 43-46.

44. Законьшек Я. В. Современные системы защиты автоматизации на многоцепных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения / Я. В. Законьшек, А. Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация энергосистем: сборник докладов XXI конференции. – Москва. – 2012. – С. 81-91.

45. Зирка С. Е. Моделирование переходных процессов в трансформаторе с учетом гистерезисных свойств магнитопровода / С. Е. Зирка, Ю. И. Мороз, Е. Ю. Мороз, А. Л. Тарчуткин // Техническая электродинамика. – №2. – 2010. – С. 11-20.

46. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учеб. для вузов / В. И. Идельчик – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

47. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. В 2-х т. Т.1. / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 652 с.

48. Кадомская К. П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. Учебник / Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Рейхердт А. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.

49. Калентионок Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е.В. Калентионок. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 375 с.

50. Калинин А. Г. Эффективность применения частотно-регулируемого электропривода в системах ЖКХ / А. Г. Калинин, В. Н. Ларионов // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2009. – №1. – С. 41-47.

51. Калинин А. Г. Анализ провалов напряжения при пусках электродвигателей с вентиляторной нагрузкой / А. Г. Калинин, А. К. Аракелян // Электричество. – 2011. – №6. – С. 46-50.

52. Кацман М. М. Электрические машины / М. М. Кацман. – М. : Издательский центр Академия, 2003. – 463 с.

53. Коровин Ю. В. Расчет токов короткого замыкания в электрических системах: Учеб. пособие / Ю. В. Коровин, Е. И. Пахомов, К. Е. Горшков. – Челябинск : ЮУрГУ, 2011. – 114 с.

54. Крючков И. П. Переходные процессы в электроэнергетических системах: Учеб. для вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев и др. – М : МЭИ, 2008. – 416 с.

55. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин. – М. : Интернет Инжиниринг, 2006. – 672 с.

56. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие / Ю. А. Куликов. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2006. – 284 с.

57. Лейтес. Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес. – М. : Энергия, 1981. – 389 с.

58. Лурье А. И. Процесс включения трансформатора на холостой ход и короткое замыкание / А. И. Лурье // Электротехника. – 2008. – №2. – С. 2-18.

59. Лыкин А. В. Электрические системы и сети: Учеб. пособие / А. В. Лыкин. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 254 с.

60. Лыкин А. В. Математическое моделирование электрических систем и их элементов / А. В. Лыкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2009. – 228 с.

61. Лямец Ю. Я. Теоретические основы электротехники с элементами электроэнергетики и релейной защиты. Многопроводные системы: Учеб. пособие / Ю. Я. Лямец, В. А. Ефремов, В. А. Ильин, А. П. Арсеньев, Н. С. Ефимов. – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 160 с.

62. Лямец Ю. Я. Эквивалентирование многопроводных систем при замыканиях и обрывах части проводов / Ю. Я. Лямец, Д. Г. Еремеев, Г. С. Нудельман // Электричество. – 2003. – №11. – С. 17-27.

63. Мелешкин Г. А. Устойчивость энергосистем. Теория / Г. А. Мелешкин, Г. В. Меркурьев. – СПб. : НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.

64. Москаленко В. В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Москаленко. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

65. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования : Учеб. пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

66. Никитин А. А. Микропроцессорные реле: Учеб. пособие / А. А. Никитин – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та, 2006. – 448 с.

67. Никитин. А. А. Аппараты релейной защиты: учеб. пособие / А. А. Никитин, Э. М. Шнеерсон. – Чебоксары : изд-во Чуваш. Ун-та, 2008. – 524 с.

68. Никитин А. А. Микропроцессорные реле. Основы теории построения измерительной части: Учеб. пособие / А. А. Никитин. Чебоксары : Изд-во ООО НПП «ЭКРА», 2009. – 216 с.

69. Ойрех Я. А. Режимы самозапуска асинхронных электродвигателей / Я. А. Ойрех, В. Ф. Сивокобыленко. – М. : Энергия, 1974. – 81 с.

70. Петров Г. Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы: Учеб. для вузов / Г. Н. Петров. – М. : Энергия, 1974. – 240 с.

71. Плотников П. В. Основы численных методов / П. В. Плотников, Л. И. Турчак. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003 – 304 с.

