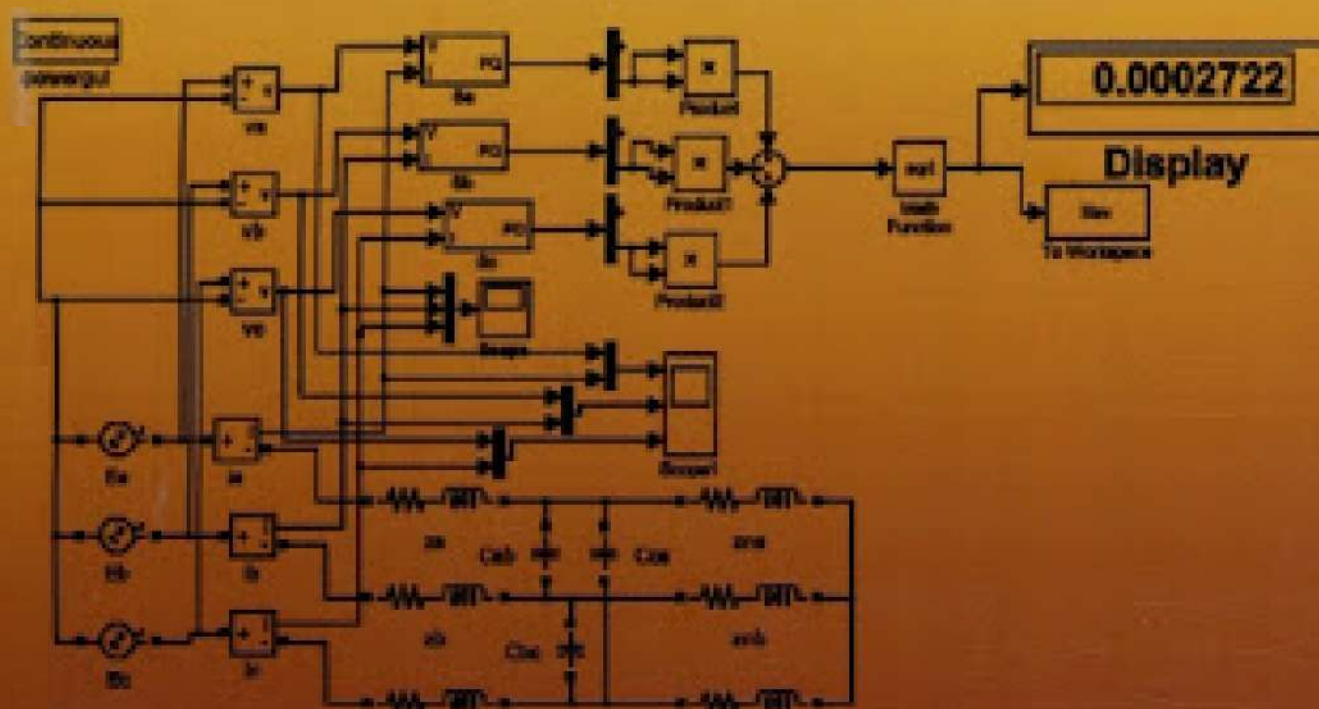


В. Г. ЯГУП Е. В. ЯГУП

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ



В.Г. ЯГУП, Е.В. ЯГУП

ПРИМЕНЕНИЕ
ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ



Монография

Харьков
ХНУГХ им. А. Н. Бекетова
2017

УДК 621.316.001.26:51-7
ББК 31.27в631.0
Я31

Авторы:

Ягуп Валерий Григорьевич, доктор технических наук, профессор;
Ягуп Екатерина Валериевна, кандидат технических наук, доцент

Рецензенты:

Гриб Олег Герасимович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации энергосистем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»;

Лисиченко Николай Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электромеханических систем Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко

*Рекомендовано на заседании Учёного совета
Харьковского национального университета городского хозяйства имени А. Н. Бекетова
протокол № 14 от 31. 08. 2016 г.*

Ягуп В. Г.

Я31 Применение оптимизационных методов для решения задач улучшения показателей электрических систем : монография / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп ; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2017. – 170 с.

ISBN 978-966-695-415-5

Монография посвящена методам решения задач улучшения показателей электрических систем с помощью оптимизационных методов. Предложен системный подход к постановке и решению задач симметрирования и компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения переменного тока. Анализируются процессы в трехпроводных и четырехпроводных трехфазных системах. Применяются современные математические методы и компьютерные пакеты для решения указанных задач. Рассматриваются способы симметрирования и компенсации реактивной мощности с помощью реактивных симметри-компенсирующих устройств, а также с применением силовых активных фильтров. Предложенные методы проверены на тестовых задачах с помощью компьютерных моделей, что показало их высокую точность, универсальность и простоту реализации.

Монография предназначена научным работникам и специалистам в области электроснабжения и электропотребления, а также может быть полезна студентам, магистрантам и аспирантам электротехнического и электроэнергетического профиля, и всем специалистам, которые интересуются проблемами улучшения показателей электрических систем.

УДК 621.316.001.26:51-7
ББК 31.27в631.0

ISBN 978-966-695-415-5

© В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп, 2017
© ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОБЛЕМЫ.....	7
1.1 Проблемы качества электрической энергии.....	7
1.2 Показатели качества электрической энергии.....	10
1.3 Проблемы анализа и синтеза устройств для симметрирования и компенсации реактивной мощности.....	15
2 СУЩНОСТЬ МЕТОДА ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	18
2.1 Математическая сущность метода поисковой оптимизации.....	18
2.2 Выбор параметров и критериев оптимизации.....	19
2.3 Методы реализации моделей систем электроснабжения.....	22
2.4 Методы и программные средства для оптимизации режимов работы систем электроснабжения.....	26
2.5 Пример реализации метода поисковой оптимизации.....	32
3 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕЗ НУЛЕВОГО ПРОВОДА.....	40
3.1 Эквивалентная расчетная схема и уравнения трехфазной трехпроводной системы электроснабжения.....	40
3.2 Исследование несимметричного режима.....	42
3.3 Расчет параметров компенсирующего устройства и симметричного режима....	45
3.4 Аналитический расчет емкостей симметрирующих конденсаторов.....	49
3.5 Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности с использованием SPS-модели и поисковой оптимизации.....	52
3.6 Расчет параметров симметро-компенсирующего устройства методом эквивалентирования нагрузки.....	57
3.7 Оптимизация режима несимметричной трехфазной системы на модели с помощью фильтров симметричных составляющих.....	62
3.8 Расчет симметрирующего устройства трехфазной системы путём оптимизации по критерию выравнивания питающих токов.....	66
4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ.....	72
4.1 Определение режима компенсации реактивной мощности с помощью sps-модели и поисковой оптимизации.....	72
4.2 Определение режима компенсации реактивной мощности при освобождении параметров оптимизации.....	77
4.3 Определение режима компенсации реактивной мощности при декомпозиции системы электроснабжения.....	82
5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ИНДУКТИВНЫМИ СВЯЗЯМИ.....	95
5.1 Определение параметров моделей трансформаторов.....	95
5.2 Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности сети электроснабжения с трансформатором на визуальной модели.....	106
5.3 Компенсация реактивной мощности в тяговой системе переменного тока.....	113

6	ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ НЕЛИНЕЙНЫЕ И ВРАЩАЮЩИЕСЯ ЭЛЕМЕНТЫ.....	121
6.1	Оптимизация режима системы электроснабжения с дуговым разрядом.....	121
6.2	Разработка компьютерной модели для разрядной лампы высокого давления и оптимизация режима электропитания лампы.....	129
6.3	Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения асинхронного двигателя.....	136
6.4	Оптимизация режима питания асинхронного двигателя в условиях асимметрии системы электроснабжения.....	139
7	СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СИЛОВЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	142
7.1	Оптимизация процессов в тиристорном компенсаторе реактивной мощности..	142
7.2	Моделирование системы электроснабжения с активным фильтром, управляемым по оптимизационному алгоритму.....	145
7.3	Активный фильтр для трехфазной электрической системы с несимметричной нагрузкой и управлением по оптимизационному алгоритму.....	153
7.4	Электропитание асинхронного двигателя в системе с силовым активным фильтром, управляемым по оптимизационному алгоритму.....	159
	СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	165

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия представляет собой наиболее универсальный и целесообразный вид энергии, удобный для генерации, преобразования, передачи на расстояние и питания потребителей самой различной физической природы. Эра электрификации всех сфер деятельности человечества, начавшаяся в конце XIX века, характеризуется ускорением развития производительных сил человечества, повышения уровня благосостояния людей, расцветом наук и искусств. Изобретение и внедрение полупроводниковых приборов в середине прошлого века открыло широкие возможности для создания новых силовых преобразовательных установок, а также интеллектуальных систем управления на основе микроконтроллеров. Все это открыло новые перспективы для развития электрических комплексов и систем, особенно если учесть, что за последние два десятилетия достигнуты значительные успехи в области разработки средств вычислительной техники и программного обеспечения.

В связи с расширением номенклатуры потребителей электрической энергии всё более актуальной становится проблема электромагнитной совместимости в электрических системах. Особенности потребления электрической энергии обуславливаются как параметрами и характеристиками самих потребителей, так и взаимным расположением и влиянием друг на друга частей системы электроснабжения. Взаимное влияние особенно интенсивно проявляется в электрических системах, где источники питания имеют конечную мощность, ограничиваемую как собственным внутренним импедансом генератора электрической энергии, так и сопротивлениями линий передачи электроэнергии. Следует подчеркнуть относительность определения сети как такой, что имеет бесконечную мощность, поскольку она принимается условно, в зависимости от уровней потребления электроэнергии нагрузками. Строго говоря, любая электрическая сеть имеет ограниченную мощность. Поэтому эффекты влияния потребителей друг на друга имеют место в любой реальной энергетической системе.

Существенными явлениями при исследованиях электромагнитной совместимости в электрических системах являются несимметрия и несинусоидальность токов и напряжений в системе, а также уровни реактивной мощности, присутствующие в системе. Предельные величины, связанные и несинусоидальностью, задаются нормативными документами. Однако контроль реальных значений на практике осуществляется недостаточно. Отсутствие четких законодательных актов, обязывающих потребителей и поставщиков электроэнергии заботиться о соблюдении культуры совместной работы в системе электроснабжения, способствуют безнаказанному нарушению режимов работы. Все это значительно искажает процессы, происходящие в электрических сетях, что непосредственно сказывается и на потребителях.

Ряд потребителей априори рассчитывают на такие режимы, которые безусловно будут вносить искажения в систему. Значительная несимметрия и несинусоидальность вносятся в электрические сети сельскохозяйственными потребителями, электротранспортом, сварочным оборудованием, электродуговыми печами и т. п. В большинстве случаев какие-либо меры по предотвращению этих негативных явлений в электрических системах не предпринимаются. Такое положение сложилось не только вследствие отсутствия должного контроля и надзора. Введение симметрокомпенсирующего оборудования связано с дополнительными капитальными затратами, срок окупаемости которых исчисляется десятками месяцев и годами. Это оборудование требует также дополнительных затрат, связанных с его обслуживанием. В связи с переменным характером нагрузок необходима дополнительная настройка параметров этого оборудования, что предусматривает мониторинг и разработку систем автоматического контроля и управления.

Бурное развитие силовой полупроводниковой техники открыло новые возможности по решению задач улучшения параметров электрической энергии, характеризующих её качество. Аппаратные и программные средства вычислительной техники предоставляют широкие возможности для совершенствования методов анализа и синтеза устройств симметрирования, компенсации реактивной мощности и борьбы с высшими гармониками в системах электроснабжения. Огромное номенклатура микроконтроллеров, появившихся в последнее десятилетие, обеспечивает широкие возможности реализации самых сложных систем управления устройствами для повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения и электропотребления.

Предлагаемая вниманию читателя монография посвящена разработке новых методов анализа электромагнитных процессов и синтеза устройств симметрирования и компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения. Разработанные методы основаны на широком применении компьютерных методов и моделей с использованием оптимизационных методов, что позволяет производить постановку задач в обобщенном виде и решать их с высокой точностью.

1 КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОБЛЕМЫ

1.1 ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Основным средством электроснабжения являются трехфазные электрические системы, питаемые от трехфазных синхронных генераторов большой мощности, устанавливаемых на электростанциях. Синхронные генераторы приводятся во вращение в основном паровыми турбинами, преобразующими тепловую энергию топлива в механическое вращательное движение вала турбины при относительно невысоком коэффициенте полезного действия. От синхронного генератора электрическая энергия поступает к электрическим потребителям через линии электропередачи, образующие электрические сети. Потребители электроэнергии осуществляют преобразование электрической энергии в другие виды энергии – механическую, тепловую, световую и т. п. Таким образом, исходя из системного подхода, следует отметить, что эффективность генерации – передачи – потребления электроэнергии определяется эффективностью работы каждого звена электроэнергетической системы. Особое место в этой системе занимают линии электропередачи. Представляя собою, казалось бы, наименее сложную часть системы, они, в то же время, влияют на потери электроэнергии. Борьба с этими потерями традиционно представляет собой одну из основных задач электроэнергетики. Успешное решение этой задачи в конечном счете может привести к существенной экономии энергоресурсов, исчисляемой миллионными показателями экономического эффекта в масштабах страны.

Концептуально оправдано считать линией электропередачи всю систему, расположенную между зажимами источников синусоидальных напряжений (то есть выходными зажимами трехфазного синхронного генератора) и зажимами, к которым присоединяется электропотребитель (нагрузка). В действительности на этом участке имеются не только провода в виде воздушных или кабельных линий электропередачи, но и различные устройства преобразования электрической энергии, включая силовые трансформаторы и полупроводниковые преобразователи параметров электрической энергии в виде выпрямительных и инверторных полупроводниковых агрегатов. Как правило, при проектировании электрических сетей учитываются в основном силовые трансформаторы. Учет их осуществляется, например, введением комплексных сопротивлений, отображающих потери рассеивания, и источников мощности, соответствующих потерям на намагничивание сердечника трансформатора. Проводники представляются активно-индуктивными сопротивлениями в зависимости от типа провода или кабеля, а также расстояния, на которое эти проводники передают электрическую энергию. При проектировании потери в линиях электропередачи определяются токами, протекающими через

активные сопротивления схем замещения указанных элементов, поэтому вопрос о снижении потерь в сетях, по сути, состоит в снижении уровней токов, протекающих в этих сетях.

Какие же факторы приводят к неоправданному увеличению потерь в сетях при заданных уровнях токов, потребляемых нагрузками? Эти факторы связаны в значительной мере с реактивной мощностью в системе и несимметрией в потреблении электрической энергии трехфазных систем электроснабжения.

Теория реактивной мощности в течение сотни лет непрерывно подвергалась тщательному анализу и развитию. В этих вопросах значителен вклад таких ученых, как С. Фризе, Д. Е. Миллер, К. Будеану, О. А. Маевский, Е. Г. Пухов, К. С. Демирчан, И. М. Чиженко, А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, Б. П. Борисов, И. В. Мостовяк, И. В. Жежеленко, О. Г. Гриб, Ю. А. Сиротин, Ю. Л. Саенко, Н. А. Мельников, В. А. Веников, Ю. С. Железко, В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, В. Я. Жуйков, С. П. Денисюк, В. А. Новский, И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, В. У. Кизилов, А. Ф. Крогерис, Х. Акаги, Ф. З. Пен, А. К. Чарнецки, Л. Мадьяр [7; 8; 11 – 36]. Часть работ указанных авторов посвящены поискам истолкования физической сущности реактивной мощности, природы её появления в связи с генерацией в систему высших гармоник из-за нелинейных элементов. Другая часть работ стремится использовать предлагаемые теории для упрощения методов аппаратного определения параметров, характеризующих реактивную мощность, с целью проектирования систем управления компенсирующими устройствами, в том числе силовыми активными фильтрами. Можно руководствоваться фундаментальным соотношением, определяющим полную мощность в системе как геометрическую сумму активной мощности P и составляющих реактивной мощности сдвига Q , несимметрии N и искажений D :

$$S = (P^2 + Q^2 + N^2 + D^2)^{0,5}.$$

Активная мощность P затрачивается на выполнение полезной работы в нагрузках, а также на покрытие неизбежных тепловых потерь в элементах оборудования системы электроснабжения.

Мощность сдвига Q определяется реактивным характером токов нагрузки и других элементов системы электроснабжения. Для различных потребителей доля реактивной мощности оценивается усредненными показателями. На асинхронные двигатели приходится около 40 % всей реактивной мощности энергосистем, на силовые трансформаторы – до 35 %, полупроводниковые преобразователи – 10 %, электрические печи – 8 %, линии электропередач – 7 %. Следует учитывать, что доля реактивной мощности основных ее потребителей – асинхронных двигателей и силовых трансформаторов – может существенно возрасти при работе их в недогруженных режимах.

Мощность несимметрии N обусловлена различного рода нарушениями симметричных режимов трехфазных систем электроснабжения, которые

изначально рассчитывались и продолжают проектироваться в расчете на симметричные режимы потребления электроэнергии. Однако реальные потребители могут создавать несимметричные режимы, что связано, например, с подключением однофазных и двухплечевых нагрузок [14]. Несимметрия присутствует в сетях электроснабжения сельскохозяйственных нагрузок, коммунальных систем электроснабжения, при подключении мощных сталеплавильных и сварочных агрегатов. Наличие несимметрии приводит к неравномерной загрузке фаз, перекосам напряжения на потребителе, к повышению потерь и снижению продуктивности работы потребителей. При четырехпроводной системе трехфазного электроснабжения появляется дополнительная проблема, вызванная несимметричными режимами электропотребления и состоящая в перегрузке нейтрального четвертого провода. При симметричных режимах ток в нейтральном проводе отсутствует. Несимметрия приводит к возрастанию тока, который поступает через нейтральный провод, и этот ток может достичь недопустимо больших величин, результатом чего может стать аварийным режим отгорания нейтрали. При этом перекося напряжений на нагрузках существенно возрастает, что может привести к выходу из строя электрооборудования, подключенного в этой системе и рассчитанного на некоторые предельно допустимые амплитуды питающего напряжения.

