

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»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2016

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий имени А.А. Фёдорова» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Щедрин Владимир Александрович

Официальные оппоненты: **Макаров Валерий Геннадьевич,**
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра «Электропривода и электротехники», заведующий кафедрой;

Карчин Виктор Васильевич,
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Марийский государственный университет», кафедра электроснабжения и технической диагностики, доцент.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».**

Защита состоится «27» мая 2016 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 (учебный корпус № 3), зал заседаний учёного совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «25» 03 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.302.06

Н.В. Руссова

Актуальность. Узлом комплексной нагрузки называется совокупность потребителей электроэнергии (нагрузок), 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) и разделять 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. Идельчика и др.). Чаще всего задача моделирования сетей и нагрузок указанного класса напряжения сводится к расчету начального переходного и установившегося режима для задач РЗА, определения уровней напряжения и потерь электроэнергии.

Широко описаны в отечественной и зарубежной литературе модели отдельных элементов сетей и нагрузок, таких как воздушные и кабельные ЛЭП, силовые трансформаторы, электродвигатели, устройства компенсации реактивной мощности, силовые полупроводниковые комплексы и другие. Но обычно, эти модели рассматриваются без учета взаимного влияния друг на друга при рассмотрении переходных 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. Слодаржа, С. И. Гамазина, В. М. Пупина и др.). Кроме того, сложность вызывает моделирование распределительных сетей с разными способами заземления нейтрали, которые встречаются в сетях среднего напряжения.

Широко применяемые на практике упрощенные 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. Как правило, 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.

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 соответствующих методик 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 (ТОЭ), 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 трехфазных сетей.

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: перегрузок, перенапряжений, аварийных процессов, выбора параметров устройств РЗА и автоматики.

2. Разработанные методики, модели и программное обеспечение могут использоваться в учебном процессе в ВУЗах 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 и разработке 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 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, 4х глав, заключения, списка литературы (120 наименований), приложений (5 страниц), включает в себя 159 страниц машинного текста, 105 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования, формулировку целей и задач, раскрывает структуру работы.

В первой главе проведен краткий анализ существующих методов моделирования режимов узлов нагрузок СЭС. 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. Такие модели не отличаются высокой детализацией и служат для оценки векторов действующих значений токов и напряжений в линиях, обобщенной нагрузке и трансформаторах подстанций.

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 они имеют

недостатки, ограничивающие их использование, такие, как высокая 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.

Во второй главе подробно описана предлагаемая методика моделирования переходных процессов в узлах комплексных нагрузок СЭС.

Для моделирования и расчета переходных процессов в цепях, содержащих нелинейные элементы, удобно использовать численные алгоритмы, такие, как алгоритм Доммеля, который позволяет рассчитывать переходные процессы в электрических цепях путем расчета резистивных схем для дискретных моментов времени. В отечественной литературе этот подход носит название метода синтетических схем.

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 индуктивности и емкости, u_C и u_L – напряжения на емкости и на 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 сопротивления $R_L = \frac{2L}{h}$, $R_C = \frac{h}{2C}$ 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 1). Используя формулы (1) и (2) на $n+1$ шаге расчета для нахождения параметров схем представленных на рисунке 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.

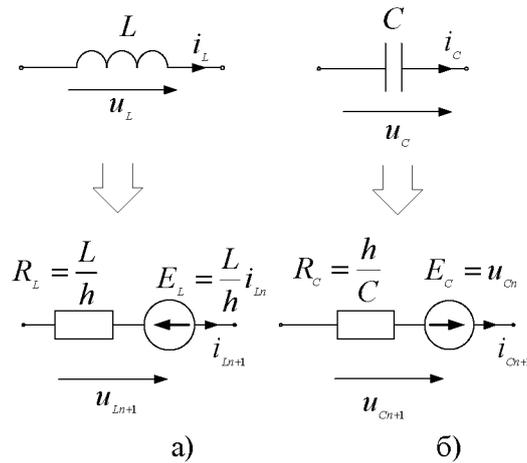


Рисунок 1. Переход от накопительного элемента к его эквивалентной резистивной схеме замещения: а – для индуктивности, б – для емкости

Проиллюстрируем приемы макромоделирования для эквивалентирования ветви с взаимной индуктивностью (рисунок 2).

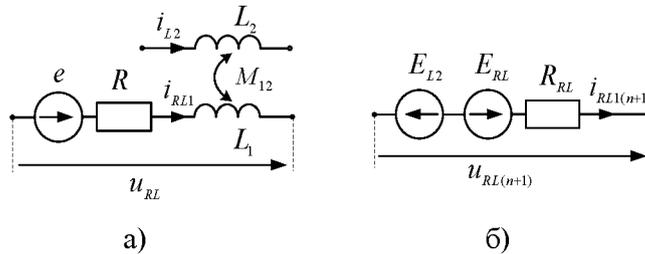


Рисунок 2. Ветвь, имеющая взаимную индуктивность с соседней ветвью: а – схема ветви; б – эквивалентная резистивная схема для этой ветви

Такая ветвь описывается уравнением:

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

При аппроксимации методом трапеций уравнения (3), получим уравнение (4):

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

где M_{12} – взаимная индуктивность, Гн.