72. Программа для расчета переходных процессов в электрических цепях с нелинейными элементами NLETransSim: а.с. 2015611053. Рос. Федерация / А. Л. Славутский; правообладатель ФГБОУВПО «Чувашский

государственный университет им. И. Н. Ульянова». – № 2014662354; заявл. 02.12.2014; рег. 23.01.2015. – 1 с.

73. Программа для расчета переходных процессов в электрических цепях с нелинейными элементами NLETransSim 1.1: а.с. 2015616968. Рос. Федерация / А. Л. Славутский; правообладатель ФГБОУВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». – № 2015613661; заявл. 05.05.2015; рег. 26.06.2015. – 1 с.

74. РД 153-340-20527-98 (2002) Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования; под ред. Б. Н. Неклепаева. – М. : РАО Электроэнергетики и электрификации «ЕЭС РОССИИ» – 131 с.

75. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110 – 750 кВ.; под ред. Т. Н. Дородновой. – М. : Энергия, 1979. – 152 с.

76. Рябов В. И. Электрооборудование: Учеб. для сред. спец. учеб. заведений. 5-е изд., перераб. / В. И. Рябов.– М. : Экономика, 1990. – 175 с.

77. Сенигов П. Н. Переходные процессы в синхронных машинах: Учеб. пособие / П. Н. Сенигов. – Челябинск : ЧГТУ, 1993. – 44 с.

78. Сенигов П. Н. Физические основы устойчивости электрических систем: Учеб. пособие / П. Н. Сенигов. – Челябинск, 1996. – 80 с.

79. Славутский А. Л. Методика оценки динамических характеристик цифровых измерительных органов релейной защиты / А. Л. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 9-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та. – 2011. – С. 285-289.

80. Славутский А. Л. Моделирование переходных процессов и оценка динамических характеристик цифровых измерительных органов релейной защиты / А. Л. Славутский // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. – Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 23-25.

81. Славутский А. Л. Применение алгоритма Доммеля для расчета переходных процессов в электрических цепях с нелинейными элементами / А. Л. Славутский // Региональная энергетика и электротехника. Проблемы и решения. Сборник научных трудов. Выпуск VIII. – Чебоксары : изд-во Чуваш. Унт-та. – 2012. – С. 57-65.

82. Славутский А. Л. Оценка динамических характеристик измерительных органов при переходных процессах в энергосистеме / А. Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. Серия «Естественные и технические науки». – 2012. – №3. – С. 161-165.

83. Славутский А. Л. Моделирование нестационарных режимов в силовых комплексах с полупроводниковыми элементами / А. Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: сборник тезисов докладов II международной научно-практической конференции-выставки. – Чебоксары : РИЦ «СРЗАУ». – 2013. – С. 112-114.

84. Славутский А. Л. Расчет переходных процессов в цепи с нелинейной индуктивностью / А. Л. Славутский // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 9-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та. – 2014. – С. 257-261.

85. Славутский А. Л. Применение алгоритма Доммеля для моделирования цепи с полупроводниковыми элементами и ключами с ШИМ управлением / А. Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. Серия «Естественные и технические науки». – 2014. – №2. – С. 57-66.

86. Славутский А. Л. Программа расчета переходных процессов в электрических цепях / А. Л. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. кноф. – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та. – 2015. – С. 56-59.

87. Славутский А. Л. Моделирование переходных процессов в узле нагрузки с асинхронным двигателем / А. Л. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: 11-й

Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та. – 2015. – С. 56-59.

88. Славутский А. Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов / А. Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. Серия «Электротехника и энергетика». –2015. –№1. – С. 122-130.

89. Славутский А. Л. Моделирование переходных режимов узла нагрузки с асинхронным двигателем в фазных координатах / А. Л. Славутский // Электротехнические и информационные комплексы и системы. –2015. –№ 1. – С. 38-45.

90. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

91. Трещев И. И. Электромеханические переходные процессы в машинах переменного тока / И. И. Трещев. – Л. : Энергия, 1980. – 112 с.

92. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов – М. : Энергия, 1970. – 520 с.

93. Фролов Э. М. Основы электропривода / Э. М. Фролов. – Чебоксары : изд-во Чуваш. ун-та, 2001. – 138 с.

94. Федоров А. А. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. Т.2. / А. А. Федоров – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 592 с.

95. Цыгулев Н. И. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие / Н. И. Цыгулев. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2003. – 98 с.

96. Чернин А. Б. Основы вычислений электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах / А. Б. Чернин, С. Б. Лосев – М. : Энергия, 1970. – 439 с.