Реактивная мощность искажений D связана с несоответствием токов и напряжений синусоидальной форме. С математической точки зрения это явление может трактоваться как появление высших гармоник в спектрах токов и напряжений. Гармоники тока и напряжения определяют мощности на соответствующих частотах. Поскольку теоретически гармонический ряд состоит из бесконечного числа его членов, то непосредственное вычисление результирующей мощности всех высших гармоник трудновыполнимо, поэтому чаще эта мощность может быть вычислена на основе фундаментального соотношения после того, как определены все остальные составляющие этой формулы. Появление высших гармоник обусловлено режимами работы нелинейных элементов. Так насыщение магнитных систем трансформаторов и асинхронных двигателей приводит к появлению высших гармоник в токах питающих линий электропередач. Соответствующие составляющие будут сопровождаться падением напряжений на линиях электропередачи, а следовательно, и напряжений на зажимах нагрузок, характеризующихся нелинейными свойствами. Мощными генераторами высших гармоник служат полупроводниковые выпрямители [5; 12]. В предельном случае идеально сглаженного тока нагрузки полупроводникового выпрямителя в первичные обмотки питающего трансформатора индуцируют токи, состоящие из прямоугольных фрагментов. Разложение в тригонометрический ряд подобных кривых токов свидетельствует о наличии так называемых канонических гармоник, частота которых определяется пульсностью выпрямителя. Реальные выпрямители работают в условиях несимметрии сети и систем управления (в случае управляемых выпрямителей), вследствие чего также появляются неканонические

гармоники с отличающимися от канонических частотами. Кроме того, в результате взаимодействия могут появиться так называемые интергармоники. Все это создает достаточно сложную картину электромагнитного окружения реальных систем электроснабжения. Высшие гармоники могут представлять значительную опасность не только как поставщики дополнительной мощности искажений, но и как источники различного рода помех, могущих влиять на условия электросвязи и забивание радиочастотного диапазона дополнительными устойчивыми помехами. Практика показывает, что борьба с высшими гармониками с помощью пассивных фильтров часто недостаточна и малоэффективна. Такие фильтры требуют точной настройки и не могут охватить весь потребный диапазон высших гармоник [5]. В последние годы разработаны эффективные средства борьбы с высшими гармониками в виде силовых активных фильтров [9; 10; 25; 26; 28; 54 - 57], которые, по сути, являются адаптивными системами, подавляющими практически весь спектр наиболее существенных высших гармоник.

1.2 ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Государственные стандарты [1 - 4] напрямую не ссылаются на понятия реактивной мощности, однако нормируют величины, связанные с ней. Так, для случая линейных нагрузок, питаемых синусоидальными токами и напряжениями, используется понятие коэффициента мощности ($\cos \varphi$), численно отражающего долю активной мощности в полной комплексной (кажущейся) мощности. Работа оборудования с низким коэффициентом мощности является крайне нежелательной, и поэтому решение проблемы повышения коэффициента мощности в сущности направлено на снижение уровней реактивной мощности [11]. В силовой электронике как один из основных энергетических показателей используется коэффициент мощности, учитывающий высшие гармоники, которые непременно сопровождают работу преобразовательных установок [12]. В этом случае коэффициент мощности определяется как произведение коэффициента $\cos \varphi$ сдвига основной гармоники тока относительно напряжения и коэффициента искажений, определяемого соотношением действующего значения высших гармоник и действующего значения полного тока, то есть, в знаменателе учитывается ток основной гармоники. Однако значение коэффициента мощности в государственных стандартах не нормируется, хотя очевидно, что оно должно быть как можно ближе к единице.

Показатели несимметричного режима определяются путем применения теории симметричных составляющих для выражения несимметричных токов и напряжений [23; 32]. Для трехпроводной трехфазной несимметричной системы электроснабжения степень несимметрии оценивается по соотношению амплитудного или действующего значения обратной последовательности и прямой последовательности тока или напряжения. ГОСТ 13109-97 [1] нормирует коэффициент несимметрии напряжений по

обратной последовательности в пределах 2–4% (нормально и предельно допустимые значения в точках общего присоединения). В случае использования четырехпроводной системы трехфазного электроснабжения оценку несимметрии по обратной последовательности, следует дополнить коэффициентом несимметрии по нулевой последовательности, который определяется соотношением величины нулевой последовательности и величины прямой последовательности. Для низковольтных четырехпроводных сетей с напряжением 0,38 кВ коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности (он еще называется коэффициентом неуравновешенности) также нормируется ГОСТом 13109-97 в пределах 2–4%. Для вычисления напряжений прямой и обратной последовательностей в тексте ГОСТ 13109-97 приведены следующие достаточно громоздкие формулы (Б.1) и (Б.18) соответственно (по нумерации [1]), позволяющие вычислить указанные величины по действующим значениям междупазных напряжений:

$$U_{1(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} + \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]} \quad (\text{Б.1})$$

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]} \quad (\text{Б.18})$$

Формула (Б.23) [1] для вычисления напряжения нулевой последовательности имеет еще более громоздкий вид:

$$U_{0(1)i} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} - 3 \cdot \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2 + \left[\sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i} - \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} - \right.} \\ \left. - 3 \sqrt{4U_{B(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i} - \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} \right]^2}. \quad (\text{Б.23})$$

Поскольку напряжение прямой последовательности довольно близко к номинальному напряжению, то в некоторых случаях при определении коэффициентов несимметрии и неуравновешенности его можно заменить в знаменателе номинальным напряжением.

Синхронные генераторы, вырабатывающие электроэнергию, весьма чувствительны к проявлениям несимметричного режима в питаемых ими электропотребителях. Из-за несимметрии в обмотках статора появляются гармоники тока прямой и обратной последовательности нечетного спектра, а в обмотке ротора – аналогичные гармоники четного спектра [5; 16; 18; 64],

что приводит к дополнительному нагреванию обмоток статора и ротора. Кроме того, несимметричные фазные токи создают не круговое, а эллиптическое магнитное поле с пространственно-неподвижными центрами, которое вызывает вибрацию в конструкции генератора. Токи обратной последовательности вызывают нестабильность активной мощности вследствие механического перенапряжения вала турбогенератора и соединительной муфты. ГОСТ 183-74 регламентирует длительную работу трехфазных генераторов при условии, что разность токов в фазах не превышает 10 % от номинального тока фазы. В действительности при такой предельно допустимой разности фазных токов допускается ток обратной последовательности не более 6 – 7 % от номинального значения тока. В асинхронных двигателях даже относительно небольшая асимметрия напряжения в 1% приводит к появлению значительной несимметрии токов в обмотках, которая может достигать величин 7 – 9 %. При несимметрии напряжений на зажимах асинхронного двигателя в 3,5 % температура обмоток увеличивается на 25 %. Известно, что уменьшение полезного вращающего момента асинхронного двигателя в первом приближении определяется квадратом коэффициента несимметрии. При несимметрии напряжения в 4 % срок службы асинхронных двигателей сокращается вдвое. Если же при этом уровень напряжения прямой последовательности повышен, то располагаемая мощность двигателей снижается вдвое.

В трансформаторах несимметрия напряжений на первичных обмотках вызывает несимметрию и неуравновешенность напряжений на вторичных обмотках, что проявляется при соединении обмоток по схеме «звезда – звезда с нулем». Перегрев изоляции на 8 % уменьшает срок ее службы вдвое. При несимметрии, если наиболее нагруженная фаза потребляет номинальный ток, пропускная способность трансформатора уменьшается на 42 % по сравнению с мощностью эквивалентной однофазной нагрузки. В особенных условиях в этом отношении работают тяговые трансформаторы, питающие электротранспорт на железных дорогах с питанием переменным током [39]. Здесь одна из фаз вторичных обмоток, соединенных треугольником, подсоединяется к рельсам, а два других узла треугольника передают напряжение на линии питания электропоездов. Несмотря на чередование фаз в группах трансформаторов [40, 41], они работают в резко несимметричном режиме. Эта несимметрия трансформируется в обмотки тяговых трансформаторов, используемых для питания инфраструктуры участков железной дороги. Несимметрия напряжений пагубно влияет на осветительные приборы. В ряде работ показано, что при увеличении напряжения на 5 % световой поток ламп накаливания увеличивается на 20 %, а срок службы уменьшается вдвое. При уменьшении напряжения на 5 % поток ламп накаливания уменьшается на 18 %, в то время как в работе люминесцентных ламп наблюдается неустойчивость.

Таким образом, несимметрия и неуравновешенность в трехфазных системах электроснабжения представляет собой существенную проблему, приводящую к значительным колебаниям напряжений, что связано как с

перетеканием реактивной мощности, так и с наличием токов и напряжений высших гармоник.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, согласно ГОСТ 13109-97, определяется формулой (1.1):

$$K_{Ui} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}{U_{(1)i}^2}} \cdot 100. \quad (1.1)$$

В числителе содержится корень из суммы квадратов амплитуд высших гармоник от второй до сороковой, а в знаменателе – амплитуда первой основной гармоники.

Зарубежные стандарты используют, по сути, эквивалентную формулу:

$$K_{НИ} = \sqrt{\frac{V_{rms}^2 - V_{1(rms)}^2}{V_{1(rms)}^2}} \quad (1.2)$$

где V_{rms} – среднеквадратичное значение всего напряжения (тока),

$V_{1(rms)}$ – среднеквадратичное значение его первой гармоники.

Зарубежный стандарт IEEE519-1992 дает рекомендации по конструированию фильтров для подавления высших гармоник. Основные требования по уровням высших гармоник приводятся в двух таблицах. В первой таблице – максимальные напряжения гармоник в процентах от номинального напряжения питания для нагрузок, подключенных к точке общего присоединения в зависимости от характера нагрузки. При этом характер нагрузки отображается соотношением максимального тока сети (тока короткого замыкания в точке общего присоединения) к току потребления. С увеличением этого соотношения от 10 до 1000 максимально допустимое напряжение высших гармоник снижается соответственно от 2,5–3% до 0,05–0,1% (см. табл.1.1).

Таблица 1.1 – Максимальные напряжения гармоник от номинального напряжения питания для нагрузок

I_{sc}/I_L	Максимальное напряжение отдельной гармоники [%]	Примечание
10	2.5...3.0	Узкоспециализированные системы
20	2.0...2.5	1...2 крупных потребителя
50	1.0...1.0	Несколько сравнительно больших потребителей
100	0.5...1.0	5...20 потребителей среднего масштаба
1000	0.05...0.1	Множество мелких потребителей

Таблица 1.2 – Пределы на токи гармоник

I_{SC}/I_L	Порядок гармоник					Общий коэффициент нелинейных искажений по току
	$k < 11$	$11 \leq k < 17$	$17 \leq k < 23$	$23 \leq k < 35$	$35 \leq k$	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	30.0

Примечание. Все электрогенераторные установки должны отвечать требованиям, приведенным в этой строке независимо от значений их I_{SC}/I_L .

В таблице 1.2 устанавливаются пределы на токи гармоник, достигающих точек общего присоединения в зависимости от характера нагрузок, определяемых способом, указанным выше. Ток гармоники составляет разницу между током преобразователя напряжения, поставляющего энергию в нагрузку, и током фильтра, подавляющего гармонику напряжения. Как видно из таблицы, для небольших нагрузок (отношение токов более 1000) токи гармоник с номерами до десяти включительно должны составлять менее 15% от тока нагрузки, при этом общий коэффициент нелинейных искажений по току не должен превышать 12%.

На железнодорожном транспорте, где питание линий электроснабжения составляет постоянное напряжение 3,3 кВ, от тяговых подстанций с многофазными (шести- или двенадцатипульсными) выпрямителями вводится еще один показатель – так называемое психофизическое напряжение. Оно определяется из соображений, что высшие гармоники не должны оказывать мешающее воздействие на системы телефонной связи между службами железной дороги. Линии связи протянуты вдоль рельсового пути, и наводки от силового контура питания электровазов могут смешиваться с полезным сигналом систем связи. Это так называемое мешающее напряжение учитывает не только амплитуду каждой заданной гармоники, но и показатели воздействия отдельной гармоники на слуховой аппарат человека в зависимости от частоты. Мешающее напряжение высших гармоник ограничивается стандартами и отраслевыми документами на уровне 4 В.

Несмотря на относительно небольшую мощность, которая может быть вычислена математически по взаимодействию одноименных гармоник тока и напряжения, высшие гармоники могут приводить к отрицательным явлениям и даже к выходу из строя оборудования. Это вытекает из того обстоятельства, что гармоники с высшими частотами, несмотря на их небольшие амплитуды обладают свойствами интенсивно разогревать сердечники магнитных систем трансформаторов и двигателей, а также изоляцию электротехнических устройств. Вследствие перегрева изоляция

подвергается ускоренному старению и выходит из строя, что, в свою очередь, может привести к таким тяжелым аварийным режимам, как различного рода короткие замыкания.

Таким образом, реактивная мощность, обусловленная индуктивным характером и несимметрией нагрузок, а также высшие гармоники токов и напряжений, представляют собой негативные явления, ухудшающие технические и экономические показатели работы систем трехфазного электроснабжения.

1.3 ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИММЕТРИРОВАНИЯ И КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В электроэнергетике задача компенсации традиционно обуславливается необходимостью обеспечения необходимых уровней напряжения на зажимах потребителей. Типовая задача компенсации реактивной мощности долгие годы решается путем установки симметричных батарей конденсаторов, предназначенных для уменьшения уровней реактивной мощности до некоторой заданной, относительно малой величины [11; 16; 30; 31; 35; 36]. Приблизительный характер решения этой задачи обусловлен, с одной стороны, дискретностью величин емкостей батарей конденсаторов, в то время как характер потребления электроэнергии непрерывно изменяется в течение суток и не всегда может быть точно предсказан. Отрасль по производству конденсаторов уделяет должное внимание проблеме компенсации реактивной мощности и обеспечивает электроэнергетические системы широкой номенклатурой компенсирующих (косинусных) конденсаторов. С целью недопущения перекомпенсации приходится следить за суточными графиками изменения нагрузок в данном узле потребления и в соответствии с усредненными показателями переключать секции батарей конденсаторов. Эти графики также являются приблизительными, а компенсация - неполной.

Усовершенствование компенсации с помощью батарей конденсаторов осуществляется путем введения тиристорно-индуктивных элементов [37; 38]. Они позволяют путем регулирования угла отпирания встречно-параллельно включенных тиристорov регулировать долю реактивной мощности индуктивного характера, которую отдает каждая индуктивность. Таким образом, проблема дискретности в компенсации реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов может быть решена, хотя нельзя не отметить, что токи индуктивностей становятся несинусоидальными и содержат высшие гармоники.

При коммутациях конденсаторов актуальной является также проблема включения секций батарей конденсаторов на напряжение сети. В общем случае напряжение на конденсаторе может иметь любую величину. Включение конденсатора на напряжение сети, отличающееся от напряжения

на конденсаторе, приводит к протеканию через конденсатор сверхтоков. В таких условиях сроки службы конденсаторов существенно сокращаются.

Оптимальным с точки зрения уменьшения амплитуд переходных токов является момент времени, когда напряжения конденсатора и сети оказываются равными. Ясно, что механические коммутаторы не могут обеспечить высокую точность желаемого момента коммутации из-за инерционности механической системы. Наиболее приемлемым в этом отношении представляется применение встречно-параллельно соединенных тиристоров в качестве коммутаторов косинусных конденсаторов. Получаемые таким образом системы тиристорно-конденсаторных блоков могут также применяться для компенсации реактивной мощности. Иногда последовательно с конденсаторами для ограничения амплитуд переходных токов включаются небольшие индуктивности.

Если обеспечена бестоковая коммутация конденсаторов, то с помощью батарей конденсаторов легко может быть реализовано симметрирование питающих токов при несимметричных нагрузках. Тем самым достигается не только компенсация реактивной мощности сдвига, но и реактивной мощности несимметрии. В этих случаях по фазам должны включаться батареи конденсаторов с различной ёмкостью. Определение параметров симметрирующего устройства составляет сущность задач анализа несимметричных режимов трехфазных систем электроснабжения, синтеза структуры и параметров симметрирующих и компенсирующих устройств.

Большой вклад в решение этой задачи внесли такие ученые, как Р. Штейнметц [6], А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, Б. П. Борисов, А. Д. Музыченко, В. Г. Новский [13 - 18], В. А. Веников [36]. Развитие теории расчета и проектирования систем электроснабжения с симметро-компенсирующими устройствами в приведенных работах осуществлялось на основе фундаментальных законов электротехники с привлечением матричных, топологических и топографических методов. Основополагающую роль в таких расчетах играет метод симметричных составляющих. Применение аналитических методов для решения указанных задач затрудняется тем обстоятельством, что при анализе режимов неизвестными являются не только величины токов и напряжений в системе, но и параметры симметро-компенсирующего устройства. В связи с этим при решении задачи применяются упрощающие допущения. Например, пренебрегают влиянием потерь электрической энергии на элементах линии передачи и считают, что на зажимах нагрузки и симметро-компенсирующего устройства действуют напряжения источника питающего напряжения. Вследствие этого возникает погрешность в расчетах параметров симметро-компенсирующего устройства, в зависимости от конкретных параметров системы электроснабжения эти погрешности могут составлять ощутимые величины. Кроме того, при синтезе структуры симметро-компенсирующего устройства важным моментом является определение типов реактивных элементов, которые необходимо включить в это устройство. Особенно сложной оказывается эта задача при рассмотрении четырехпроводных систем

электроснабжения, где количество реактивных элементов в симметро-компенсирующем устройстве достигает пяти. В ряде работ для решения этой задачи приводятся графические методы, основанные на рассмотрении различного рода диаграмм [14; 15; 32]. При этом в зависимости от расположения векторов обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений должны применяться различные формулы для определения типов и параметров элементов симметро-компенсирующего устройства.