Резистивная схема, соответствующая выражению (4), приведена на рис 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.

Для расчета переходных процессов в нелинейных цепях с использованием описанного алгоритма реализован следующий подход: на каждом временном шаге рассчитывается первое приближение параметров резистивной схемы и токов с напряжениями в данной схеме без учета нелинейности элементов. Затем при помощи численных методов решения систем нелинейных уравнений находятся уточненные значения параметров схемы и токов с напряжениями в ней, с учетом нелинейной ВАХ элементов.

В качестве численного метода решения системы нелинейных уравнений используется алгоритм Ньютона-Рафсона. 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 уточненное значение корня близким к истинному, при котором (5) обращается в тождество, то приближенное значение искомого приращения корня будет:

$$h_k = -F(x_k)/F'(x_k), \text{ тогда: } x_{k+1} = x_k - h_k = x_k - F(x_k)/F'(x_k).$$

Если в схеме присутствует несколько нелинейных элементов, то при формировании уравнений, например по методу узловых напряжений, получается система нелинейных уравнений. Размерность этой системы растет с увеличением количества нелинейных элементов, а, следовательно, растет и сложность составления уравнений. В данной работе применен подход, дающий те же результаты, что и вышеописанный, но исключающий составление сложных систем нелинейных уравнений. Алгоритм Ньютона-Рафсона применяется не к составленным уравнениям 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 виде $u_{k+1} = f(i_{k+1})$ 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 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 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 3). Параметры элементов этой схемы определяются на каждом шаге уточнения, исходя из величины напряжения и тока на предыдущем шаге, а так же ВАХ элемента. Таким образом, для каждого нелинейного элемента схемы можно составить дискретную линеаризованную схему на каждом шаге итерации для данного момента времени.

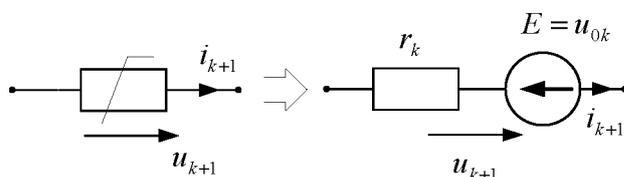


Рисунок 3. Схема замещения нелинейного элемента на k -м шаге приближения

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 чисто резистивной схемой замещения, состоящей из сопротивления и ЭДС. Подставляя в расчет по алгоритму Доммеля линеаризованную схемную модель алгоритма Ньютона-Рафсона 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, находятся численно.

В третьей главе описаны модели основных элементов узлов комплексной нагрузки СЭС. При моделировании узлов используется базис

фазных координат, поскольку данная система отсчета является наиболее приближенной к реальности, накладывает гораздо меньше ограничений на схему, количество несимметрий трехфазной сети, не требует дополнительных преобразований значений токов и напряжений к различным осям, как, например, в базисе симметричных составляющих. Кроме того, данная система отсчета не накладывает ограничений на форму сигналов источников и линейность элементов схемы.

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. Для получения более точной картины распределения удельных электрических параметров приходится увеличивать количество П-схем и уменьшать их длину. Тем не менее, принятая модель хорошо подходит для учета линий электропередач при изучении переходных процессов при нарушении симметрии трехфазной системы и замыканиях на землю, которые часто встречаются в СЭС с изолированной и компенсированной нейтралью.

Силовые полупроводниковые комплексы, которые являются нелинейной нагрузкой, представлены различным преобразовательным оборудованием или устройствами компенсации реактивной мощности. 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. Система управления, для упрощения, может моделироваться путем программной имитации ее логики работы. Такой подход сильно упрощает модель для типовых схем управления, например ШИМ.

При расчете процессов в узлах нагрузки применялась модель силового трансформатора, состоящая из индуктивно связанных ветвей. Модель позволяет проводить расчет с учетом преобразования уровней напряжения, схем соединения обмоток трансформатора. Параметры модели рассчитываются из паспортных данных трансформатора.