97. Чернин А. Б. Расчет электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности / А. Б. Чернин, С. Б. Лосев – М. : Энергия, 1972. – 144 с.

98. Чернобровов Н. В. Релейная защита: Учеб. пособие для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

99. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс; 2008. – 288 с.

100. Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: Монография / М. А. Шабад. – 4-е изд., перераб. и доп. - СПб. : ПЭИПК, 2003. – 350 с.

101. Шакиров М. А., Андрушук В. В. Дуань Лиюн. Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании // Электричество. – 2010. – №3. – С. 53-63.

102. Щедрин В. А. Процессы в узлах нагрузки при медленных изменениях напряжения и частоты: текст лекций. – Чебоксары: изд. Чуваш. ун-та, 1985. – 60 с.

103. Щедрин В. А. Процессы в узлах нагрузки при самозапуске электродвигателей: Учеб. пособие / В. А. Щедрин, В. М. Пупин, – Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 88 с.

104. Щедрин В. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие / В. А. Щедрин, Н. М. Ермолаев, Л. Э. Александрова. – Чебоксары : Изд. Чуваш. ун-та, 2005. – 88 с.

105. Щедрин В. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : Учеб. пос. / В. А. Щедрин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та. 2007. – 422 с.

106. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

107. Barret J. P. Power system simulation // J. P. Barret, P. Bornard, B. Meyer. – Springer, 1997. 288 p.

108. Benabou A. Minor loops modelling with a modified Jiles–Atherton model and comparison with the Preisach model / A. Benabou, J. V. Leite, S. Clenet, C. Simao, N. Sadowski // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320 (2008). P. 1035 – 1038.

109. Brunke J. H. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations / J. H. Brunke, K. J. Frohlich // *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. – VOL. 16. – No. 2. – APRIL 2001. P. 276 – 280.

110. Cundeva S. A. Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis / S. A. Cundeva // *Serbian Journal of Electrical engineering* Vol. – 5. – No. 1. – May 2008. – P. 21-30.

111. Dommel H. W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks / H. W. Dommel // *IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS*. – 1969. – VOL. PAS-88. – NO. 4. – P. 388 – 399.

112. Jiles D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis / D. C. Jiles, D. L. Atherton // *Journal of Magnetism and Magnetism Materials* 61. – 1986. – North-Holland, Amsterdam. – P. 48-60.

113. Mayergoyz I. D. Mathematical model of hysteresis / I. D. Mayergoyz // NY.: Springer-Verlag New York Inc. – 1991. 207 p.

114. Paul C. Krause Analysis of the machinery and drive systems / Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff. – New York : IEEE PRESS, 2002. – 630 p.

115. Steurer M. The Impact of Inrush Curenets on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils / M. Steurer, K. Frohlich // *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. – VOL. 17. – NO. 1. – JANUARY 2002. P. 155 – 160.

116. Szewczyk R. Computational problems connected with Jiles-Atherton model of magnetic hysteresis / R. Szewczyk // *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Springer). – VOL. 267 (2014) – P. 275.

117. Watson Neville. Power System Electromagnetic Transients Simulation / Neville Watson, Jos Arillaga. – London. : The Institution of Engineering and Technology, 2007. – 621 p.

118. Marti J. R. Phase-Domain Induction Motor Model for Power System Simulators / J. R. Marti, T. O. Myers. – IEEE WESCANEX '95 PROCEEDING. – P. 276-282.

119. Wang L. Method of Interfacing Rotating Machine Models in Transient Simulation Programs / L. Wang, J. Jatskevich, V. Dinavahi et al. – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. – VOL. 25. – NO. 2. – APRIL 2010. – P. 891-903.

120. Wang L. A Voltage-Behind-Reactance Induction Machine Model for the EMTP-Type Solution / L. Wang, J. Jatskevich, C. Wang, P. Li. – IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. – VOL. 23. – NO. 3. – AUGUST 2008. – P. 1226-1238.