В то же время в последнее десятилетие интенсивно внедряются средства вычислительной техники и их программного обеспечения в виде пакетов компьютерной математики. Наиболее распространенными являются программные пакеты MS Excel, MathCAD, MATLAB. Они оснащены мощным программным обеспечением, позволяющим с помощью численных методов решать поставленные задачи, в том числе и нелинейные. Таким образом, естественными представляются попытки применить указанные средства для решения задач анализа несимметричных режимов в трехфазных системах электроснабжения и синтеза структур, а также параметров симметро-компенсирующих устройств.

2 СУЩНОСТЬ МЕТОДА ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ МЕТОДА ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Электромагнитные процессы в электротехнических системах описываются системами уравнений на основе законов, отражающих топологическую структуру системы и поведение образующих ее элементов. Соответственно эти уравнения называются топологическими и компонентными, они образуют полную систему уравнений, описывающих процессы в электрической системе. При решении задачи анализа заданными являются параметры и характеристики всех элементов системы, а также все параметры источников энергии, воздействующих на саму систему. Искомыми неизвестными при анализе считаются токи и напряжения на элементах электрической системы. В случае линейной электрической системы для установившегося режима система уравнений может быть представлена в матричном виде:

$$AX = Q,$$

где X – вектор неизвестных токов и напряжений в электрической системе;

A – квадратная матрица коэффициентов при искомых переменных;

Q – вектор задающих величин источников электрической энергии, воздействующих на электрическую систему.

Решение такой системы не вызывает принципиальных затруднений и осуществляется с помощью хорошо известных методов путем применения обратной матрицы A^{-1} или осуществления итерационных приближений по сходящейся вычислительной схеме вплоть до достижения необходимой точности.

Если обозначить $F(X) = AX - Q$, то полная система уравнений, описывающих процессы в электрической системе может быть представлена в таком виде:

$$F(X) = 0.$$

$F(X)$ может трактоваться как невязка, которая стремится стать равной нулю по достижении решения. Сведение невязки к нулю может осуществляться с помощью квазиньютоновских численных методов, которые, по сути, представляют собой оптимизационные методы [58]. В этом случае сама невязка является целевой функцией, а переменные параметры оптимизации представлены вектором искомых неизвестных токов и напряжений электрической системы.

В случае анализа несимметричной трехфазной системы электроснабжения с симметро-компенсирующим устройством к числу неизвестных в уравнении с нулевой правой частью добавляется вектор P ,

представляющий параметры симметрично-компенсирующего устройства:

$$F(X, P) = 0.$$

При этом, как уже указывалось ранее, переменные обоих векторов связываются операциями умножения благодаря компонентным уравнениям элементов электрической системы. В таком случае система уравнений, описывающих систему электроснабжения с несимметричной нагрузкой и симметрично-компенсирующим устройством, теряет свойство линейности и может быть решена приближенными численными методами с заданной точностью. Такая задача анализа несимметричной системы электроснабжения и синтеза симметрично-компенсирующего устройства может быть представлена как типичная задача поисковой оптимизации [59]. Для её решения можно использовать весь набор известных методов оптимизации, которые приближают изображающую точку к решению посредством итераций. В каждой итерации оценивается величина целевой функции и по заданной алгоритмом решения стратегии производится изменение значений переменных оптимизации таким образом, чтобы обеспечить (как правило, чаще всего) минимизацию значения целевой функции.

Необходимо заметить, что полной системы уравнений, достаточных для решения задачи анализа, теперь недостаточно. Дело в том, что при описанной постановке задачи к числу неизвестных добавляются параметры симметрично-компенсирующего устройства. Для того, чтобы решение могло быть достигнуто, к полной системе уравнений цепи следует добавить дополнительные уравнения или неравенства, представляющие собой своего рода ограничения оптимизации, количество которых должно быть не меньше, чем число неизвестных параметров симметрично-компенсирующего устройства. Эти соотношения, как будет показано на конкретных примерах, могут определять условия физической реализации требуемого режима и элементов симметрично-компенсирующего устройства.

2.2 ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ

В качестве переменных параметров оптимизации используются параметры симметрично-компенсирующего устройства. Они должны обеспечить симметрирование и уравнивание трехфазной системы электроснабжения, а также как идеальный режим - полную компенсацию реактивной мощности.

Какие же дополнительные соотношения могут выразить в процессе оптимизации требуемые критерии, и каким образом их можно реализовать с помощью соответствующих целевых функций применительно к поставленным задачам?

Наиболее глобальным критерием при системном подходе в системе электроснабжения может служить отсутствие реактивной мощности, генерируемой источниками электрической энергии в каждой фазе трехфазной системы электропитания. При формировании уравнений можно

вычислить комплексные полные мощности, отдаваемые каждым источником трехфазной системы:

$$\begin{aligned}S_a &= 0,5E_a I_a^*; \\S_b &= 0,5E_b I_b^*; \\S_c &= 0,5E_c I_c^*,\end{aligned}$$

где E_a, E_b, E_c – задающие комплексные величины задающих напряжений источников питающих синусоидальных напряжений, I_a^*, I_b^*, I_c^* – сопряженные комплексы токов, отдаваемые соответствующими источниками.

Реактивные мощности могут быть определены как мнимые части от комплексов полных мощностей:

$$\begin{aligned}Q_a &= \text{Im}(S_a); \\Q_b &= \text{Im}(S_b); \\Q_c &= \text{Im}(S_c).\end{aligned}$$

Целевая функция, составленная из реактивных мощностей источников в виде шаровой метрики, выглядит так:

$$M = (Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2)^{0,5}.$$

При использовании моделей в системе визуального моделирования SimPowerSystem (SPS-моделей) для определения реактивной мощности целесообразно использовать виртуальный PQ-измеритель активной и реактивной мощностей Active&Reactive Power.

Для симметрирования токов с помощью симметричной системы источников питающего напряжения достаточно задать условие равенства активных мощностей, отдаваемых этими источниками:

$$P_a = P_b = P_c.$$

Другим критерием, необходимым для симметрирования токов источников, является равенство их амплитуд. Следует заметить, что ГОСТы нормируют коэффициенты несинусоидальности и неуравновешенности лишь для напряжений в точке общего присоединения [1]. Однако достижение этих условий может осуществляться именно симметрированием токов, отдаваемых источниками, если учесть, что сопротивления участков линий передачи электроэнергии для каждой из фаз считать одинаковыми.

Традиционным и естественным при симметрировании и компенсации реактивной мощности представляется разложение системы несимметричных напряжений и токов на симметричные составляющие. Прямая, обратная и нулевая симметричные составляющие вычисляются по известным формулам для комплексов несимметричных токов:

$$\begin{aligned}I_1 &= (I_a + aI_b + a^2I_c)/3; \\I_2 &= (I_a + a^2I_b + aI_c)/3; \\I_0 &= (I_a + I_b + I_c)/3.\end{aligned}$$

Для симметрирования достаточно добиться уничтожения обратной составляющей I_2 . Для полной компенсации реактивной мощности необходимо, чтобы был равен нулю фазовый угол для прямой составляющей. Необходимо учесть, что в трехфазных трёхпроводных системах электроснабжения нулевая составляющая токов всегда равна нулю, поскольку токи в линиях подчиняются первому закону Кирхгофа и их сумма равна нулю. В четырехпроводных трехфазных системах при несимметрии появляется нулевая составляющая, утроенное значение которой составляет ток в нулевом проводе. Чрезмерное возрастание этого тока увеличивает общие потери и может представлять опасность с точки зрения возможности термического разрушения провода нейтрали и резкого перекаса напряжений на зажимах нагрузок. Поэтому для симметрирования системы необходимо подавить как обратную I_2 , так и нулевую I_0 симметричные составляющие. При использовании SPS-моделей для вычисления всех симметричных составляющих в процессе моделирования предусмотрен специальный виртуальный прибор анализа симметричных составляющих 3-Phase Sequence Analyzer, который можно настроить на расчет и выделение на выходе необходимой симметричной составляющей. При этом на выходе прибора снимаются амплитуда и фазовый угол определяемой симметричной составляющей при заданной частоте.

Некоторые возможности по определению симметричных составляющих дает применение фильтров симметричных составляющих. Обычно они применяются в релейной защите электроэнергетических систем и нагружаются на исполнительные элементы, предотвращающие нежелательные аварийные режимы. Будучи подключенными к зажимам моделей, они могут выделять симметричные составляющие, необходимые для формирования целевых функций.

В качестве критерия, связанного с гармоническим составом токов и напряжений, необходимо принять коэффициент искажений синусоиды. Для его измерения в системе SPS имеется виртуальный прибор Total Harmonic Distortion (THD). Кроме того, для измерения отдельной гармонической составляющей заданного порядка по отношению к частоте питающей сети можно использовать виртуальный анализатор гармонических составляющих Fourier, что позволяет сформировать целевые функции, учитывающие отдельные гармоники.

В качестве фундаментального критерия можно также рассматривать минимизацию токов, протекающих в линиях электропередачи. Этот критерий соотносится с основной целью, которая достигается полной компенсацией реактивной мощности в системе электроснабжения. В плане вычисления формирование целевой функции, соответствующей этому критерию, осуществляется простым измерением амплитудных или действующих значений токов и определения по ним шаровой метрики. Однако достижение необходимого минимума требует обязательного применения численных методов безусловной оптимизации.

Для формирования целевых функций, связанных с коэффициентом мощности, а также с величиной мешающего напряжения можно использовать конструирование виртуальных приборов. Эти показатели имеют особое значение при оптимизации режимов в системах электроснабжения с полупроводниковыми силовыми преобразователями на железнодорожном электротранспорте.

2.3 МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Электроэнергетические системы совершенно обоснованно могут быть отнесены к разряду сложных систем как по огромному количеству элементов в них, большим размерам описывающих их уравнений, так и по характеру протекающих в них процессов, имеющих различную физическую природу. Поэтому задача анализа процессов, которые происходят в них, является достаточно сложной, а введение устройств, осуществляющих симметрирование и компенсацию реактивной мощности, еще более усложняет получение результатов. Традиционные символьные методы решения задачи анализа, дающие результат в аналитической форме, все более утрачивают свое значение. Изучаемые в стандартных курсах теоретических основ электротехники, они призваны выработать навыки решения относительно простых электрических систем и понять физическую природу происходящих в них процессов. Ограниченность символьных методов при расчете переходных процессов обнаруживается уже при попытке увеличить в исследуемой схеме число реактивных элементов до 3-4. Здесь сразу же сталкиваемся с необходимостью найти корни характеристического уравнения соответствующего 3-4 порядка. Задача решения алгебраического уравнения высшего порядка как нельзя лучше иллюстрирует ограниченность символьных методов. Действительно, с помощью известных корней можно легко составить уравнение, представив левую часть в виде произведений разностей неизвестной переменной и каждого из известных корней. Однако после раскрытия скобок в левой части получаем алгебраический многочлен, порядок которого равен числу корней. В символьном виде известны решения лишь для второго и третьего порядков (формулы Виетта и Кардано). Предпринимавшиеся в течение двух веков попытки математиков получить символьное решение для алгебраического уравнения сколько угодно высокого порядка практически прекратились после доказательства теоремы Абеля. Она строго определяет, что алгебраические уравнения выше четвертого порядка не могут быть разрешены в радикалах. В связи с этим, например, в теории авторегулирования были разработаны упрощенные методы оценивания свойств корней таких уравнений (критерии Гурвица, Михайлова).

В то же время в инженерно-технических разработках и исследованиях главным является получение результатов в виде численных значений, представляемых обычно в виде таблиц или графиков. Возможности для

получения таких результатов представляют приближенные численные методы, обеспечивающие при этом сколько угодно малую погрешность результатов вычислений. Численные методы дали огромный толчок для развития методов расчета технических устройств. В частности, в методах анализа и синтеза было использовано матричное исчисление, были разработаны топологические методы на основе ненаправленных и направленных (сигнальных) графов, существенно ускоряющих расчеты, обеспечивающие их наглядность и в значительной степени предохраняющие разработчиков от ошибок при получении результатов [70; 71].

Развитие средств электроники и разработка на основе операционных усилителей методов аналогового моделирования обеспечили широкие возможности для решения сложных технических задач на электронных вычислительных блоках. Аналоговое моделирование интенсивно использовалось вплоть до 70-х годов XX века и было окончательно вытеснено вследствие появления и бурного развития в 40-60 годы цифровых вычислительных машин и алгоритмических языков программирования. С появлением в 70-80 годы интегральных электронных схем, микропроцессоров и персональных компьютеров цифровые технологии стали широко доступными. Именно это обусловило появление таких мощных математических пакетов, как MS Excel, MathCAD, MATLAB, позволяющих реализовать идеи автоматизированного проектирования [67 – 69]. При этом разработчик не должен тратить усилия и время на написание громоздких сложных программ, отладка которых ранее занимала месяцы и годы и требовала работы целых коллективов инженеров, математиков и программистов. Внедренные в математические пакеты стандартные подпрограммы, реализующие численные методы, предоставили возможности быстрого создания вычислительных схем и систем, обеспечивающих получение требуемых результатов с необходимой точностью.

Системы электроснабжения содержат в своем составе такие важные элементы, как синхронные генераторы, линии электропередач, трансформаторы, различного рода линейные и нелинейные нагрузки. Для расчета процессов в системах электроснабжения используют расчетные схемы замещения, которые точно отражают поведение элементов в рамках поставленной задачи и условий. Вопрос об эквивалентных расчетных схемах замещения достаточно подробно освещен в технической литературе [36]. Основой для формирования моделей систем электроснабжения является полная система уравнений, описывающих систему электроснабжения. Полная система уравнений состоит из топологических и компонентных уравнений. Система топологических уравнений отражает структуру системы и связь в ней элементов между собой. Она формируется на основе законов Кирхгофа, а количество уравнений определяется числом независимых топологических контуров и сечений.

Формализация задачи составления топологических уравнений связана с использованием понятия дерева графа системы [70; 71], которое представляет собой связанную совокупность ребер графа системы,

содержащую все узлы графа и при этом не образующую ни одного контура. Ребра графа, включенные в дерево, называются ветвями, остальные ребра – связями. Присоединение к дереву отдельной связи создает так называемый особый контур. Вся совокупность особых контуров создает систему независимых уравнений по закону Кирхгофа для напряжений. Дуальным понятием по отношению к особому контуру является особое сечение. Оно представляет собой совокупность ребер графа, разрыв которых приводит к разделению этого графа на две части, одной из которых может быть даже отдельный узел (каноническое сечение). Особое сечение включает лишь одну ветвь, остальными ребрами должны быть связи. Каждое особое сечение дает возможность составить из токов ребер этого сечения уравнение по закону Кирхгофа. Система уравнений для особых сечений является независимой. То обстоятельство, что системы топологических уравнений, составленные по особым контурам и сечениям, являются независимыми, существенно облегчает формирование уравнений модели системы электроснабжения.

Для представления топологических уравнений в матричной форме составляется топологическая матрица F , называемая матрицей «контур-ветвь». Ее строки отражают связи, а столбцы – ветви графа. Матрица F заполняется по строкам положительными и отрицательными единицами, что тем самым отражает структуру особого контура при обходе в направлении, задаваемом направлением связи в контуре (это направление принимается как положительное). Можно заметить, что анализ системы особых контуров визуально нагляден. Принципиально возможно составить матрицу F и по системе особых сечений. Такой подход рационально строить путем эквивалентных преобразований матрицы инцидентий, что отражает номера узлов, к которым присоединено каждое ребро. Эти преобразования необходимо выполнять на компьютере, что и составляет сущность компьютерных алгоритмов, лежащих в основе автоматизированного проектирования электротехнических систем и комплексов.

После формирования матрицы F топологические уравнения представляются в компактной матричной форме:

$$\begin{aligned} V^C &= -FV^B; \\ I^B &= F^T I^C, \end{aligned}$$

где V^C, V^B – напряжения на связях и ветвях соответственно;
 I^B, I^C – токи ветвей и связей соответственно;
 F^T – транспонированная матрица F .

Топологические уравнения связывают однородные величины, и имеют единичные коэффициенты переменных. До полной системы уравнений, позволяющих построить математическую модель системы электроснабжения, топологические уравнения необходимо дополнить компонентными уравнениями. Они описывают поведение каждого элемента, в частности определяют соотношения токов и напряжений каждого элемента электрических систем. В простейшем случае, когда элемент двухполюсный, эта связь определяется законом Ома в форме алгебраического уравнения для

резистивных элементов. Для реактивных элементов конденсаторов и индуктивностей используются аналогичные уравнения, составленные в виде дифференциального или интегрального уравнения. Применение преобразования Лапласа позволяет алгебраизировать и эти уравнения, что на определенном этапе упрощает вычисления.

При выборе дерева графа электрической системы компонентные уравнения целесообразно представлять для ветвей – в импедансной, для связей – в адмитансной формах:

$$\begin{aligned} V^B &= Z^B I^B; \\ I^C &= Y^C V^C, \end{aligned}$$

где Z^B – диагональная матрица сопротивлений элементов, представляющих ветви графа;

Y^C – диагональная матрица проводимостей элементов, представляющих связи графа.

Сами компонентные уравнения определяют вид полной системы уравнений электрической системы. В линейной системе, питаемой от источников постоянного напряжения или тока, модель отображается системой исключительно алгебраических уравнений с действительными коэффициентами. В линейной системе электроснабжения, питаемой от источников синусоидального напряжения или тока, модель отображается также алгебраическими уравнениями, однако величины и коэффициенты в них являются комплексными числами. Наконец, наиболее общей формой представления модели являются интегро-дифференциальные уравнения, которые позволяют представлять решение для переходных процессов во временной области. В то же время эти уравнения могут представлять решение для установившихся периодических режимов с помощью метода установления. Именно дифференциальные уравнения электрических систем составляют основу формирования визуальных моделей в системах автоматизированного расчета [65; 66]. Здесь от разработчика не требуется умения составлять и решать уравнения динамики электрической системы. Описать моделируемую систему предоставляется компьютеру в виде текстового файла, отражающего структуру и параметры системы [62; 70; 71], или в виде графического изображения схемы на рабочем листе, составленном из библиотечных компонентов [66]. В последнем случае моделирующая программа все же переводит графическое изображение в соответствующие текстовые описания моделируемой системы. Далее моделирующая программа автоматически, с помощью составленных и оттестированных подпрограмм, формирует описания графа, выбирает дерево, формирует топологические матрицы, описания сигнального графа системы, составляет дифференциальные уравнения динамики системы и осуществляет их решение на заданном интервале моделирования с помощью численных методов интегрирования систем дифференциальных уравнений, представленных в форме задачи Коши. Информация о процессах накапливается в памяти компьютера или в дисковых файлах в виде массивов

чисел, представляющих значения непрерывных величин токов и напряжений в переходном режиме в дискретные моменты времени. По этим данным результатов компьютерных экспериментов с помощью специальных программ строятся и выводятся на экран графики изменений величин, интересующих разработчика, в зависимости от модельного времени.