Представлена модель индуктивного элемента с ферромагнитным сердечником, учитывающая насыщение и гистерезис в характеристике намагничивания сердечника при расчете переходных процессов. Методика отражает свойства элемента с учетом магнитной системы, и при этом не приводит к усложнению топологии исследуемой схемы. В модели принято допущение об однородности магнитного поля в магнитной системе и ряд

других, являющихся общепринятыми допущениями в большинстве моделей элементов с магнитной системой. Эта модель применена и к трансформаторам. Сложность использования модели в большинстве расчетов сводится к отсутствию данных о магнитной системе силовых элементов: трансформаторов, реакторов и других. Для моделирования кривой намагничивания материала сердечника с учетом остаточной намагниченности применена модель магнитного гистерезиса Джайлса-Атертона. Модель основана на описании кривой намагничивания дифференциальным уравнением. Следует отметить, что использованная методика моделирования петли гистерезиса учитывает наличие внутренних петель, что уточняет результат при анализе переходных процессов.

Модель асинхронного двигателя описана в фазных координатах. Такой выбор связан с простотой согласования модели сети и модели двигателя – возможно напрямую подключить зажимы модели двигателя к трехфазной модели сети в фазных координатах без дополнительных преобразований.

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

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s + p\mathbf{L}_s & p\mathbf{L}'_{sr} \\ p(\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{R}'_r + p\mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}'_r \end{bmatrix}, \quad (8)$$

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{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}'_{sr} – матрица взаимных индуктивностей между ветвями статора и ротора, они являются функциями угла поворота ротора. Указанной системе уравнений для асинхронной машины можно сопоставить трехфазную схему замещения, содержащую 6 ветвей, индуктивно связанных между собой.

Величины момента, угловой скорости ротора и угла его поворота относительно статора связаны между собой следующими выражениями:

$$T_e = \frac{z}{2} (\mathbf{i}_s)^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] \mathbf{i}'_r, \quad (9)$$

$$T_e = J \left(\frac{2}{z} \right) \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + T_m, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} = \omega_r, \quad (11)$$

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 (9) – (11), находим величины 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 (8), получаем динамическую модель асинхронного двигателя. После дискретизации уравнений (9) – (11) по правилу трапеций решаем их 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.

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:

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

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

где R_{rc} и x_{lrc} - активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния ротора в синхронном режиме, R_{rn} и x_{lrn} - сопротивления в режиме пуска.

В четвертой главе диссертации освещены прикладные аспекты разработанной методики для анализа переходных процессов в СЭС. Проведено моделирование и анализ переходных режимов электрических систем, содержащих полупроводниковые элементы, трансформаторы, электрические двигатели и другие элементы.

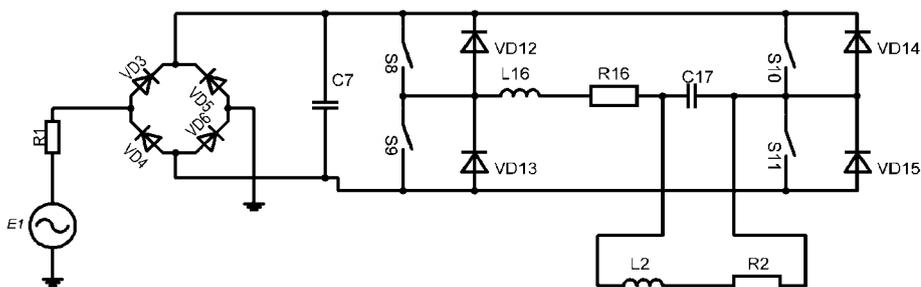


Рисунок 4. Схема преобразователя частоты

Моделирование работы двухфазного преобразователя частоты, состоящего из мостового выпрямителя и инвертора с ШИМ управлением, выполнено для схемы преобразователя, приведенной на рисунке 4. Моделируемая схема имеет следующие параметры: $E1 = 220 \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t)$ В, $R1 = 1$ 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 эмитируются 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 нелинейными элементами. Частота ШИМ составляет 1200 Гц. Частота модулирующего сигнала ШИМ равна 60 Гц.

Рассмотрено несколько режимов работы схемы при различных параметрах нагрузки. Нагрузка представлена индуктивностью $L2$ и сопротивлением $R2$. Соотношение сопротивления и индуктивности принято таким, что $\cos\varphi$ нагрузки равен 0,8.

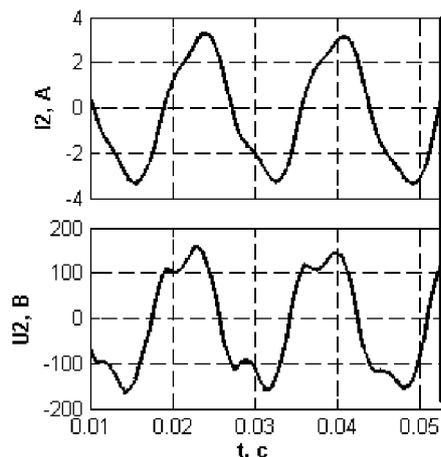


Рисунок 5. Графики тока и напряжения на нагрузке инвертора

Параметры фильтра $L18$, $R18$, $C19$ рассчитаны исходя из этой нагрузки. Фильтр рассчитывался при частоте среза 60 Гц.