Приложение 1 Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ NLETransSim

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015611053

Программа для расчета переходных процессов в
электрических цепях с нелинейными элементами
NLETransSim

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Чувашский государственный университет имени
И.Н. Ульянова» (RU)*

Автор: *Славутский Александр Леонидович (RU)*

Заявка № 2014662354

Дата поступления 02 декабря 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 января 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



**Приложение 2 Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ NLETransSim 1.1**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015616968

**Программа для расчета переходных процессов в
электрических цепях с нелинейными элементами
NLETransSim 1.1**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования "Чувашский государственный университет имени
И.Н. Ульянова" (RU)*

Автор: *Славутский Александр Леонидович (RU)*

Заявка № **2015613661**

Дата поступления **05 мая 2015 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **26 июня 2015 г.**

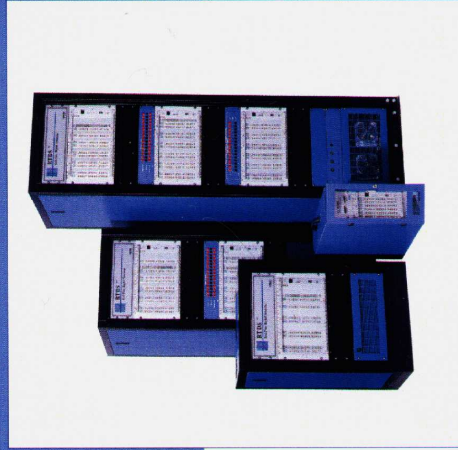
*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



Приложение 3 Сертификат об обучении работе на комплексах RTDS

Certificate of Completion



**RTDS Simulator
Introductory Training Course**

This certificate is awarded to

Alexander Slavutskiy

Ali Dehkordi

Ali Dehkordi, Simulation Specialist
RTDS Technologies Inc.

December 2, 2011

Cyril Peters

Cyril Peters, Simulation Specialist
RTDS Technologies Inc.

December 2, 2011



Приложение 4 Справки о внедрении результатов работы



Закрытое акционерное общество
«Научно-производственная фирма «Современные технологии»
(ЗАО НПФ «Современные технологии»)
428003, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Ильбекова, д. 9
телефон/факс: 8352/22-68-71, e-mail: moderntechnology@bk.ru
ИНН/КПП 2128040787/213001001,
ОКПО 54086311, ОГРН 1022101143118

Исх. № 41 Дата: 05 июля 2015

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Александра Леонидовича Славутского «Моделирование переходных процессов в узлах комплексной нагрузки с нелинейными элементами методом синтетических схем»

Результаты диссертационной работы Славутского Александра Леонидовича «Моделирование переходных процессов в узлах комплексной нагрузки с нелинейными элементами методом синтетических схем», представленной на соискание степени кандидата технических наук, находят применение в разработках ЗАО «НПФ Современные технологии». Результаты работы использовались при следующих исследованиях и разработках:

1. Моделирование переходных режимов высоковольтных линий электропередач с учетом особенностей конструкции для разработки алгоритма определения места повреждения и алгоритмов устройств релейной защиты линий электропередач.
2. Моделирование сложных переходных процессов в сетях и нагрузках среднего напряжения с учетом режимов заземления нейтрали для разработки алгоритмов РЗА и формирования сигналов для лабораторных испытаний.

Руководитель организации _____



О.В.Ковалева



ПикЭлби
надежность в возможностях

Закрытое акционерное общество
«ПРОИЗВОДСТВЕННО-ИНЖИНИРИНГОВАЯ
КОМПАНИЯ ЭЛБИ»
(ЗАО «ПИК ЭЛБИ»)

Обособленное подразделение в г. Чебоксары
428003, г. Чебоксары, ул. Пристанционная, д.1.
Тел.: (8352) 66-46-91 факс: (8352) 28-80-50
e-mail: cheb@pik-elbi.ru, Internet: www.pik-elbi.ru

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

А.Л. Славутского «Моделирование переходных процессов в узлах комплексной нагрузки с нелинейными элементами методом синтетических схем»

Результаты диссертационной работы Славутского Александра Леонидовича «Моделирование переходных процессов в узлах комплексной нагрузки с нелинейными элементами методом синтетических схем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, получили внедрение в ЗАО «ПИК ЭЛБИ». В частности:

-при проведении НИОКР по разработке комплекса устройств релейной защиты и автоматики использована программа расчета переходных процессов в электрических сетях и нагрузках для моделирования аварийных режимов в сетях среднего напряжения, для анализа процессов в электрических сетях, разработки измерительных органов и алгоритмов работы устройств. Сигналы, полученные в результате моделирования, использованы для проведения лабораторных испытаний измерительных устройств в составе комплекса.

Директор ОП
в г. Чебоксары



Б.С. Лебедев