Удобной формой представления полной системы уравнений является изображение ее в виде сигнального матричного графа Мейсона [70; 71]. Каждое из четырех матричных ребер сигнального графа отображает при этом приведенные выше системы топологических и компонентных уравнений. Преимуществом представления уравнений в виде сигнального графа являются не только их наглядность, но и возможность легко переходить к построению визуальных моделей на основе компьютерных виртуальных вычислительных блоков. Как реализуются такие возможности будет проиллюстрировано ниже в соответствующих примерах анализа систем электроснабжения с симметро-компенсирующими устройствами.

Уравнения модели можно легко преобразовать в обобщенную форму, пригодную для решения с помощью квазиньютоновских и оптимизационных методов. Для этого достаточно в каждом из четырех матричных уравнений модели перенести в правую часть элементы левой части и поменять полученные таким образом левую и правую часть местами. Получим уравнения с нулевыми правыми частями, представляющими задачу оптимизации невязок путем сведения их к нулю. В терминах теории сигнальных графов такие уравнения отображаются графами Коутса. Отличительной чертой графов Коутса является наличие единичных петель на каждом узле всех зависимых переменных, что следует из структуры используемых уравнений. Формирование графа Коутса, в отличие от графа Мейсона, не требует установления причинно-следственной связи между переменной в левой части уравнения и переменными в правой части, выражающими левую часть уравнения. Это несколько облегчает составление графа Коутса в сравнении с графом Мейсона.

2.4 МЕТОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В широко распространенных программных пакетах компьютерной математики содержатся средства для осуществления поисковой оптимизации. В электронных таблицах MS Excel имеет надстройку «Поиск решения», которая основана на оптимизационных алгоритмах [69]. Как указано в справке по этой надстройке, «Поиск решения» является частью блока задач, который иногда называют анализ «что-если». Процедура поиска решения позволяет найти оптимальное значение формулы, содержащейся в ячейке, которая называется целевой. Эта процедура работает с группой ячеек, прямо или косвенно связанных с формулой в целевой ячейке. Чтобы получить по формуле, содержащейся в целевой ячейке, заданный результат,

процедура изменяет значения во влияющих ячейках. Средство поиска решения Microsoft Excel использует алгоритм нелинейной оптимизации Generalized Reduced Gradient (GRG2), разработанный Л. Ласдоном и А. Уореном.

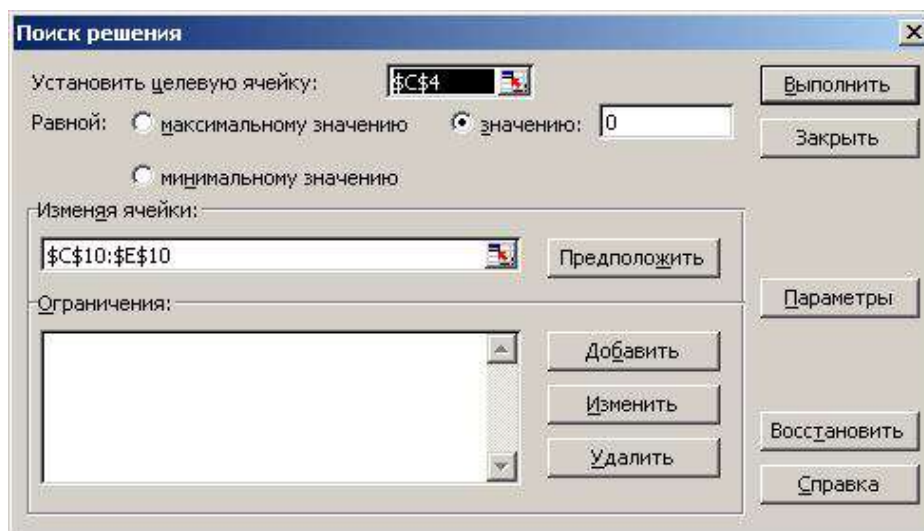


Рисунок 2.1 – Окно надстройки поиска решения

Окно диалога для надстройки «Поиск решения» приведено на рисунке 2.1. Здесь в строке «Установить целевую ячейку» необходимо указать фиксированный адрес ячейки, в которой рассчитывается целевая функция, которая может быть максимизирована, минимизирована или приведена к нулевому значению в зависимости от выбора соответствующей радиокнопки из числа расположенных ниже.

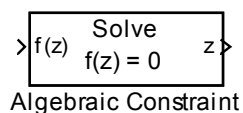
В разделе «Изменяя ячейки» следует указать ячейки с изменяемыми параметрами оптимизациями, которые и являются так называемыми влияющими ячейками. При наличии ограничений они могут быть введены в соответствующем разделе «Ограничения». Запуск на начало поиска путем решения оптимизационной задачи осуществляется кнопкой «Выполнить».

В системе MathCAD в качестве средства оптимизации используется оператор Given-Find (Solve Block). Для его включения на первом этапе необходимо задать начальные значения искомых переменных оптимизации при помощи операторов присваивания. На втором этапе между Given и Find следует записать уравнения, используя знак длинного, так называемого логического равенства (он вставляется с помощью удержания клавиши Ctrl и нажатия клавиши «=»). При этом даже не требуется представлять уравнение в виде, при котором правая часть равна нулю. Кроме уравнений сюда можно вставить неравенства, которые могут представлять дополнительные условия и ограничения при оптимизации. Общее количество уравнений и неравенств не должно быть меньше числа искомых параметров оптимизации. На третьем этапе должен быть записан оператор Find, в круглых скобках которого необходимо указать перечень имен искомых переменных оптимизации. Найденные значения могут быть присвоены некоторому вектору, в том числе

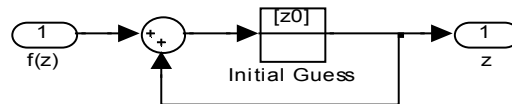
и содержащему имена искоемых переменных оптимизации. Solve Blocks может решать системы уравнений до 400 переменных, используя при этом квази-ньютоновский алгоритм или алгоритм метода сопряженных градиентов. Метод Левенберга-Марквардта позволяет решить задачу оптимизации без ограничения размеров системы, линейная система может содержать до 8192 ограничений, а нелинейная – до 200. Замечательным свойством оператора Solve Block является то обстоятельство, что он решает системы уравнений и неравенств даже в случае комплексных переменных. При этом Mathcad разделяет действительные и мнимые части комплексных чисел, а полученную систему соединяет в единую с учетом как уравнений, так и ограничений.

Для настройки рабочего листа для работы с комплексными переменными сначала достаточно определить комплексную единицу, которая равняется $j := (-I)^{0.5}$. Указанная возможность делает особенно удобным использование Solve Block для анализа установившихся режимов систем электроснабжения, которые питаются с помощью синусоидальных источников напряжения или тока. Кроме того, он весьма эффективен для синтеза симметро-компенсирующих устройств, состоящих, как правило, исключительно из реактивных элементов. Их параметры проводимости и сопротивления выражаются мнимыми числами при использовании метода комплексных амплитуд.

В системе Simulink свойством оптимизации обладает вычислительный блок Algebraic Constraint (рис. 2.2, а).



а)



б)

Рисунок 2.2 – Блок Algebraic Constraint (а) и его структура (б)

Выходная величина z этого блока изменяется таким образом, чтобы сигнал на входе блока $f(z)$ равнялся нулю, что предполагает и надпись на изображении блока: $f(z) = 0$. Между тем, вычислительная структура этого блока исключительно проста и совершенно не связана с каким-то математическим методом оптимизации (рис. 2.2, б). Видно, что сигнал с выхода блока подается на сумматор вместе с входным сигналом. Таким образом, должно быть справедливым уравнение:

$$f(z) + z = z,$$

что возможно лишь при выполнении условия $f(z) = 0$. Это условие удовлетворяется вследствие способности Simulink-моделей работать в уравновешенном режиме. Вычислительный блок Initial Guess позволяет задавать начальное значение выходной переменной z в начале первого шага интегрирования в течение работы модели. Далее, то есть уже на втором и

всех последующих шагах интегрирования этот блок совершенно не влияет на выходной сигнал и делает его равным сигналу на выходе блока суммирования. Принципиально если начальное значение z можно не задавать, то блок Initial Guess вообще может быть исключен из структуры, хотя работоспособность Algebraic Constraint при этом сохраняется. Однако библиотечный вариант этого блока не предполагает работы с комплексными величинами.

Математические методы оптимизации широко освещены в технической и математической литературе. Практическое значение в отношении технических систем имеют оптимизационные методы нулевого порядка [58; 59]. Эти методы не предусматривают вычисления первых и вторых производных целевой функции, а ограничиваются лишь вычислением значений самой целевой функции в нескольких точках, лежащих в окрестности изображающей точки, чтобы принять решение о дальнейшем ее перемещении в пространстве параметров оптимизации. Наиболее мощным и универсальным следует признать симплекс-метод Нелдера–Мида [42]. Суть этого метода состоит в сравнении значений функции в $(n+1)$ вершинах многогранника в пространстве параметров оптимизации, называемого симплексом. Далее симплекс перемещается в направлении оптимальной точки с помощью специальных процедур. Сравнение и перемещение выполняются циклически до тех пор, пока не будет достигнуто условие сходимости симплекса.

Блок-схема, поясняющая работу данного метода, изображена на рисунке 2.3. Симплекс может перемещаться с помощью трех операций – отражения, растяжения и сжатия. Все три процедуры осуществляются относительно центра тяжести, который вычисляется как среднее арифметическое для всех координат точек, которые не являются максимальными. Выполнение одной из трех перечисленных выше операций зависит от результатов сравнения оптимальных значений функции, а именно сравнения наибольшего значения f_{max1} , следующего за наибольшим значения f_{max2} и наименьшего значения f_{min} . Координаты, соответствующие этим значениям функции, обозначены соответственно точками x_{max1} , x_{max2} , x_{min} , где координата каждой точки представляет собой n -мерный вектор. Величины коэффициентов отражения, сжатия и растяжения принимаются соответственно: $\alpha = 1$, $\beta = 0,5$, $\gamma = 2$. В результате выполнения той или иной операции точка, в которой значение функции максимально, заменяется на одну из новых точек: отраженную $x_{отр}$, полученную в результате сжатия $x_{сж}$ или растяжения $x_{раст}$.

Рассмотрим работу блок-схемы симплекс-метода. Алгоритм выполнения симплекс-метода Нелдера – Мида можно разбить на описанную ниже последовательность шагов.

Вначале произвольно задаются начальные значения координат $x1=(x1,...,xn)$, где n – количество переменных целевой функции (n -мерное пространство). Затем формируются еще n точек (или вершин симплекса) с координатами $x2 = x1 + ke1$, $x3 = x1 + ke2$, $xn = x1 + ken$, где k – произвольная длина шага, а ej – единичный вектор.

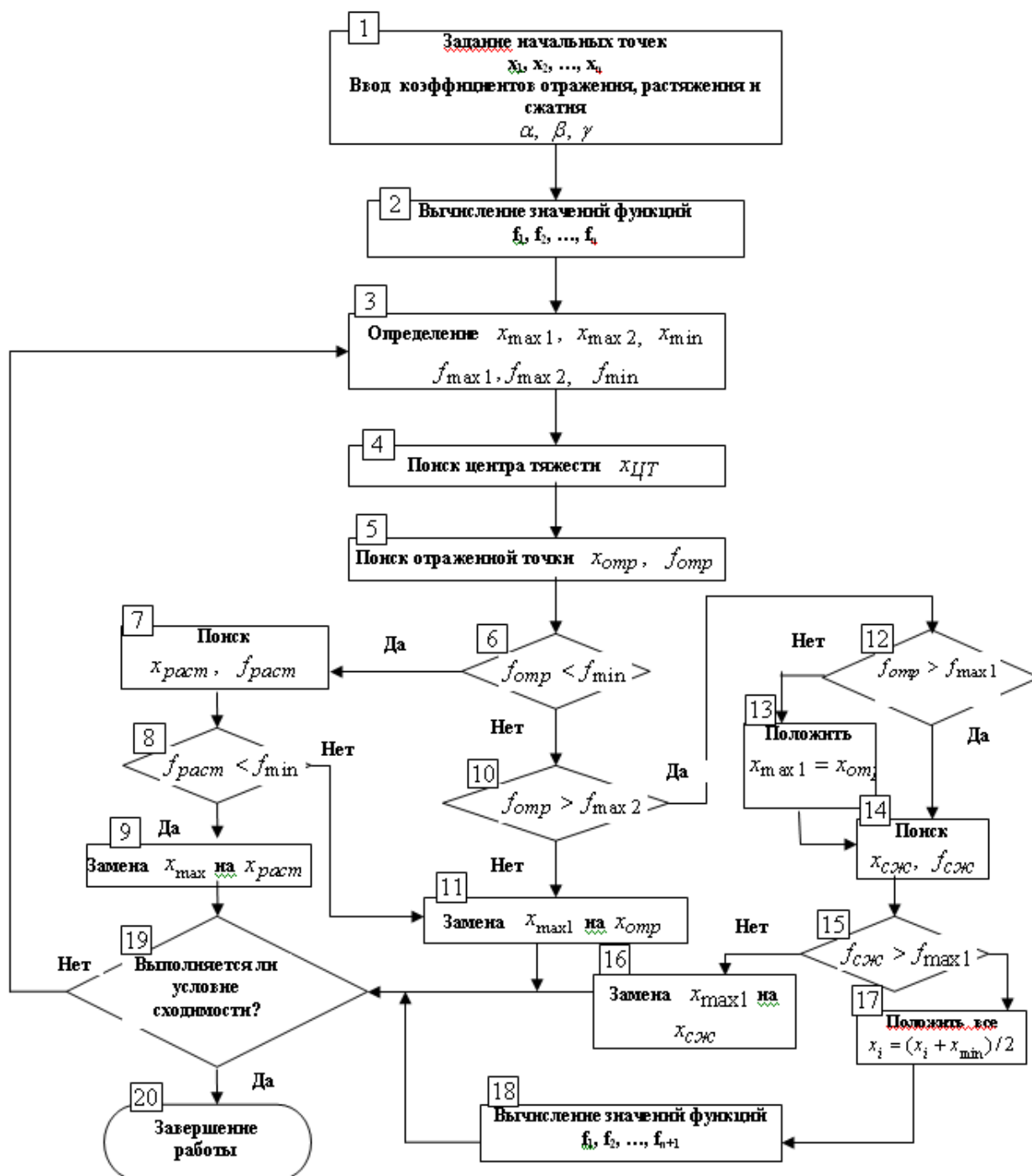


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритма работы симплекс-метода Нелдера–Мида

Вычисляются значения целевых функций в вершинах симплекса: $f_1=f(x_1)$, $f_2=f(x_2)$... $f_n=f(x_n)$, осуществляется поиск наибольшего значения функции $f_{\max 1}$, следующего за наибольшим значения целевой функции $f_{\max 2}$, и поиск наименьшего значения f_{\min} , а также определяются соответствующие им координаты $x_{\max 1}$, $x_{\max 2}$, x_{\min} .

1. По приведенной ниже формуле 2.1 вычисляются координаты центра тяжести $x_{ЦТ}$ и значение целевой функции в точке $f_{ЦТ}$:

$$x_{\text{ЦТ}} = \frac{1}{n} \sum_{i \neq \max 1} x_i, \quad (2.1)$$

где точка $x_{\max 1}$ является вершиной симплекса, в которой целевая функция достигает своего наибольшего значения.

2. Относительно центра тяжести $x_{\text{ЦТ}}$ осуществляется операция отражения координат точки $x_{\max 1}$, в которой функция имеет максимальное значение. Как результат получим точку $x_{\text{отр}}$, которая вычисляется по формуле:

$$x_{\text{отр}} = (1 + \alpha) x_{\text{ЦТ}} - \alpha x_{\max 1}. \quad (2.2)$$

3. Значения функций f_{\min} и $f_{\text{отр}}$ сравниваются. Если $f_{\text{отр}} < f_{\min}$, то осуществляется операция растяжения в направлении от центра тяжести к точке $x_{\text{сж}}$, описанной в пункте 6.

Если $f_{\text{отр}} > f_{\min}$ и $f_{\text{отр}} < f_{\max 2}$, то $x_{\max 1}$ заменяется $x_{\text{отр}}$ и переходим к пункту 12 – проверке условий сходимости.

Если $f_{\text{отр}} > f_{\min}$ и $f_{\text{отр}} > f_{\max 2}$, то проверяются условия в пункте 8, а затем осуществляется операция сжатия.

4. При выполнении операции растяжения осуществляется поиск координат точки $x_{\text{раст}}$, полученной в результате растяжения, по формуле:

$$x_{\text{раст}} = \gamma x_{\text{отр}} + (1 - \gamma) x_{\text{ЦТ}}. \quad (2.3)$$

Далее выполняется пункт 7.

5. Если $f_{\text{раст}} < f_{\min}$, то осуществляется замена точки $x_{\max 1}$ на $x_{\text{раст}}$.

Если $f_{\text{раст}} > f_{\min}$, то точка $x_{\text{раст}}$ отбрасывается и происходит замена точки $x_{\max 1}$ точкой $x_{\text{отр}}$.