Результаты моделирования иллюстрируют работу диодов, как нелинейных элементов, выпрямителя с инвертором, как сложных устройств с нелинейными характеристиками с учетом их влияния на питающую 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. В спектре тока $I1$ амплитуда нечетных гармоник сопоставима с величиной сигнала промышленной частоты.

Токи и напряжения в нагрузке, при правильно подобранных параметрах выходного фильтра инвертора, практически синусоидальны. Результаты моделирования схемы (рисунок 4) с другими параметрами фильтра: $C16 = 20$ мкФ, $L17 = 0,1$ Гн показаны на рисунке 5. На графиках токов и напряжений, хорошо видно наличие третьей гармоники (180 Гц при основной частоте работы нагрузки равной 60 Гц).

Как отмечено выше, 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 при разных частотах ШИМ и подобрать оптимальную частоту модуляции.

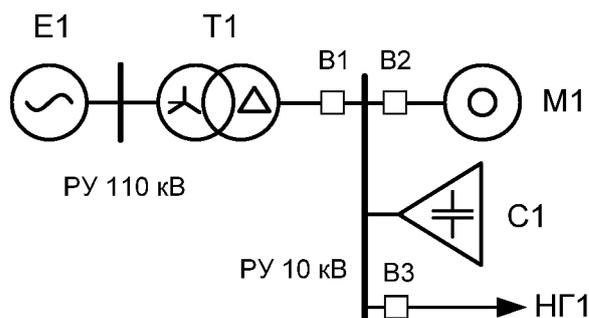


Рисунок 6. Схема комплексного узла нагрузки

Основное применение разработанной методики заключается в исследовании переходных режимов узлов комплексной нагрузки СЭС в фазных координатах.

В качестве примера проанализированы различные переходные режимы для схемы узла нагрузки 10 кВ, показанного на рисунке 6.

Параметры узла следующие: $U_{1m} = \sqrt{2} \cdot 115$ кВ, трансформатор (Т1) ТДН-16000/110, двигатель (М1) АЗМП-5000, нагрузка: $S_{НГ1} = 1$ МВ·А, $\cos \varphi_{НГ1} = 0,9$, компенсирующее устройство имеет мощность $Q_{C1} = 840$ кВ·Ар. Параметры обмоток трансформатора рассчитаны исходя из паспортных данных.

Для демонстрации работы методики проведено моделирование трех 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.

Интерес представляет выбег двигателя при отключении питания узла нагрузки с последующим возобновлением питания. Отмечены и проанализированы основные закономерности совпадающие с теоретическими положениями и практическим данными для подобных режимов. Отмечены следующие особенности: напряжение в узле пропадает не мгновенно, а начинает постепенно падать, при этом частота сети зависит от частоты вращения ротора двигателя, поскольку двигатель работает в генераторном режиме. Кроме того, переходный процесс при отключении выключателя на нижней стороне трансформатора (выключатель В1) приводит к появлению высших гармоник в токах и напряжениях нагрузок.

Проанализирован несимметричный режим узла нагрузки при возникновении междуфазного замыкания на статической нагрузке с

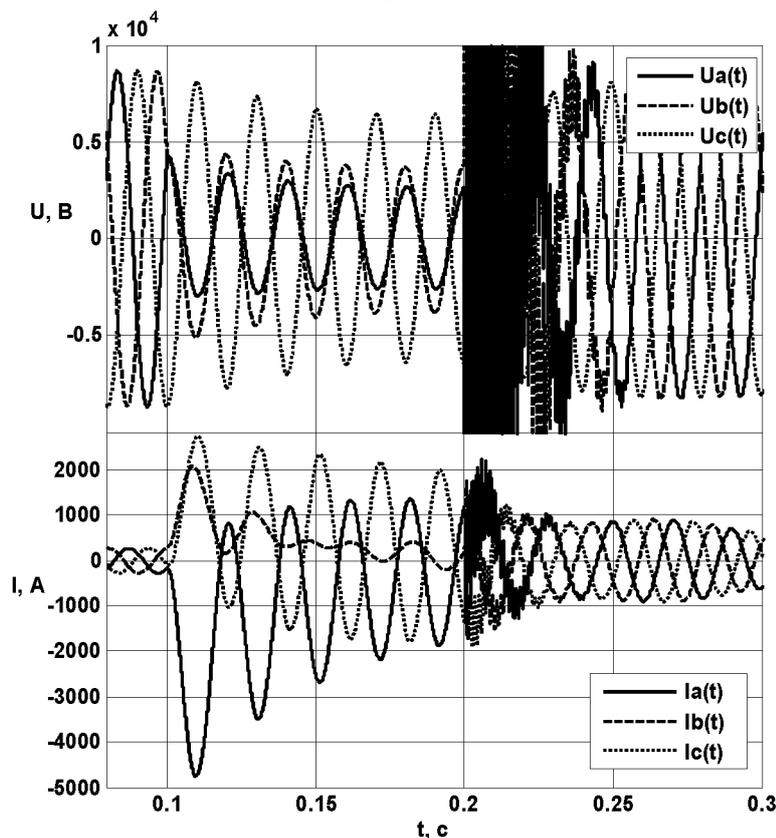


Рисунок 7. Графики фазных напряжений и токов статора двигателя при замыкании на нагрузку

ее отключением. Режим моделируется в следующей последовательности: в момент времени равный нулю, все выключатели включены и узел работает в стационарном режиме. В момент времени 0,1 с. включается ветвь замыкания фаз А-В статической нагрузки через сопротивление 0,1 Ом. В момент времени 0,2 с. статическая нагрузка отключается от узла выключателем В3.

Графики токов и напряжений статора двигателя показаны на рисунке 7. Фазное

напряжение на шинах 10 кВ при междуфазном замыкании в поврежденных фазах выравнивается по углу и амплитуде. Напряжение в неповрежденной

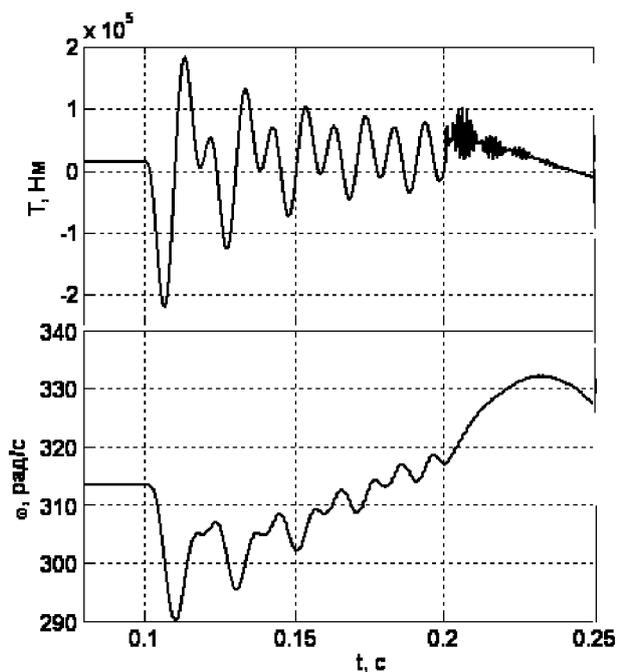


Рисунок 8. Электромагнитный момент и угловая скорость двигателя

фаза изменяется в меньшей степени. В фазе *A* имеет место значительный бросок тока и появляется аperiodическая составляющая. Токи обмоток неповрежденных фаз тоже возрастают. Они оказываются одинаковыми по фазе и в сумме близки к значению тока поврежденной фазы.

Проанализированы графики изменения электромагнитного момента и угловой скорости (рисунок 8). Наблюдаются колебания амплитуды мгновенных значений момента при двухфазном замыкании, превышающие его пусковые значения. Видны высокочастотные колебания момента при отключении ветви замыкания. В графиках

угловой скорости также наблюдаются различные изменения формы сигнала. Таким образом, разработанная методика и модели позволяют детально рассматривать несимметричные переходные электромагнитные и электромеханические режимы в базисе фазных координат и с необходимой детализацией.

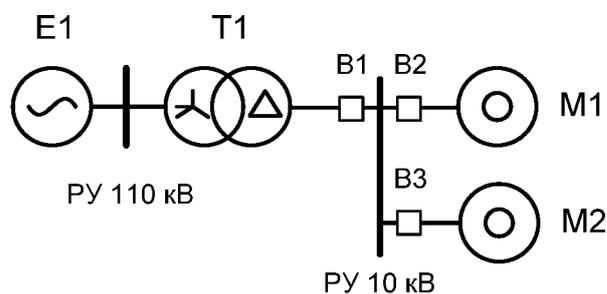


Рисунок 9. Схема узла нагрузки с двумя электродвигателями

Построена модель узла нагрузки с двумя асинхронными двигателями АЗМП-5000, подключенными к одним шинам 10 кВ и питающимися через трансформатор (рисунок 9). Проанализирован 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. подается питание на двигатель М2, включением выключателя В3. Исследованы режим работы узла нагрузки, а также режимы обоих двигателей при совместной работе.