Далее проверяются условия сходимости в пункте 12.

6. Если $f_{\text{отр}} > f_{\max 1}$, то непосредственно выполняется пункт 9 – операция сжатия.

Если $f_{\text{отр}} < f_{\max 1}$, то сжатие выполняется после замены $x_{\max 1}$ на $x_{\text{отр}}$.

7. При выполнении операции сжатия осуществляется поиск координат точки $x_{\text{сж}}$ по следующей формуле:

$$x_{\text{сж}} = \beta x_{\max 1} + (1 - \beta) x_{\text{ЦТ}}. \quad (2.4)$$

Осуществляется переход на сравнение в пункте 10.

8. Сравниваются значения $f_{\text{сж}}$ и $f_{\max 1}$.

Если $f_{\text{сж}} < f_{\max 1}$, то координаты $x_{\max 1}$ заменяются на $x_{\text{сж}}$, выполняется проверка на сходимость.

Если $f_{\text{сж}} > f_{\max 1}$, то симплекс уменьшается вследствие выполнения действия 1.

9. Осуществляется уменьшение размера симплекса, заключающееся в том, что расстояние от каждой точки симплекса до точки x_{\min} , определяющей наименьшее значение, делится пополам, то есть каждая точка x_i заменяется на точку $(x_i + x_{\min})/2$. Затем вычисляются значения целевой функции в

рассчитанных точках и проверяется условие сходимости.

10. Проверка сходимости функции основана на том, что стандартное отклонение $(n + 1)$ -го значения функции должно быть меньше некоторого заданного малого значения. Вычисление отклонения осуществляется по следующей формуле:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{(f_i - \bar{f})^2}{n + 1} \quad (2.5)$$

$$\text{где } \bar{f} = \sum \frac{f_i}{n+1}.$$

Если условие сходимости не выполняется, то осуществляется переход к пункту 2; если условие сходимости выполняется, то локальный минимум найден и программа завершает свое выполнение.

В системе MATLAB алгоритм метода Нелдера – Мида реализуется в виде файл-функции `fminsearch()`. В главной программе указывается обращение к функции `fminsearch()`, среди параметров которой следует назвать имя файл-функции, доставляющей значение целевой функции, а также начальные значения параметров оптимизации в виде вектора. В свою очередь, используемая файл-функция может вызывать Simulink- или SPS-модели, с помощью которых на конце интервала моделирования вычисляется значение целевой функции (или величин, необходимых для ее вычисления в вызываемой файл-функции). Необходимые значения могут передаваться в файл-функции через рабочее пространство посредством блока To Workspace. Таким образом можно анализировать электрические системы, как линейные, так и нелинейные, в переходных и установившихся режимах.

2.5 ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрим применение поисковой оптимизации на примере задачи синтеза электрической системы во временной области [72]. Она сводится к задачам нахождения топологии цепи и определения ее параметров для воспроизведения импульса с заданными характеристиками при испытании высоковольтной техники. Применяющиеся для решения этой задачи методы основаны на аналитических решениях. Их общим недостатком является то обстоятельство, что синтезируемые системы должны иметь ограниченный порядок, позволяющий осуществить символьные преобразования для получения результата.

Требуемая временная функция может быть задана в виде переходной характеристики или непосредственно как функция изменения тока (напряжения) во времени при протекании переходного процесса. Будем исходить из постановки задачи, изложенной в [72] (рис. 2.4, а). Конденсатор С предварительно заряжается до напряжения UC10. Запасенная им энергия должна преобразовываться при замыкании ключа К после прохождения

четырехполюсника в ток заданной формы, протекающий через резистор R (рис. 2.4, б).

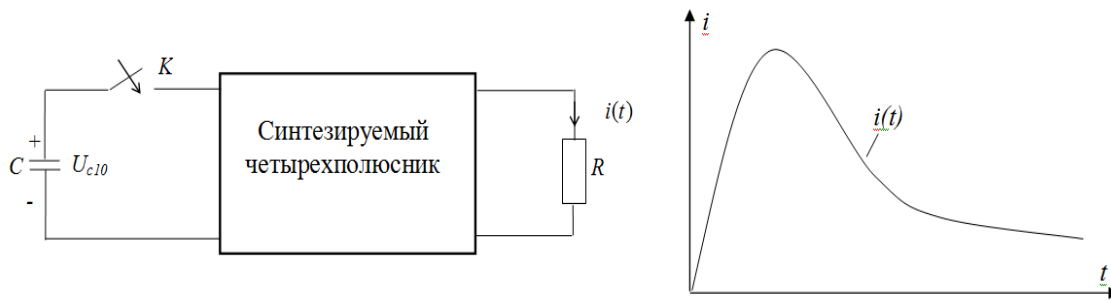


Рисунок 2.4 – а – схема установки; б – требуемая временная функция

Функцию тока для определенности примем заданной в виде такой зависимости:

$$i(t) = A_1 e^{-a_1 t} + A_2 e^{-a_2 t} + A_3 e^{-a_3 t} \quad (2.6)$$

Приведенная функция указывает на то, что синтезируемая система должна иметь третий порядок, то есть синтезируемый четырехполюсник может содержать до двух реактивных элементов. Примем условие, что система реализуется только однородными реактивными элементами – конденсаторами [4].

Таким образом, синтезируемый многополюсник дополняет систему двумя конденсаторами, помимо которых для развязки топологических вырождений необходимо включить еще как минимум два резистора. Выбор наилучшей схемы будет осуществляется в ходе решения задачи с помощью поисковой оптимизации. Постановка задачи состоит в следующем:

1. Выбирается топология схемы.
2. Задаются некоторые начальные значения параметров и электрических величин.
3. Осуществляется расчет переходного процесса в синтезируемой схеме на заданном интервале времени.
4. Расчетная кривая (пунктирная на рис. 2.5) переходного процесса сравнивается с требуемой (сплошная на рис. 2.5).
5. Путем сравнения формируется целевая функция, отражающая ошибку (на рис. 2.5 ошибку определяют заштрихованные области).
6. Если целевая функция достигает заданного минимального значения, то расчет заканчивается.
7. Если целевая функция не достигает заданного минимального значения, то с помощью выбранного метода оптимизации согласно его стратегии корректируются параметры оптимизации и расчет циклически повторяется с п. 3 до выполнения условия, указанного в п. 6.

Для реализации изложенной методики применительно к поставленной задаче можно воспользоваться пакетом Simulink системы MATLAB.

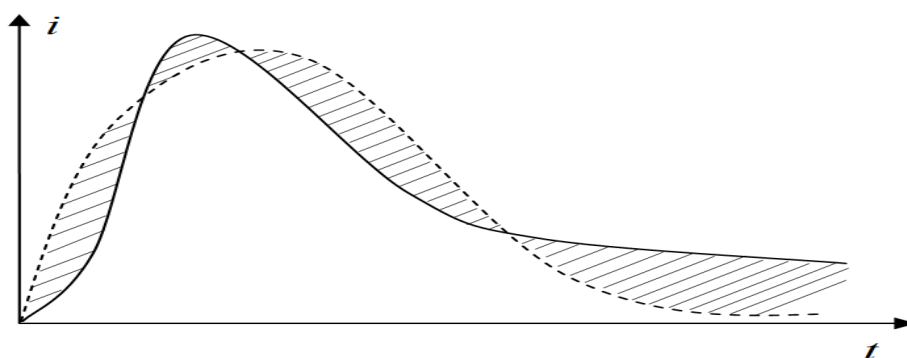


Рисунок 2.5 – К пояснению алгоритма синтеза во временной области с помощью поисковой оптимизации

Модель синтезируемой схемы реализуется с помощью системы SimPowerSystem. Для оптимизации используется встроенная программа оптимизации по алгоритму деформируемого многогранника Нелдера – Мида.

Параметры оптимизации представляются глобальными переменными в рабочей области. Критерий оптимизации рассчитывается в процессе работы модели синтезируемой схемы, после чего его величина передается в рабочую область соответствующим Simulink-блоком. Таким образом, вычислительная система состоит из основной программы, вызывающей встроенную функцию оптимизации с исходными значениями параметров, и дополнительной функции, осуществляющей расчет целевой функции. Дополнительная функция, в свою очередь, обращается к модели цепи, составленной по выбранной топологии на рабочем листе Simulink и снабженной измерительными приборами, позволяющими непосредственно производить измерения и вычислять целевую функцию.

На рисунке 2.6 приведена структура Simulink-модели для вычисления целевой функции.

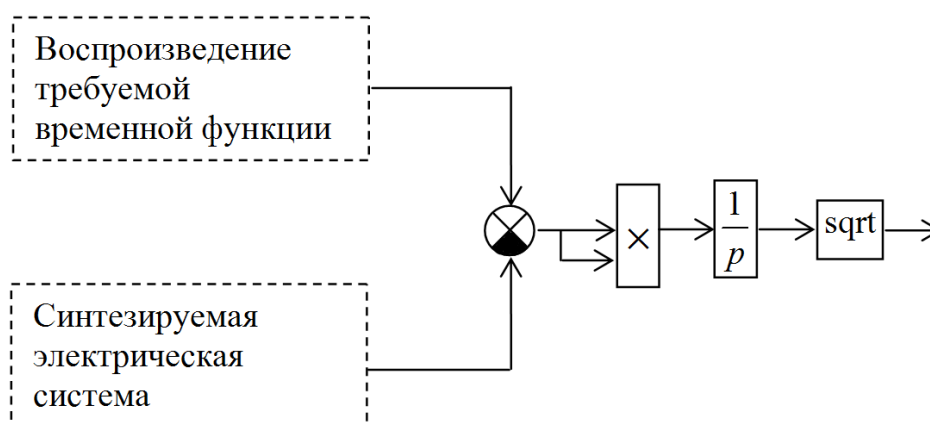


Рисунок 2.6 – Структура модели для вычисления целевой функции

Фактически модель состоит из двух частей. В верхней части расположена модель, генерирующая образцовый сигнал, который должен быть реализован. Этот сигнал является выходным для первой модели. В нижней части содержится SPS-модель синтезируемой электрической цепи. В

этой модели предусмотрено наличие начального напряжения на конденсаторе C1, что обеспечивается с помощью блока GUI. Ток в выходном резисторе измеряется с помощью виртуального амперметра и является выходной величиной второй модели. Из выходного сигнала первой модели вычитается выходной сигнал второй модели. Разность сигналов возводится в квадрат, чтобы избежать взаимной компенсации положительных и отрицательных значений разностей выходных сигналов моделей. Далее полученный сигнал интегрируется, благодаря чему определяется эквивалентная площадь квадрата погрешности. После этого из результата извлекается корень, чтобы сформировать величину, пропорциональную площади погрешности (рис. 2.5). Таким образом, рассчитываемая величина может быть выражена математической формулой

$$S = \sqrt{\int_0^t (i_T - i_C)^2 dt},$$

где i_T – ток, который требуется обеспечить в выходной цепи;

i_C – ток, создаваемый в выходной цепи по синтезируемой схеме.

Полученная величина S используется в качестве целевой функции, значение которой при точном решении должно сводиться к нулю. Для передачи этого значения в рабочую область используется блок ToWorkSpace.

В процессе поиска наилучшей топологии синтезируемой схемы нужно изменить конфигурацию второй модели. Последовательность выбора возможных вариантов синтезируемой схемы для решения поставленной задачи показана на рисунке 2.7.

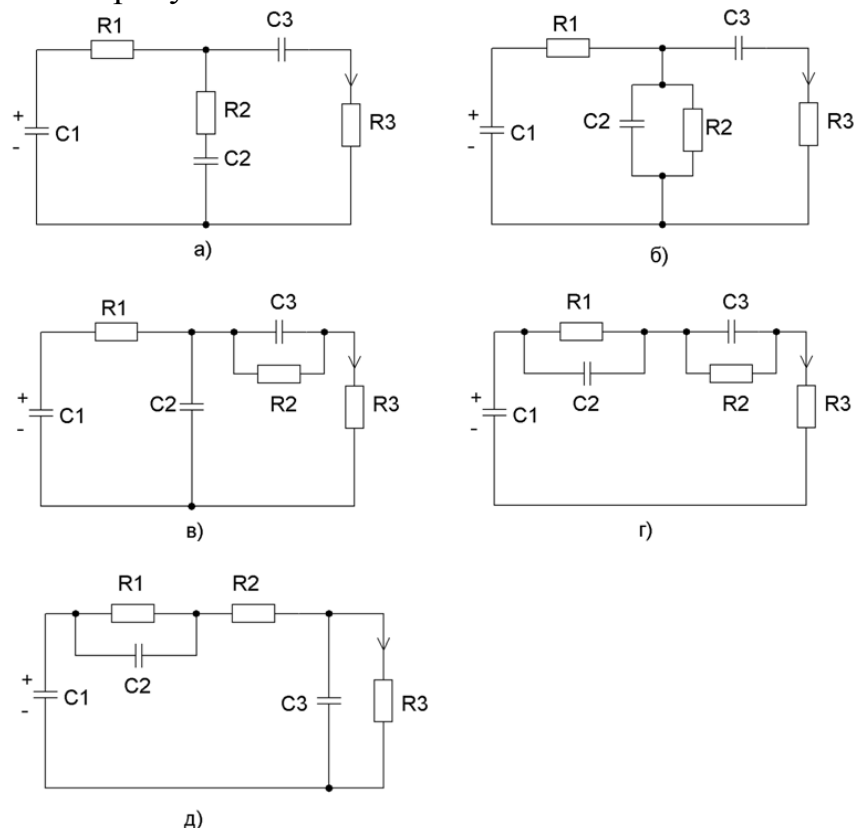


Рисунок 2.7 – Поиск топологии синтезируемой схемы

Соображения по переходу от начальной схемы (рис. 2.7, а) к конечной (рис. 2.7, д) состоят в следующем. Начальная схема составлена как параллельное соединение трех RC-цепей (рис. 2.7, а). Схема на рис. 2.7, б отличается тем, что элементы R2 и C2 включены параллельно. Затем резистор R2 перемещен и включен параллельно C3 (рис. 2.7, в). В последующем варианте конденсатор C2 перенесен и включен параллельно резистору R1 (рис. 2.7, г). В последнем варианте (рис. 2.7, д) конденсатор C3 перенесен и включен параллельно нагрузочному резистору R3. При исследовании каждой схемы наблюдалось уменьшение невязки. Принимались во внимание два обстоятельства: во-первых, тенденция к неуклонному уменьшению невязки и, во-вторых, соотношения получаемых параметров элементов синтезируемой схемы. Для всех схем, кроме окончательной (рис. 2.7, д), наблюдалось ограничение невязки по достижении определенного количества шагов оптимизации, после чего невязка переставала уменьшаться (табл. 2.1). Кроме того, из этой же таблицы видно, что указанные схемы создают относительно большой разброс параметров элементов, что технологически затрудняет их реализацию.

В качестве параметров оптимизации принимались все параметры, которые характеризуют свойства синтезируемой системы. К этим параметрам относятся величины емкостей конденсаторов C1, C2, C3, сопротивления резисторов R1, R2, R3, а также величина начального напряжения UC10, до которого предварительно заряжен конденсатор C1. Таким образом, можно сказать, что в отношении параметров схема не подвергается каким-либо ограничениям. Это облегчает проведение поисковой оптимизации, поскольку дает возможность выйти на любой локальный минимум, к которому приведет поиск от выбранных начальных значений. Найденные параметры в общем случае могут не соответствовать реальным. Пересчет параметров к реальным значениям можно осуществить на основе теории подобия.

Результаты оптимизации по синтезируемым схемам, представленные в таблице 2.1, получены на основании следующих данных:

- а) интервал моделирования динамического процесса: от $t_0 = 0$ до $t_k = 2$;
- б) шаг интегрирования: $\Delta t = 0,001$ с;
- в) начальные значения каждого резистора: $R_0 = 1$ Ом;
- г) начальные значения емкостей каждого конденсатора: $C_0 = 0,1$ Ф;
- д) начальное напряжение на конденсаторе C1: $V_{c10} = 10$ В;
- е) коэффициенты для описания функции тока в (1): $A_1 = -10$; $A_2 = 8$; $A_3 = 2$; $a_1 = 50$; $a_2 = 20$; $a_3 = 5$.

В таблице 2.1 вариант Г исключается, так как он не обеспечивает форму переднего фронта требуемого импульса. Это объясняется тем, что в этой схеме начальное напряжение заряженного конденсатора C1 через последовательную цепь, образованную конденсаторами C2 и C3, чьи начальные напряжения нулевые, в момент начала процесса сразу передается на выходной резистор R3.

Таблица 2.1 – Результаты синтеза методом поисковой оптимизации

Вариант	C1	C2	C3	R1	R2	R3	UC10	Невязка S	Разброс по C	Разброс по R
а	0,08183	0,02496	0,08581	0,98567	6,2·10-9	1,63498	15,345	6,678·10-2	3,44	109
б	0,1720	2,3958	32,7436	0,0831	120,503	0,0462	3,5401	6,787·10-3	185,6	2700,6
в	0,1764	2,4268	25,6768	0,07689	25,6768	0,04597	3,4802	4,196·10-3	145,52	558,2
г	Не обеспечивает формы переднего фронта импульса									
д	0,0395	0,0768	0,1120	1,3789	1,8010	0,2300	15,22	9,53·10-6	2,83	7,83

Наиболее точным следует признать вариант Д, поскольку после исчерпания максимального количества итерации ($n_{\max} = 1400$ по умолчанию) дальнейшее продолжение итерационного процесса оптимизации приводит к уменьшению целевой функции. Кроме того, этот вариант характеризуется наименьшим разбросом величин параметров элементов.