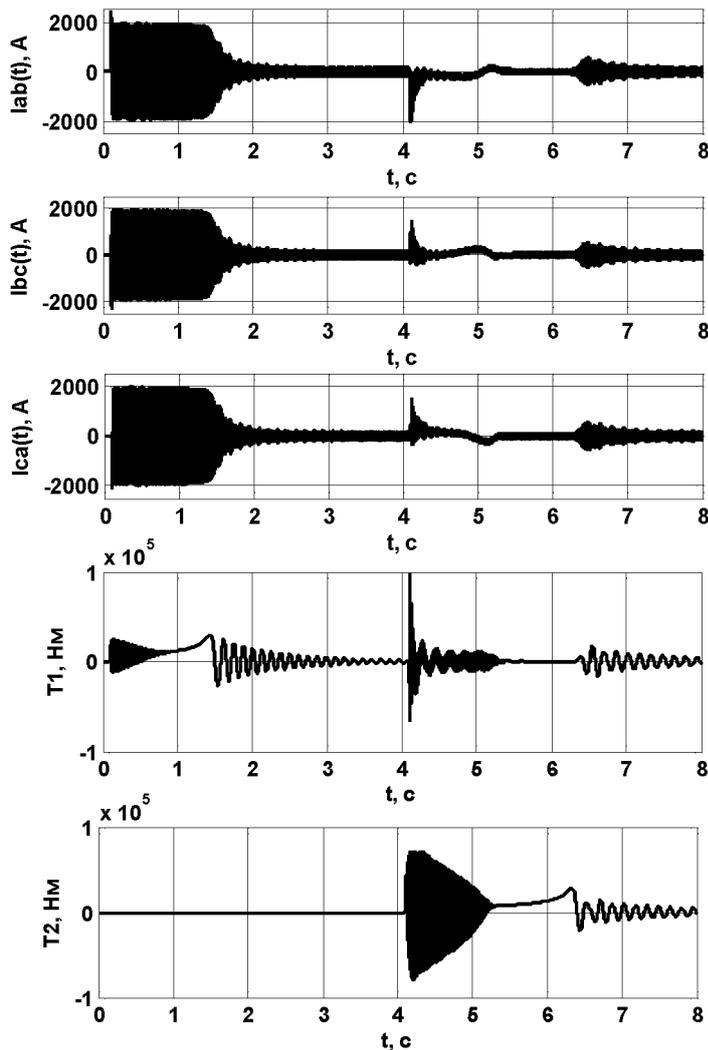


Рисунок 10. Токи статора двигателя М1 и электромагнитные моменты обоих двигателей

электромагнитного момента (рисунок 10).

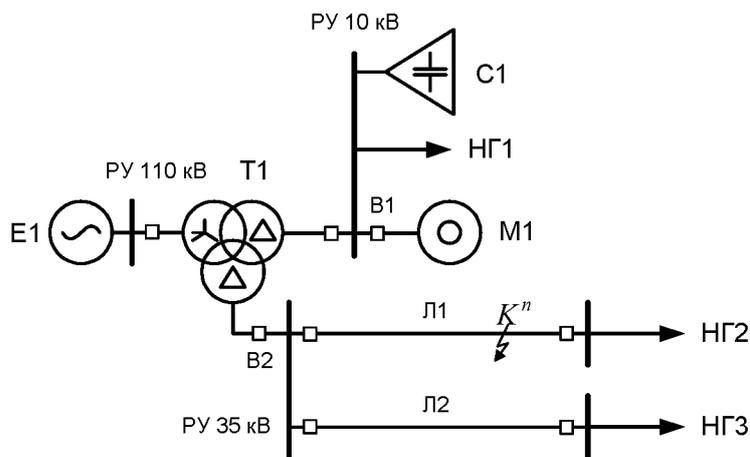


Рисунок 11. Схема узла нагрузки с трехобмоточным трансформатором

трехобмоточным трансформатором рассмотрены на примере узла нагрузки

Особый интерес представляет режим запуска двигателя М2, при работающем двигателе М1. Запуск двигателя М2 характеризуется большей длительностью. В токах статора обоих двигателей наблюдаются апериодические составляющие. По этой картине можно судить о том, что двигатель М1 отдает часть электромагнитной энергии двигателю М2 в момент его включения. Резкое изменение токов статора уже разогнавшегося двигателя М1, работающего в стационарном режиме, вызывает в нем электромеханический переходный процесс, о чем свидетельствуют графики

В работе детально проанализированы режимы одновременного выбега нескольких асинхронных двигателей и их взаимное влияние. Рассмотрено явление синхронного выбега двух двигателей с различной нагрузкой на валу.

Переходные процессы в узле нагрузки с

рисунка 11, питающегося через трехобмоточный трансформатор Т1 (ТДТН-16000/110). В состав узла, со стороны 10 кВ, входит мощный электродвигатель М1, статическая нагрузка НГ1 и батарея конденсаторов С1 для компенсации реактивной мощности. Со стороны 35 кВ к шинам подключены две линии электропередач Л1 и Л2 с нагрузками НГ2 и НГ3 на концах.

Параметры узла следующие: двигатель М1: АЗМП-5000, 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, $U_{1m} = \sqrt{2} \cdot 115$. Параметры модели трансформатора рассчитаны исходя из паспортных данных. Параметры линий электропередач: Л1 – тип провода А-50, тип опор – СВ-110, длина П-схемы в модели -10км, количество П-схем -3; Л2 - тип провода А-50, тип опор – СВ-110, длина П-схемы -50км, количество секций - 1.

Рассмотрено 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. В момент времени 2,3 с. моделируется отключение выключателя В2 на шинах 35 кВ, что приводит к отключению питания линий Л1 и Л2.

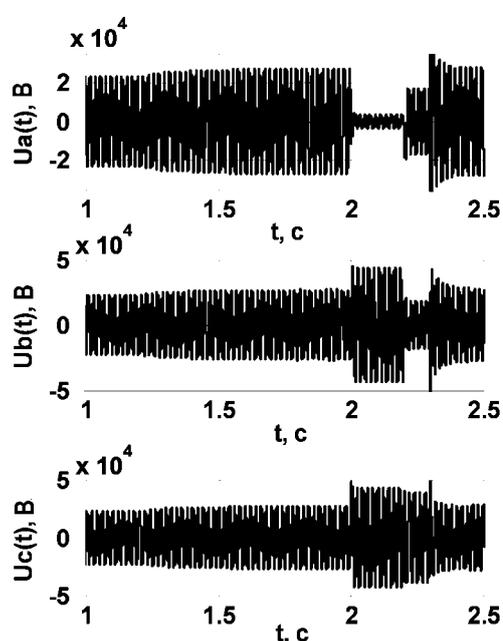


Рисунок 12. Фазные напряжения на шинах 35 кВ

Фазные напряжения 35 кВ показаны на рисунке 12, кроме того для более наглядной иллюстрации переходных процессов на рисунке 13. показаны фазные напряжения на шинах 35 кВ в момент возникновения замыкания фазы А на землю на линии Л1 и электромагнитный момент двигателя М1 во время замыканий и отключения линии Л1.

Из графиков напряжения видно, что составляющая 50 Гц напряжения фазы А снижается в несколько раз, относительно предшествующего режима. Напряжение в неповрежденных фазах увеличивается почти в 1,73 раза. При таком изменении напряжения в фазах,

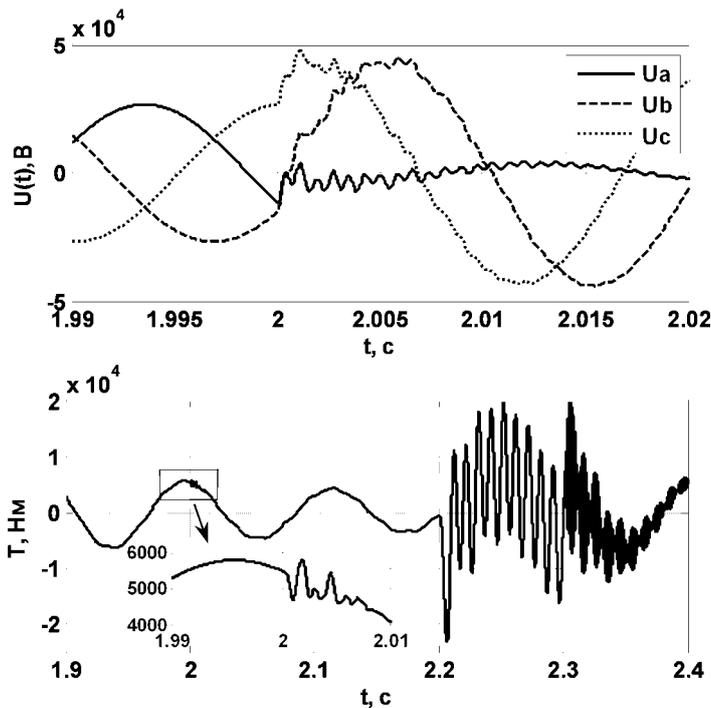


Рисунок 13. Напряжение на шинах 35 кВ и электромагнитный момент двигателя при замыканиях

потенциал поврежденной фазы приближается к потенциалу земли, но линейное напряжение сохраняется номинальным. В месте наблюдения напряжение поврежденной фазы не снижается до нулевого значения, вследствие удаленности места замыкания.

Отмечено наличие высокочастотных колебаний в токах и напряжениях на шинах

10 кВ как в поврежденной, так и в неповрежденных фазах. Эти гармоники проходят на сторону 10 кВ через трансформатор. Влияние высших гармоник, наведенных со стороны среднего напряжения, мало сказывается на работе двигателя М1. В момент времени 2 с на рисунке 13 видны незначительные возмущения электромагнитного момента во время возникновения однофазного замыкания. Эти возмущения вызваны наличием высших гармоник в питающем напряжении. В силу инерционности механических параметров двигателя, такие возмущения не могут существенно повлиять на режим работы двигателя.