Пересчет параметров на реальные величины (например, на UC10 = 10 кВ) можно осуществить исходя из теории подобия, производя соответствующие нормирования. Согласно [70], нормирование в электрических системах осуществляется на основе выбора части базовых величин: U_0 – для напряжений, I_0 – для токов, R_0 – для сопротивлений, L_0 – для индуктивностей катушек, C_0 – для емкостей конденсаторов, t_0 – для времени. Базовые величины обязательно должны удовлетворять следующие фундаментальные соотношения:

$$I_0 R_0 = U_0; \quad (2.7)$$

$$t_0 = R_0 C_0; \quad (2.8)$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}; \quad (2.9)$$

$$t_0 = \sqrt{C_0 L_0}; \quad (2.10)$$

$$t_0 = \frac{L_0}{R_0}. \quad (2.11)$$

Из шести базовых величин достаточно выбрать три таким образом, чтобы эти выбранные базовые величины не входили одновременно ни в одно из соотношений (3 – 7). Оставшиеся три величины должны быть рассчитаны по указанным соотношениям. Пронормированные значения параметров схемы определяются путем деления действительной величины параметра на соответствующее базовое значение. Для рассматриваемого варианта пересчет осуществляем в следующем порядке.

Поскольку необходимо, чтобы импульс тока на выходе установки сохранил свою форму на временном интервале, нужно выбрать $t_0 = l$ и $I_0 = I$.

После нормирования УС10Н должно стать равным 10 000 В, то есть

$$U_{C1H0} = \frac{U_{C10}}{U_0} = 10000.$$

Следовательно, базовое напряжение для рассматриваемого варианта рассчитывается так:

$$U_0 = \frac{U_{C10}}{U_{C10H}} = \frac{15,3274}{10000} = 1,53274 \cdot 10^{-3}.$$

Базовое сопротивление определяют из (3):

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = 1,53274 \cdot 10^{-3},$$

базовая емкость – из (4):

$$C_0 = \frac{t_0}{R_0} = \frac{1}{1,53274 \cdot 10^{-3}}.$$

Теперь рассчитаем нормированные параметры и величины, разделив каждую величину из таблицы для варианта д на соответствующую базовую:

$$C_{1H} = 0,0395 \cdot 1,53274 \cdot 10^{-3} = 6,0543 \cdot 10^{-5} \Phi;$$

$$C_{2H} = 0,0768 \cdot 1,53274 \cdot 10^{-3} = 1,177 \cdot 10^{-4} \Phi;$$

$$C_{3H} = 0,112 \cdot 1,53274 \cdot 10^{-3} = 1,177 \cdot 10^{-4} \Phi;$$

$$R_{1H} = \frac{1,3789}{1,53274} \cdot 10^3 = 899,63 \text{ Ом};$$

$$R_{2H} = \frac{1,801}{1,53274} \cdot 10^3 = 1175,02 \text{ Ом};$$

$$R_{3H} = \frac{0,2300}{1,53274} \cdot 10^3 = 150,06 \text{ Ом};$$

$$U_{C10H} = \frac{15,3274}{1,53274} \cdot 10^3 = 10000 \text{ В}.$$

Расчет процесса с новыми, нормированными параметрами показывает абсолютно полное совпадение значения целевой функции со значением, полученным путем поисковой оптимизации.

Проведенные исследования подтверждают эффективность постановки и решения задач анализа и синтеза электрических систем и комплексов с привлечением оптимизационных алгоритмов. При этом появляется возможность обойтись без использования сложных символьных преобразований, переложить всю вычислительную работу полностью на компьютер и получить результат с высокой точностью и без значительных затрат времени.

Отметим также следующие важные особенности процесса поисковой оптимизации и поведения модели электрической системы, проявляемые в процессе оптимизации. При выборе адекватной структуры электрической системы те элементы, которые не соответствуют такой структуре, вытесняются из нее. Это проявляется в изменении величины параметра такого ненадлежащего элемента к его крайнему численному значению. Величина невязки ограничивается на некотором значении, не достигая при этом оптимального. Это и является сигналом для удаления такого элемента. Таким образом, *свойство вытеснения ненадлежащего элемента* может помочь разработчику в творческом процессе конструирования структуры электрической системы. Во-вторых, необходимо подчеркнуть, что при решении рассмотренной задачи количество параметров оптимизации было искусственно увеличено на единицу. По сути, к числу параметров оптимизации отнесены не только величины сопротивлений и емкостей, но и величина начального напряжения на накопительном конденсаторе. В действительности напряжение на конденсаторе известно и оно может быть выбрано из числа параметров оптимизации. В этом случае постановка задачи оптимизации будет более строгой, так как предполагает нахождение единственного, глобального оптимума, соответствующего пересчитанным параметрам. Однако поиск глобального оптимума, как правило, требует больших затрат компьютерного времени. Он может быть затруднен сложной конфигурацией поверхности оптимизации, рельеф которой предсказать заранее практически невозможно. Преднамеренное увеличение количества параметров оптимизации освобождает параметры, поскольку разрешает программе оптимизации найти любой локальный оптимум. Какой именно локальный оптимум будет найден в процессе оптимизации зависит от стратегии поисковой оптимизации, определяемой алгоритмом оптимизации, а также от заданных начальных значений параметров оптимизации. Таким образом, *освобождение параметров оптимизации* может обусловить сокращение компьютерного времени, затрачиваемого на проведение оптимизации, поскольку пересчет по действительным параметрам обычно осуществляется с помощью простых вычислительных процедур. Разумеется, правила пересчета необходимо определять адекватно исходя из фундаментальных физических законов в их математическом отображении.

3 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕЗ НУЛЕВОГО ПРОВОДА

3.1 ЭКВИВАЛЕНТНАЯ РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И УРАВНЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрим разработку метода точного нахождения емкостей конденсаторов, компенсирующих реактивную мощность несимметричной системы электроснабжения, с применением современных средств компьютерной математики. Решение этой задачи интересно с точки зрения проверки и контроля других, приближенных методов расчета компенсирующих конденсаторов. Кроме того, разработанный подход может быть использован при построении микропроцессорных систем управления автоматическими компенсаторами реактивной мощности на основе силовой полупроводниковой техники с целью оптимизации режимов их работы [35].

Рассмотрим случай обобщенной трехфазной трехпроводной системы электроснабжения (рис. 3.1).

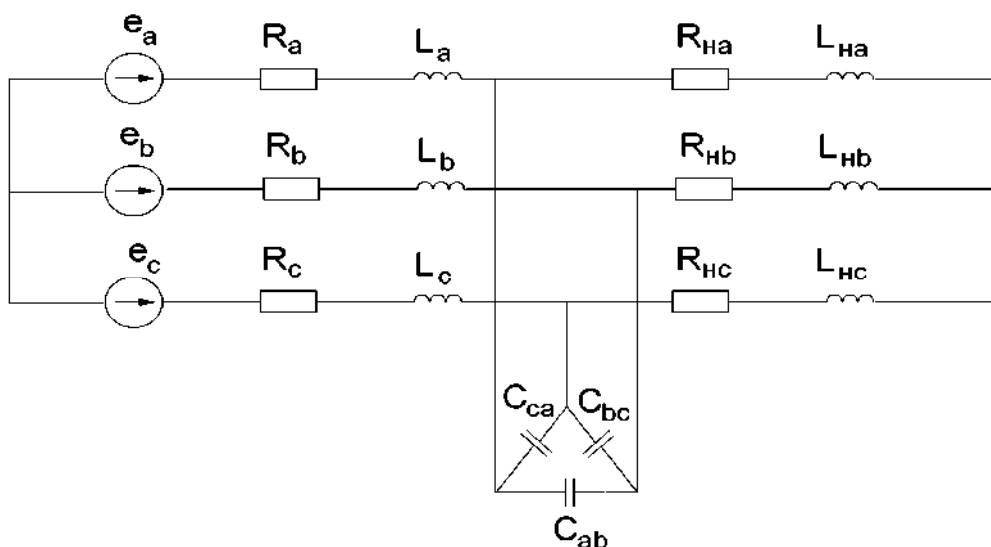


Рисунок 3.1 – Обобщенная схема замещения трехфазной трехпроводной системы электроснабжения с несимметричной трехфазной нагрузкой

На основании этой схемы можно легко получить схему с одноплечевой нагрузкой, если полагать стремящимися к бесконечности сопротивления нагрузки одной из фаз. Если же предположить, что сопротивления одной из фаз нагрузки равняются нулю, то получим случай двухплечевой нагрузки [14].

В обобщенной схеме:

e_a, e_b, e_c – трехфазная система источников питания неограниченной мощности;

$R_a = R_b = R_c$ – активные сопротивления линии электропередачи;

$L_a = L_b = L_c$ – индуктивности линии электропередачи;

$R_{на}, R_{nb}, R_{nc}$ – активные сопротивления нагрузки;

$L_{на}, L_{nb}, L_{nc}$ – индуктивности нагрузки;

C_{ab}, C_{bc}, C_{ca} – компенсирующие конденсаторы.

Поскольку в общем случае нагрузка является несимметричной, то

$$R_{на} \neq R_{nb}, R_{nb} \neq R_{nc}, R_{nc} \neq R_{на};$$

$$L_{на} \neq L_{nb}, L_{nb} \neq L_{nc}, L_{nc} \neq L_{на};$$

а для компенсирующих конденсаторов справедливо соответствующие неравенство:

$$C_{ab} \neq C_{bc}, C_{bc} \neq C_{ca}, C_{ca} \neq C_{ab}.$$

В принципе, вместо конденсаторных элементов могут использоваться индуктивные элементы, что может иметь место для случаев изменения характера нагрузочного сопротивления отдельных фаз.

Ввиду несимметрии системы она не может рассматриваться пофазно, а потому необходимо составлять уравнения для исходной топологии. Обозначим

$$z_a = R_a + j\omega L_a; z_b = R_b + j\omega L_b; z_c = R_c + j\omega L_c;$$

$$z_{на} = R_{на} + j\omega L_{на}; z_{nb} = R_{nb} + j\omega L_{nb}; z_{nc} = R_{nc} + j\omega L_{nc};$$

$$z_{ab} = \frac{1}{j\omega c_{ab}}; z_{bc} = \frac{1}{j\omega c_{bc}}; z_{ca} = \frac{1}{j\omega c_{ca}}.$$

Ориентированный граф с выделенным деревом (сплошные жирные линии) приведен на рисунке 3.2.

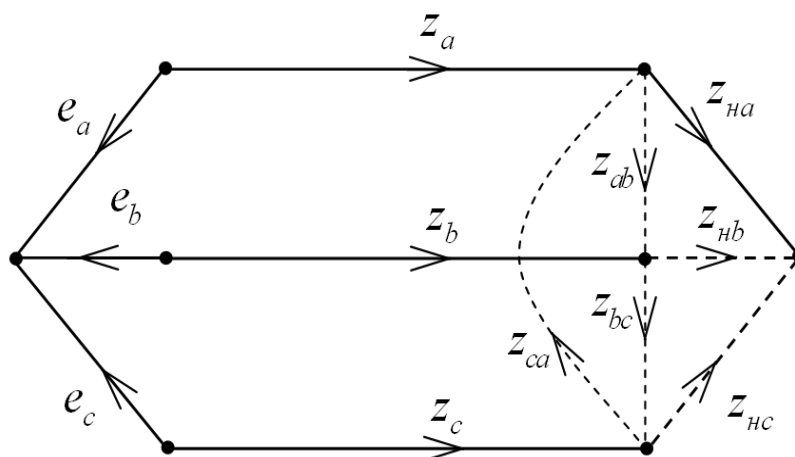


Рисунок 3.2 – Ориентированный граф системы электроснабжения

Топологическая матрица контур-ветвь [70, 71] для выбранной системы ветвей и связей будет такой:

$$\mathbf{F} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline -1 & +1 & & +1 & -1 & & & z_{ab} \\ \hline & -1 & +1 & & +1 & -1 & & z_{bc} \\ \hline +1 & & -1 & -1 & & +1 & & z_{ca} \\ \hline +1 & -1 & & -1 & +1 & & -1 & z_{nb} \\ \hline +1 & & -1 & -1 & & +1 & -1 & z_{nc} \\ \hline e_a & e_b & e_c & z_a & z_b & z_c & z_{na} & \\ \hline \end{array}$$

Выражая напряжения на пассивных элементах по закону Ома в импедансной форме, с помощью топологической матрицы можно записать следующую систему уравнений по закону Кирхгофа для напряжений системы особых контуров:

$$\begin{aligned} e_a - e_b - z_a i_a + z_b i_b - z_{ab} i_{ab} &= 0, \\ e_b - e_c - z_b i_b + z_c i_c - z_{bc} i_{bc} &= 0, \\ e_c - e_a + z_a i_a - z_c i_c - z_{ca} i_{ca} &= 0, \\ e_b - e_a + z_a i_a - z_b i_b + z_{na} i_{na} - z_{nb} i_{nb} &= 0, \\ e_c - e_a + z_a i_a - z_c i_c + z_{na} i_{na} - z_{nc} i_{nc} &= 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Дополним полученные уравнения системой уравнений Кирхгофа для токов особых сечений:

$$\begin{aligned} i_{ab} - i_{ca} - i_{nb} - i_{nc} - i_a &= 0, \\ i_{bc} - i_{ab} + i_{nb} - i_b &= 0, \\ i_{ca} - i_{bc} + i_{nc} - i_c &= 0, \\ i_{na} + i_{nb} + i_{nc} &= 0. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Полная система уравнений состоит из систем (3.1) и (3.2), образующих девять уравнений для девяти неизвестных токов: фазных – i_a, i_b, i_c ; нагрузочных – i_{na}, i_{nb}, i_{nc} ; токов компенсирующих элементов – i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} .

3.2 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА

В несимметричном режиме компенсирующие элементы отсутствуют. Поэтому необходимо предположить, что сопротивления z_{ab}, z_{bc}, z_{ca} в уравнениях модели стремятся к бесконечности.

Воспользуемся математическим пакетом MathCAD. Его достоинством, в первую очередь является простота обработки комплексных чисел, с помощью которых решаются уравнения установившихся режимов линейных систем электроснабжения при синусоидальных воздействиях со стороны питающей системы [68]. Система MathCAD оснащена простым средством поисковой оптимизации, которая реализуется операторами `given` и `find()`. Предполагается, что на рабочем листе после оператора `given` будет записана

система уравнений, которые снабжаются специальным символом логического равенства = (Ctrl + =). Оператор find() предусматривает перечисление внутри скобок искомых переменных, участвующих в записи уравнений между given и find(), причем результат работы оператора find() выдается в виде вектора, значение которого обычно присваивается поименованной переменной. Поиск самого решения осуществляется встроенными программными средствами поисковой оптимизации, вследствие работы которых должны быть удовлетворены уравнения, записанные между given и find(). К группе этих уравнений могут быть добавлены математические выражения требуемых ограничений, которые также учитываются при работе средств поисковой оптимизации.

Таким образом, в конечном счете группа given–find() обеспечивает поисковую оптимизацию с учетом ограничений.

Указанные средства поисковой оптимизации позволяют решить задачу анализа режима системы электроснабжения. При этом задача анализа может быть решена в линейной постановке как альтернатива линейным матричным методам, использующим, например, обращение соответствующей матрицы коэффициентов.

Ход и результаты решения с расчетом на несимметричность режима при указанных параметрах приведен на рисунке 3.3, отображающем структуру рабочего листа.

РАСЧЕТ НЕКОМПЕНСИРОВАННОГО НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА

И С Х О Д Н Ы Е Д А Н Н Ы Е :

$$w := 100 \cdot \pi \quad w = 314.159 \quad j := \sqrt{-1} \quad j = i \quad a := \exp\left(j \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \quad a = -0.5 + 0.866i$$

$$Em := 100 \quad ea := Em \quad eb := Em \cdot a^2 \quad ec := Em \cdot a \quad ea = 100 \quad eb = -50 - 86.603i \quad ec = -50 + 86.603i$$

$$ra := 0.1 \quad rb := 0.1 \quad rc := 0.1 \quad la := 0.001 \quad lb := 0.001 \quad lc := 0.001$$

$$Ra := 0.7 \quad Rb := 1 \quad Rc := 2 \quad La := 0.005 \quad Lb := 0.01 \quad Lc := 0.04$$

$$za := ra + j \cdot w \cdot la \quad zb := rb + j \cdot w \cdot lb \quad zc := rc + j \cdot w \cdot lc \quad zna := Ra + j \cdot w \cdot La \quad znb := Rb + j \cdot w \cdot Lb$$

$$znc := Rc + j \cdot w \cdot Lc \quad za = 0.1 + 0.314i \quad zna = 0.7 + 1.571i \quad zb = 0.1 + 0.314i \quad znb = 1 + 3.142i$$

$$zc = 0.1 + 0.314i \quad znc = 2 + 12.566i$$

СИММЕТРИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОТСУТСТВУЮТ:

$$zab := 10^9 \quad zbc := 10^9 \quad zca := 10^9$$

НАЧАЛЬНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ИСКОМЫХ ТОКОВ:

$$ia := 30 - j \cdot 30 \quad ib := -36 + j \cdot 21 \quad ic := 4 + j \cdot 9 \quad ina := 30 - j \cdot 30 \quad inb := -36 + j \cdot 21 \quad inc := 4 + j \cdot 9$$

$$iab := j \quad ibc := j \quad ica := j$$

РАСЧЕТ РЕЖИМА БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ:

Given

$$ea - eb + zb \cdot ib - zab \cdot iab - za \cdot ia = 0$$

$$eb - ec + zc \cdot ic - zbc \cdot ibc - zb \cdot ib = 0$$

$$ea - ec + zc \cdot ic + zca \cdot ica - za \cdot ia = 0$$

$$ea - ec + zc \cdot ic + znc \cdot inc - zna \cdot ina - za \cdot ia = 0$$

$$ina + inb + inc = 0$$

$$ia - iab + ica + inb + inc = 0$$

$$ib + iab - ibc - inb = 0$$

$$ic + ibc - ica - inc = 0$$

$$x := \text{Find}(ia, ib, ic, iab, ibc, ica, ina, inb, inc)$$

	0
0	19.1562946+24.9975771i
1	-25.8445705+17.1096233i
2	6.688276+7.8879538i
3	1.3227155·10 ⁻⁷ +7.6675822i·10 ⁻⁸
4	6.1503576·10 ⁻⁹ +1.6390675i·10 ⁻⁷
5	-1.384219·10 ⁻⁷ +8.7230931i·10 ⁻⁸
6	19.1562943+24.9975771i
7	-25.8445704+17.1096235i
8	6.6882761+7.8879536i

$$ia := x_0 \quad ib := x_1 \quad ic := x_2 \quad ia = 19.156 - 24.998i \quad ib = -25.845 + 17.11i \quad ic = 6.688 + 7.888i$$

$$ina := x_6 \quad inb := x_7 \quad inc := x_8 \quad ina = 19.156 - 24.998i \quad inb = -25.845 + 17.11i$$

$$inc = 6.688 + 7.888i$$

$$iab := x_3 \quad ibc := x_4 \quad ica := x_5 \quad iab = 1.323 \times 10^{-7} + 7.668i \times 10^{-8}$$

$$ibc = 6.15 \times 10^{-9} - 1.639i \times 10^{-7} \quad ica = -1.384 \times 10^{-7} + 8.723i \times 10^{-8}$$

РАСЧЕТ УГЛОВ МЕЖДУ ТОКАМИ И ПИТАЮЩИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ:

$$\arg(ia) - \arg(ea) = -0.917 \quad \arg(ib) - \arg(eb) = 4.651 \quad \arg(ic) - \arg(ec) = -1.227$$

АМПЛИТУДЫ ФАЗНЫХ ТОКОВ:

$$|ia| = 31.494 \quad |ib| = 30.995 \quad |ic| = 10.342$$

КОСИНУСЫ УГЛОВ СДВИГА ФАЗНЫХ ТОКОВ

ОТНОСИТЕЛЬНО ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ:

$$\cos(\arg(x_0) - \arg(ea)) = 0.60826125 \quad \cos(\arg(x_1) - \arg(eb)) = -0.0611419 \quad \cos(\arg(x_2) - \arg(ec)) = 0.33717825$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ НАГРУЗКИ

ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА ИСТОЧНИКОВ:

$$Ua := ea - (ra + j \cdot w \cdot la) \cdot x_0 \quad Ua = 90.231 - 3.518i \quad |Ua| = 90.3 \quad \arg(Ua) \cdot \frac{180}{\pi} = -2.233$$

$$Ub := eb - (rb + j \cdot w \cdot lb) \cdot x_1 \quad Ub = -42.04 - 80.194i \quad |Ub| = 90.546 \quad \arg(Ub) \cdot \frac{180}{\pi} = -117.665$$

$$Uc := ec - (rc + j \cdot w \cdot lc) \cdot x_2 \quad Uc = -48.191 + 83.713i \quad |Uc| = 96.593 \quad \arg(Uc) \cdot \frac{180}{\pi} = 119.928$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЩЕМ УЗЛЕ НАГРУЗКИ

ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА ИСТОЧНИКОВ:

$$U0 := Ua - zna \cdot x_6 \quad U0 = 37.556 - 16.111i \quad UU0 := Ub - znb \cdot x_7 \quad UU0 = 37.556 - 16.111i \quad UUU0 := Uc - znc \cdot x_8$$

$$UUU0 = 37.556 - 16.111i \quad |U0| = 40.865 \quad \arg(U0) \cdot \frac{180}{\pi} = -23.218$$

ПОЛНЫЕ МОЩНОСТИ, ОТДАВАЕМЫЕ ИСТОЧНИКАМИ ПО ФАЗАМ:

$$Sa := 0.5 \cdot ea \cdot \overline{ia} \quad Sa = 957.814728 + 1249.878856i \quad Sb := 0.5 \cdot eb \cdot \overline{ib} \quad Sb = -94.754 + 1546.843i$$

$$Sc := 0.5 \cdot ec \cdot \overline{ic} \quad Sc = 174.352 + 486.81i \quad \text{суммарные:}$$

$$Ssum := Sa + Sb + Sc \quad Ssum = 1037.412 + 3283.532i \quad |Ssum| = 3443.516$$

$$ea - eb + zb \cdot ib + znb \cdot inb - zna \cdot ina - za \cdot ia = 0$$

ПОТЕРИ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ:

$$Sta := 0.5 \cdot za \cdot ia \cdot \overline{ia} \quad Sta = 49.592 + 155.798i \quad Stb := 0.5 \cdot zb \cdot ib \cdot \overline{ib} \quad Stb = 48.034 + 150.903i \quad Stc := 0.5 \cdot zc \cdot ic \cdot \overline{ic}$$

$$Stc = 5.348 + 16.8i \quad \text{суммарные:} \quad St := Sta + Stb + Stc \quad St = 102.974 + 323.502i$$

МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМЫЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ:

$$Sna := 0.5 \cdot zna \cdot ina \cdot \overline{ina} \quad Sna = 347.145 + 778.991i \quad Snb := 0.5 \cdot znb \cdot inb \cdot \overline{inb} \quad Snb = 480.341 + 1509.034i$$

$$Snc := 0.5 \cdot znc \cdot inc \cdot \overline{inc} \quad Snc = 106.953 + 672.005i \quad \text{суммарные:} \quad Sn := Sna + Snb + Snc$$

$$Sn = 934.438 + 2960.03i \quad |Sn| = 3104.022$$

ПРОВЕРКА БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ:

$$St + Sn = 1037.412 + 3283.532i \quad Ssum = 1037.412 + 3283.532i$$

Рисунок 3.3 – Рабочий лист расчета несимметричного режима системы электроснабжения

Как видно из результатов расчета, представленных на рабочем листе, система работает в резко несимметричном режиме, когда смещение нейтрали достигает 40 % по сравнению с амплитудой напряжения питающих источников. Ток источника фазы В протекает в направлении, обратном требуемому для отдачи источником мощности потребителям. В системе электроснабжения наличествует реактивная мощность, которая более чем в три раза превышает активную мощность, потребляемую нагрузкой.

3.3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА И СИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА

На рисунке 3.4 представлен фрагмент рабочего листа, обеспечивающего расчет параметров симметро-компенсирующего устройства с использованием поисковой оптимизации. Здесь комплексные сопротивления компенсирующих элементов включены в число переменных полной системы уравнений модели системы электроснабжения. Условия компенсации реактивной мощности сформулированы в виде критерия равенства нулю реактивной мощности, отдаваемой каждым источником симметричной трехфазной системы синусоидальных напряжений. При этом используются сопряженные комплексы токов в соответствии с теорией мощности на переменном токе. Дополнительный множитель 0.5 опущен, так как его наличие не влияет на условия равенства нулю мнимой части комплекса полной мощности. Для реализации симметро-компенсирующего устройства исключительно реактивными элементами, не вносящими дополнительных активных потерь, введены соответствующие ограничения на отсутствие действительных частей у сопротивлений этих элементов. Дополнительно введено также ограничение на знак мнимой части сопротивлений симметро-компенсирующих элементов, который соответствует именно емкостному характеру этих элементов. Это соотносится с наиболее распространенным случаем резистивно-индуктивной нагрузки во всех трех фазах. Однако в общем случае смешанного характера фазных нагрузок это ограничение можно снять.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРОВ, КОМПЕНСИРУЮЩИХ РЕАКТИВНУЮ МОЩНОСТЬ ЗАДАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИСКОМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ:

$z_{ab} := 10 - j \cdot 20$ $z_{bc} := 10 - j \cdot 20$ $z_{ca} := 10 - j \cdot 20$ $i_a := 30 - j \cdot 30$ $i_b := -36 + j \cdot 21$ $i_c := 4 + j \cdot 9$
 $i_{na} := 30 - j \cdot 30$ $i_{nb} := -36 + j \cdot 21$ $i_{nc} := 4 + j \cdot 9$ $i_{ab} := j$ $i_{bc} := j$ $i_{ca} := j$

Given

Уравнения электрического равновесия:

$e_a - e_b + z_b \cdot i_b - z_{ab} \cdot i_{ab} - z_a \cdot i_a = 0$
 $e_b - e_c + z_c \cdot i_c - z_{bc} \cdot i_{bc} - z_b \cdot i_b = 0$
 $e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{ca} \cdot i_{ca} - z_a \cdot i_a = 0$
 $e_a - e_b + z_b \cdot i_b + z_{nb} \cdot i_{nb} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$
 $e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{nc} \cdot i_{nc} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$
 $i_{na} + i_{nb} + i_{nc} = 0$
 $i_a - i_{ab} + i_{ca} + i_{nb} + i_{nc} = 0$
 $i_b + i_{ab} - i_{bc} - i_{nb} = 0$
 $i_c + i_{bc} - i_{ca} - i_{nc} = 0$

Условия компенсации реактивной мощности:

$$\operatorname{Im}(ea \cdot \overline{ia}) = 0 \quad \operatorname{Im}(eb \cdot \overline{ib}) = 0 \quad \operatorname{Im}(ec \cdot \overline{ic}) = 0$$

Условия реализации компенсации реактивными элементами:

$$\operatorname{Re}(zab) = 0 \quad \operatorname{Re}(zbc) = 0 \quad \operatorname{Re}(zca) = 0$$

Условия реализации компенсации конденсаторными элементами:

$$\operatorname{Im}(zab) < 0 \quad \operatorname{Im}(zbc) < 0 \quad \operatorname{Im}(zca) < 0$$

$x := \text{Find}(ia, ib, ic, iab, ibc, ica, ina, inb, inc, zab, zbc, zca)$

	0
0	7.7540446
1	-3.8770223-6.7151996i
2	-3.8770223+6.7151996i
3	-14.5299812+26.6569026i
4	9.8437164-0.2416673i
x = 5	-0.9699739-1.5886762i
6	21.3140519-28.2455788i
7	-28.2507199+20.1833703i
8	6.9366679+8.0622084i
9	-5.6625684i
10	-17.4590606i
11	-92.3581873i

Проверка совпадения фазных токов и напряжений:

$$\arg(x_0) - \arg(ea) = 0 \quad \arg(x_1) - \arg(eb) = 0 \quad \arg(x_2) - \arg(ec) = 0$$

Проверка равенства фазных токов:

$$|x_0| = 7.754045 \quad |x_1| = 7.754045 \quad |x_2| = 7.754045$$

Вычисление емкостей компенсирующих конденсаторов:

$$C_{ab} := \frac{-1}{w \cdot (\operatorname{Im}(x_9))} \quad C_{ab} = 5.621299 \times 10^{-4}$$

$$C_{bc} := \frac{-1}{w \cdot (\operatorname{Im}(x_{10}))} \quad C_{bc} = 1.823178 \times 10^{-4}$$

$$C_{ca} := \frac{-1}{w \cdot (\operatorname{Im}(x_{11}))} \quad C_{ca} = 3.446472 \times 10^{-5}$$

Рисунок 3.4 – Расчет параметров симметро-компенсирующего устройства

Результаты поисковой оптимизации представлены вектором x , в котором значения переменных представлены в той же последовательности, в которой они перечислены в скобках оператора *find*. После нахождения результатов поисковой оптимизации осуществляется проверка совпадения фаз токов и напряжений, равенства амплитуд токов в линиях передачи, а также определены емкости конденсаторов симметро-компенсирующего устройства, обеспечивающего полное симметрирование режима и компенсацию реактивной мощности в системе электроснабжения с несимметричной трехфазной нагрузкой.

На рисунке 3.5 представлен расчет показателей в системе электроснабжения с подключенным симметро-компенсирующим устройством, параметры которого определены с помощью поисковой оптимизации.

РАСЧЕТ СИММЕРИЧНОГО СКОМПЕНСИРОВАННОГО РЕЖИМА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

СИММЕТРИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИСУТСТВУЮТ:

$$z_{ab} := -j \cdot 5.662568 \quad z_{bc} := -j \cdot 17.459060 \quad z_{ca} := -j \cdot 92.358187$$

НАЧАЛЬНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ИСКОМЫХ ТОКОВ:

$$i_a := 30 - j \cdot 30 \quad i_b := -36 + j \cdot 21 \quad i_c := 4 + j \cdot 9 \quad i_{na} := 30 - j \cdot 30 \quad i_{nb} := -36 + j \cdot 21 \quad i_{nc} := 4 + j \cdot 9$$

$$i_{ab} := j \quad i_{bc} := j \quad i_{ca} := j$$

РАСЧЕТ РЕЖИМА С КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ:

Given

$$e_a - e_b + z_b \cdot i_b - z_{ab} \cdot i_{ab} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_b - e_c + z_c \cdot i_c - z_{bc} \cdot i_{bc} - z_b \cdot i_b = 0$$

$$e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{ca} \cdot i_{ca} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_a - e_b + z_b \cdot i_b + z_{nb} \cdot i_{nb} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{nc} \cdot i_{nc} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$i_{na} + i_{nb} + i_{nc} = 0$$

$$i_a - i_{ab} + i_{ca} + i_{nb} + i_{nc} = 0$$

$$i_b + i_{ab} - i_{bc} - i_{nb} = 0$$

$$i_c + i_{bc} - i_{ca} - i_{nc} = 0$$

$$x := \text{Find}(i_a, i_b, i_c, i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}, i_{na}, i_{nb}, i_{nc})$$

	0
0	7.7540445+2.1290028i·10 ⁻⁷
1	-3.8770222-6.7151998i
2	-3.8770223+6.7151996i
3	-14.5299813+26.6569028i
4	9.8437164-0.2416673i
5	-0.9699739-1.5886762i
6	21.3140519-28.2455788i
7	-28.2507199+20.1833703i
8	6.9366679+8.0622084i

$$\underline{i_a} := x_0 \quad \underline{i_b} := x_1 \quad \underline{i_c} := x_2 \quad i_a = 7.754 + 2.129ix \cdot 10^{-7} \quad i_b = -3.877 - 6.715i \quad i_c = -3.877 + 6.715i$$

$$\underline{i_{na}} := x_6 \quad \underline{i_{nb}} := x_7 \quad \underline{i_{nc}} := x_8 \quad i_{na} = 21.314 - 28.246i \quad i_{nb} = -28.251 + 20.183i \quad i_{nc} = 6.937 + 8.062i$$

$$\underline{i_{ab}} := x_3 \quad \underline{i_{bc}} := x_4 \quad \underline{i_{ca}} := x_5 \quad i_{ab} = -14.53 + 26.657i \quad i_{bc} = 9.844 - 0.242i \quad i_{ca} = -0.97 - 1.589i$$

УГЛЫ МЕЖДУ ТОКАМИ И ПИТАЮЩИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ:

$$\arg(i_a) - \arg(e_a) = 2.746 \times 10^{-8} \quad \arg(i_b) - \arg(e_b) = 2.61 \times 10^{-8} \quad \arg(i_c) - \arg(e_c) = 7.283 \times 10^{-11}$$

АМПЛИТУДЫ ФАЗНЫХ ТОКОВ:

$$|i_a| = 7.754 \quad |i_b| = 7.754 \quad |i_c| = 7.754$$

КОСИНУСЫ УГЛОВ СДВИГА ФАЗНЫХ ТОКОВ

ОТНОСИТЕЛЬНО ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ:

$$\cos(\arg(x_0) - \arg(e_a)) = 1 \quad \cos(\arg(x_1) - \arg(e_b)) = 1 \quad \cos(\arg(x_2) - \arg(e_c)) = 1$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ НАГРУЗКИ

ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА ИСТОЧНИКОВ:

$$U_a := e_a - (r_a + j \cdot w \cdot l_a) \cdot x_0 \quad U_a = 99.225 - 2.436i \quad |U_a| = 99.254 \quad \arg(U_a) \cdot \frac{180}{\pi} = -1.406$$

$$U_b := e_b - (r_b + j \cdot w \cdot l_b) \cdot x_1 \quad U_b = -51.722 - 84.713i \quad |U_b| = 99.254 \quad \arg(U_b) \cdot \frac{180}{\pi} = -121.406$$

$$U_c := e_c - (r_c + j \cdot w \cdot l_c) \cdot x_2 \quad U_c = -47.503 + 87.149i \quad |U_c| = 99.254 \quad \arg(U_c) \cdot \frac{180}{\pi} = 118.594$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЩЕМ УЗЛЕ НАГРУЗКИ

ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА ИСТОЧНИКОВ:

$$U_0 := U_a - z_{na} \cdot x_6 \quad U_0 = 39.937 - 16.144i \quad U_{U0} := U_b - z_{nb} \cdot x_7 \quad U_{U0} = 39.937 - 16.144i$$

$$U_{UU0} := U_c - z_{nc} \cdot x_8 \quad U_{UU0} = 39.937 - 16.144i \quad |U_0| = 43.076 \quad \arg(U_0) \cdot \frac{180}{\pi} = -22.011$$

ПОЛНЫЕ МОЩНОСТИ, ОТДАВАЕМЫЕ ИСТОЧНИКАМИ ПО ФАЗАМ:

$$S_a := 0.5 \cdot e_a \cdot i_a = 387.702 - 0i \quad S_b := 0.5 \cdot e_b \cdot i_b = 387.702 - 0i \quad S_c := 0.5 \cdot e_c \cdot i_c = 387.702$$

$$\text{суммарные: } S_{\text{sum}} := S_a + S_b + S_c \quad S_{\text{sum}} = 1163.107 - 0i \quad |S_{\text{sum}}| = 1163.107$$

ПОТЕРИ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ:

$$S_{ta} := 0.5 \cdot z_a \cdot i_a \cdot i_a = 3.006 + 9.444i \quad S_{tb} := 0.5 \cdot z_b \cdot i_b \cdot i_b = 3.006 + 9.444i \quad S_{tc} := 0.5 \cdot z_c \cdot i_c \cdot i_c = 3.006 + 9.444i$$

суммарные:

$$S_t := S_{ta} + S_{tb} + S_{tc} = 9.019 + 28.333i$$

МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМЫЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ:

$$S_{na} := 0.5 \cdot z_{na} \cdot i_{na} \cdot i_{na} = 438.236 + 983.398i$$

$$S_{nb} := 0.5 \cdot z_{nb} \cdot i_{nb} \cdot i_{nb} = 602.736 + 1893.55i$$

$$S_{nc} := 0.5 \cdot z_{nc} \cdot i_{nc} \cdot i_{nc} = 113.117 + 710.732i$$

$$\text{суммарные: } S_n := S_{na} + S_{nb} + S_{nc} = 1154.088 + 3587.681i \quad |S_n| = 3768.736$$

МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМЫЕ КОМПЕНСИРУЮЩИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ:

$$S_{Cab} := 0.5 \cdot z_{ab} \cdot i_{ab} \cdot i_{ab} = -2609.625i \quad S_{Cbc} := 0.5 \cdot z_{bc} \cdot i_{bc} \cdot i_{bc} = -846.39i \quad S_{Cca} := 0.5 \cdot z_{ca} \cdot i_{ca} \cdot i_{ca} = -159.999i$$

$$\text{суммарные: } S_C := S_{Cab} + S_{Cbc} + S_{Cca} = -3616.014i$$

ПРОВЕРКА БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ:

$$S_t + S_n + S_C = 1163.107 - 0i \quad S_{\text{sum}} = 1163.107 - 0i$$

Рисунок 3.5 – Расчет режима полной компенсации реактивной мощности при помощи конденсаторного симметри-компенсирующего устройства

Эти результаты целесообразно сравнить с соответствующими показателями, рассчитанными для несимметричного некомпенсированного режима.