Таким образом, показана работа методики и примененных моделей для расчета и анализа несимметричных и каскадных переходных процессов в узлах комплексной нагрузки с нелинейными элементами.

Основные результаты и выводы

1. Методика моделирования цепей через синтетические схемы постоянного тока (алгоритм Г. Доммеля) адаптирована к расчету переходных процессов в СЭС. 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;
- рассматривать не только процессы, происходящие в сложном электротехническом устройстве, но и оценивать их влияние на питающую сеть и другие элементы узла нагрузки;
- задавать форму сигналов источников произвольной формы и частоты и 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;

- представлять результаты моделирования 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 инвертора с ШИМ управлением.

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 учесть внутренние петли гистерезиса, что дает возможность более точно анализировать переходные процессы в узлах комплексной нагрузки.

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

5. Применена модель асинхронного двигателя в фазных координатах, которая в совокупности с алгоритмом Доммеля позволяет:

- моделировать переходные процессы при несимметричных режимах работы двигателя;

- разделить цепи статора и ротора, связанные матрицей индуктивных связей, что позволяет оценить состояние этих цепей в отдельности;

- рассчитывать состояние механических переменных двигателя во времени и отслеживать угловую скорость, электромагнитный момент и скольжение двигателя во время переходных режимов, задавать момент сопротивления на валу двигателя переменным во времени в зависимости от режима работы;

- учитывать эффект вытеснения тока в роторе позволяет более адекватно моделировать пусковые режимы двигателей;

- моделировать режим выбега АД в режиме рекуперации, что дает возможность оценить влияние данного режима на сеть;

6. На основе разработанных подходов и алгоритмов реализовано программное обеспечение, на которое имеется два свидетельства о государственной регистрации.

7. Реализованные методика и программное обеспечение использованы для анализа переходных процессов в комплексных узлах нагрузки с многообмоточными 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 научных трудов по теме диссертации:

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Славутский, А. Л. Оценка динамических характеристик измерительных органов при переходных процессах в энергосистеме / А. Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2012. – №3. – С. 161-165.
2. Славутский, А. Л. Применение алгоритма Доммеля для моделирования цепи с полупроводниковыми элементами и ключами с ШИМ управлением / А. Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2014. – №2. – С. 57-66.
3. Славутский, А. Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов / А. Л. Славутский // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №1. – С. 122-130.
4. 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.

Интеллектуальная собственность:

5. А.с. 2015611053 Рос. Федерация. Программа для расчета переходных процессов в электрических цепях с нелинейными элементами NLETransSim / Славутский А.Л.; правообладатель ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». № 2014662354; заявл. 02.12.2014; рег. 23.01.2015.
6. А.с. 2015616968 Рос. Федерация. Программа для расчета переходных процессов в электрических цепях с нелинейными элементами NLETransSim 1.1 / Славутский А.Л.; правообладатель ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». – № 2015613661; заявл. 05.05.2015; рег. 26.06.2015.

Статьи и материалы в других изданиях:

7. 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.
8. 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.
9. Славутский, А.Л. Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени / Я. В. Законьшек, А. Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №1. – С. 66-74. (авторский вклад - 2,4 с.).
10. Славутский, А.Л. 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 (РЕЛАВЭКСПО-2012): Мат. междунар. науч.-практ. конф. и выст. – Чебоксары, 2012. – С. 43-46. (авторский вклад - 1 с.).
11. Славутский, А.Л. Современные системы защиты автоматизации на многоцепных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения / Я. В. Законьшек, А. Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация энергосистем: сб. докл. XXI конф. – М., 2012. – С. 81-91. (авторский вклад – 3 с.).
 12. 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: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. унт-та, 2012. – Вып. VIII. – С. 167-176.
 13. Славутский, А.Л. Моделирование нестационарных режимов в силовых комплексах с полупроводниковыми элементами / А. Л. Славутский // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (РЕЛАВЭКСПО-2013): мат. II междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2013. – С. 112-114.
 14. Славутский, А.Л. Расчет переходных процессов в цепи с нелинейной индуктивностью / А. Л. Славутский // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2014): мат. IX Всерос. науч.-техн. конф. –Чебоксары, 2014. – С. 257-261.
 15. Славутский, А.Л. Программа расчета переходных процессов в электрических цепях / А. Л. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС -2015): мат. XI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 55-56.
 16. Славутский, А.Л. Моделирование переходных процессов в узле нагрузки с асинхронным двигателем/ А. Л. Славутский // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС -2015): мат. XI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 56-59.

Славутский Александр Леонидович

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 23.03.2016 г. Формат 60×80/16. Печ. л. 1,0.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 267.

Отпечатано с готового оригинала-макета в типографии
ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15