Из сравнения видно, что амплитуды токов, отдаваемые источниками питания и протекающие в линиях электропередачи, существенно снизились. Ток фазы А уменьшился в 31,494/7,754, то есть в 4,062 раза, фазы В – в 30,995/7,754 (3,997 раза), фазы С – в 10,342/7,754 (1,334 раза). Поскольку мощность, выделяемая током на двухполюснике, пропорциональна квадрату протекающего через него тока, то соответствующие тепловые потери уменьшатся соответственно в 16,5 (фаза А), 15,98 (фаза В), 1,78 (фаза С) раз, что существенно улучшит эффективность работы линии электропередачи. Заметно улучшилось напряжение на нагрузке по сравнению с несимметричным режимом. Ранее амплитуды напряжений на узлах нагрузки относительно общего узла источников составляли 90,3 В, 90,546 В, 96,593 В. При полной компенсации реактивной мощности амплитуды напряжений всех трех фаз одинаковы и равны 99,254 В, то есть эти напряжения составляют абсолютно симметричную систему, напряжение которой незначительно (лишь на 0,746 %) уменьшилось по сравнению с напряжением на зажимах генератора. Вследствие этого улучшилось потребление электроэнергии нагрузками: в несимметричном режиме полная мощность нагрузки составляла $934,438 + j2960,03$, а при полной компенсации реактивной мощности эта величина составила $1154,088 + j3587,68$. Особо следует отметить улучшение работы источников электроэнергии: в несимметричном режиме комплексная суммарная мощность составляла $1037,412 + j3283,532$ ВА, при подключении симметри-компенсирующего устройства мощность источников составила 1163,107 Вт, причем эта мощность равномерно (по

387,702 Вт) распределилась между всеми тремя источниками и передавалась при предельной единичной величине коэффициента мощности, поскольку токи в каждой из фаз полностью совпадали по фазовым углам с их напряжениями. Кроме того важно, что синхронный генератор, вырабатывающий электроэнергию, освобождается от нежелательного влияния реактивной мощности со стороны нагрузки и линии электропередач, величина которой в рассматриваемом случае в три раза превышает полезную активную мощность. Все это свидетельствует о чрезвычайной эффективности симметрирования и полной компенсации реактивной мощности, осуществленных при точном расчете симметро-компенсирующего устройства и соответствующего режима предложенным методом поисковой оптимизации.

Для сравнения приведем результаты аналитического расчета параметров симметро-компенсирующего устройства по методике, изложенной в [36].

3.4 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЕМКОСТЕЙ СИММЕТРИРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Описанный в [36] метод определения параметров симметрирующих элементов реализован в программе, приведенной на рисунке 3.5.

Предварительно, по амплитудам несимметричных токов, найден ток обратной последовательности, а затем, согласно методике [36] – амплитуды токов I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} , которые протекают в ветвях симметрирующих элементов для подавления тока обратной последовательности. Это и должно обеспечить симметрирование токов в линиях электропередачи. Заметим, что в приведенном расчете предложено численное решение задачи, позволяющее не учитывать необходимость рассмотрения трех вариантов расположения вектора тока компенсируемой обратной последовательности, как это предлагается в [36]. Решение, полученное с помощью оператора given-find, предполагает вариант симметрирования двумя конденсаторами, о чем свидетельствует малый ток I_{ca} в полученном решении. Сопротивления конденсаторов определены по закону Ома, после чего с учетом частоты питающих источников найдены их емкости.

На рисунке 3.6 приведены результаты расчета режима в симметрированной по указанной методике системе электроснабжения.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИММЕТРИРОВАНИЯ 25 ФЕВР 2013 (ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ФОРМУЛЫ ВЕНИКОВА)

$$i_a = 19.156 - 24.998i \quad i_b = -25.845 + 17.11i \quad i_c = 6.688 + 7.888i$$

$$I_{pr} := \frac{i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c}{3} \quad I_{ob} := \frac{i_a + a^2 \cdot i_b + a \cdot i_c}{3}$$

$$I_{pr} = 6.916 - 21.89i \quad I_{ob} = 12.24 - 3.107i$$

$$|I_{pr}| = 22.957 \quad |I_{ob}| = 12.628$$

$$M_{lob} := |I_{ob}| \quad M_{lob} = 12.628 \quad Ar_{pr} := \arg(I_{pr}) \quad A_{rob} := \arg(I_{ob})$$

$$Ar_{pr} = -1.265 \quad A_{rob} = -0.249 \quad Ar_{pr_gr} := \frac{Ar_{pr} \cdot 180}{\pi} \quad A_{rob_gr} := \frac{A_{rob} \cdot 180}{\pi}$$

$$Ar_{pr_gr} = -72.466 \quad A_{rob_gr} = -14.244$$

Продолжение рисунка 3.6

ПРОВЕРКИ ЛИНЕЙНЫХ ТОКОВ, ВЫРАЖЕННЫХ ЧЕРЕЗ СИММЕТРИЧНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ;

$$\begin{aligned} lpr + lob &= 19.156 - 24.998i & ia &= 19.156 - 24.998i \\ a^2 \cdot lpr + a \cdot lob &= -25.845 + 17.11i & ib &= -25.845 + 17.11i \\ a \cdot lpr + a^2 \cdot lob &= 6.688 + 7.888i & ic &= 6.688 + 7.888i \\ ia + ib + ic &= 0 \end{aligned}$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ТОКОВ СИММЕТРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ:

$$lab := 1 \quad lbc := 1 \quad lca := 1 \quad j = i$$

Given

$$lob = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot (lbc + a \cdot lca + a^2 \cdot lab)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(lab) &= 0 & \text{Im}(lbc) &= 0 & \text{Im}(lca) &= 0 \\ \text{Re}(lab) &> 0 & \text{Re}(lbc) &> 0 & \text{Re}(lca) &> 0 \end{aligned}$$

$$T := \text{Find}(lab, lbc, lca) \quad T = \begin{pmatrix} 24.48 \\ 6.858 \\ 2.474 \times 10^{-9} \end{pmatrix}$$

$$lab := T_0 \quad lab = 24.48 \quad lbc := T_1 \quad lbc = 6.858 \quad lca := T_2 \quad lca = 2.474 \times 10^{-9}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИММЕТРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ:

$$zab := \frac{|ea - eb|}{lab \cdot j} \quad zab = -7.075i \quad Cab := \frac{1}{|zab| \cdot w} \quad Cab = 4.499 \times 10^{-4}$$

$$zbc := \frac{|eb - ec|}{lbc \cdot j} \quad zbc = -25.256i \quad Cbc := \frac{1}{|zbc| \cdot w} \quad Cbc = 1.26 \times 10^{-4} \quad zca = 1 \times 10^7$$

$$\begin{aligned} ia &:= 30 - j \cdot 30 & ib &:= -36 + j \cdot 21 & ic &:= 4 + j \cdot 9 \\ ina &:= 30 - j \cdot 30 & inb &:= -36 + j \cdot 21 & inc &:= 4 + j \cdot 9 \end{aligned}$$

$$iab := j \quad ibc := j \quad ica := j \quad zca = 1 \times 10^7$$

РАСЧЕТ СИММЕТРИЗИРОВАННОГО РЕЖИМА:

Given

$$\begin{aligned} ea - eb + zb \cdot ib - zab \cdot iab - za \cdot ia &= 0 \\ eb - ec + zc \cdot ic - zbc \cdot ibc - zb \cdot ib &= 0 \\ ea - ec + zc \cdot ic + zca \cdot ica - za \cdot ia &= 0 \\ ea - eb + zb \cdot ib + znb \cdot inb - zna \cdot ina - za \cdot ia &= 0 \\ eb - ec + zc \cdot ic + znc \cdot inc - zna \cdot ina - za \cdot ia &= 0 \\ ina + inb + inc &= 0 \\ ia - iab + ica + inb + inc &= 0 \\ ib + iab - ibc - inb &= 0 \\ ic + ibc - ica - inc &= 0 \end{aligned}$$

$$x := \text{Find}(ia, ib, ic, iab, ibc, ica, ina, inb, inc)$$

x =

	0
0	9.40460176.7222931i
1	-9.52129441.3444552i
2	0.1166927+8.0667483i
3	-11.4758633+20.694386i
4	6.7009430.0789061i
5	-1.4442509·10-5+8.8041519i·10-6
6	20.880450627.4166704i
7	-27.6981007+19.428837i
8	6.8176501+7.9878334i

$$\underline{ia} := x_0 \quad \underline{ib} := x_1 \quad \underline{ic} := x_2$$

$$ia = 9.405 - 6.722i \quad ib = -9.521 - 1.344i \quad ic = 0.117 + 8.067i$$

$$\underline{iab} := x_3 = -11.476 + 20.694i \quad \underline{ibc} := x_4 = 6.701 - 0.079i$$

$$\underline{ica} := x_5 = -1.444 \times 10^{-5} + 8.804i \times 10^{-6}$$

РАСЧЕТ УГЛОВ МЕЖДУ ТОКАМИ И ПИТАЮЩИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ:

$$\arg(ia) - \arg(ea) = -0.621 \quad \frac{\arg(x_3) \cdot 180}{\pi} = 119.01$$

$$\arg(ib) - \arg(eb) = -0.907 \quad \frac{\arg(x_4) \cdot 180}{\pi} = -0.675$$

$$\arg(ic) - \arg(ec) = -0.538$$

АМПЛИТУДЫ ФАЗНЫХ ТОКОВ:

$$|ia| = 11.56 \quad |ib| = 9.616 \quad |ic| = 8.068$$

КОСИНУСЫ УГЛОВ СДВИГА ФАЗНЫХ ТОКОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ:

$$\cos(\arg(x_0) - \arg(ea)) = 0.81354029$$

$$\cos(\arg(x_1) - \arg(eb)) = 0.6161745933$$

$$\cos(\arg(x_2) - \arg(ec)) = 0.85870261832$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ НАГРУЗКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА ИСТОЧНИКОВ:

$$\underline{Ua} := ea - (ra + j \cdot w \cdot la) \cdot x_0 \quad Ua = 96.948 - 2.282i \quad |Ua| = 96.975$$

$$\underline{Ub} := eb - (rb + j \cdot w \cdot lb) \cdot x_1 \quad Ub = -49.47 - 83.477i \quad |Ub| = 97.035$$

$$\underline{Uc} := ec - (rc + j \cdot w \cdot lc) \cdot x_2 \quad Uc = -47.477 + 85.759i \quad |Uc| = 98.024$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЩЕМ УЗЛЕ НАГРУЗКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА ИСТОЧНИКОВ:

$$\underline{U0} := Ua - zna \cdot x_6 \quad U0 = 39.265 - 15.89i$$

$$\underline{UU0} := Ub - znb \cdot x_7 \quad UU0 = 39.265 - 15.89i$$

$$\underline{UUU0} := Uc - znc \cdot x_8 \quad UUU0 = 39.265 - 15.89i \quad |U0| = 42.359 \quad \arg(U0) \cdot \frac{180}{\pi} = -22.032$$

ПОЛНЫЕ МОЩНОСТИ, ОТДАВАЕМЫЕ ИСТОЧНИКАМИ ПО ФАЗАМ:

$$\underline{Sa} := 0.5 \cdot ea \cdot \overline{ia} \quad Sa = 470.230086 + 336.114655i$$

$$\underline{Sb} := 0.5 \cdot eb \cdot \overline{ib} \quad Sb = 296.249 + 378.673i$$

$$\underline{Sc} := 0.5 \cdot ec \cdot \overline{ic} \quad Sc = 346.383 + 206.722i$$

$$\text{суммарные: } \underline{Ssum} := Sa + Sb + Sc \quad Ssum = 1112.862 + 921.509i \quad |Ssum| = 1444.867$$

ПОТЕРИ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ:

$$\underline{Sta} := 0.5 \cdot za \cdot \overline{ia} \cdot \overline{ia} \quad Sta = 6.682 + 20.991i \quad \underline{Stb} := 0.5 \cdot zb \cdot \overline{ib} \cdot \overline{ib} \quad Stb = 4.623 + 14.524i$$

$$\underline{Stc} := 0.5 \cdot zc \cdot \overline{ic} \cdot \overline{ic} \quad Stc = 3.254 + 10.224i$$

$$\text{суммарные: } \underline{St} := Sta + Stb + Stc \quad St = 14.559 + 45.739i$$

МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМЫЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ:

$$\underline{Sna} := 0.5 \cdot zna \cdot \overline{x_6} \cdot \overline{x_6} \quad Sna = 415.683 + 932.792i$$

$$\underline{Snb} := 0.5 \cdot znb \cdot \overline{x_7} \cdot \overline{x_7} \quad Snb = 572.332 + 1798.035i$$

$$\underline{Snc} := 0.5 \cdot znc \cdot \overline{x_8} \cdot \overline{x_8} \quad Snc = 110.286 + 692.946i$$

$$\text{суммарные: } \underline{Sn} := Sna + Snb + Snc \quad Sn = 1098.302 + 3423.773i \quad |Sn| = 3595.62$$

МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМЫЕ КОМПЕНСИРУЮЩИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ:

$$\underline{SCab} := 0.5 \cdot zab \cdot \overline{iab} \cdot \overline{iab} = -1980.903i \quad \underline{SCbc} := 0.5 \cdot zbc \cdot \overline{ibc} \cdot \overline{ibc} = -567.099i$$

$$\underline{SCca} := 0.5 \cdot zca \cdot \overline{ica} \cdot \overline{ica} = 1.43 \times 10^{-3}$$

$$\text{суммарные: } \underline{SC} := SCab + SCbc + SCca = 0.001 - 2548.003i$$

ПРОВЕРКА БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ:

$$St + Sn + SC = 1112.862 + 921.509i \quad Ssum = 1112.862 + 921.509i$$

Рисунок 3.6 – Аналитический расчет параметров симметрирующего устройства

Как видно из полученного решения, токи в линиях существенно снизились, однако полное симметрирование не достигнуто. Это объясняется, с одной стороны, принятым допущением о том, что при симметрировании напряжения на нагрузке весьма близки к номинальным напряжениям [36]. Однако, это не вполне корректно, так как даже при полной компенсации реактивной мощности на линии будут наблюдаться некоторые потери напряжения. С другой стороны, в аналитической методике не учитывается реактивная мощность, обусловленная индуктивным характером сопротивления самих линий передач. При точном решении задачи конденсаторы компенсируют и эту реактивную мощность.

Проведенные исследования и расчеты показывают, что аналитический метод не обеспечивает точного симметрирования режима в трехфазной системе. Это объясняется неточностями в определении напряжений симметрированного режима при расчетах величин симметрирующих элементов, а также не учитываются реактивные потери в линиях электропередачи. К оптимальному решению приводит режим точной компенсации реактивной мощности во всей системе, произведенный на основе численных оптимизационных методов. Следует отметить, однако, что аналитический расчет можно использовать для определения начального приближения численного расчета, что может сократить затраты компьютерного времени для достижения оптимального решения полного симметрирования и компенсации реактивной мощности.

3.5 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SPS-МОДЕЛИ И ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В предыдущих разделах была рассмотрена возможность полной компенсации реактивной мощности и симметрирования фазных токов сети, которые были основаны на разработке специальной математической модели, реализованной с помощью программы MathCAD. Такой подход требует составления уравнений модели и реализации в ней условий полной компенсации реактивной мощности. Использование системы SimPowerSystem (SPS) позволяет исключить этап записи уравнений, поскольку при этом уравнения формируются автоматически по виду визуальной модели [66].

На рисунке 3.7 приведена компьютерная модель трехфазной системы электроснабжения при несимметричной активно-индуктивной нагрузке, реализованная в SimPowerSystem.

Модель состоит из источников напряжений, значения напряжений и токов с которых снимаются виртуальными вольтметрами и амперметрами. С измерительных приборов значения передаются на устройство расчета активной и реактивной мощностей. Значения индуктивностей, сопротивлений z_a , z_b , z_c и нагрузки z_{na} , z_{nb} , z_{nc} установлены в соответствии с вышеуказанными параметрами. Для определения влияния несимметрии на

работу системы электроснабжения в модели путем установления свойств межфазных конденсаторов Open circuit было отключено компенсирующее устройство. Модель позволяет измерять токи и напряжения, а также выводит их мгновенные значения на виртуальные осциллографы. На осциллографе Scope отображаются значения мгновенных токов сети, а на Scope1 выводятся одновременно токи и напряжения источников каждой отдельной фазы. На регистратор Display выводится среднеквадратичный функционал реактивных мощностей. Он составлен по формуле $\sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2}$, и это значение позволяет судить о величине реактивной мощности в трехфазной системе электроснабжения.

При работе модели использовался метод stiff 23s Розенброка. При этом шаг интегрирования равнялся 0,0001 с. Время прогона модели составляло 0,06 с, что является достаточным для выхода токов и напряжений на установившийся режим.

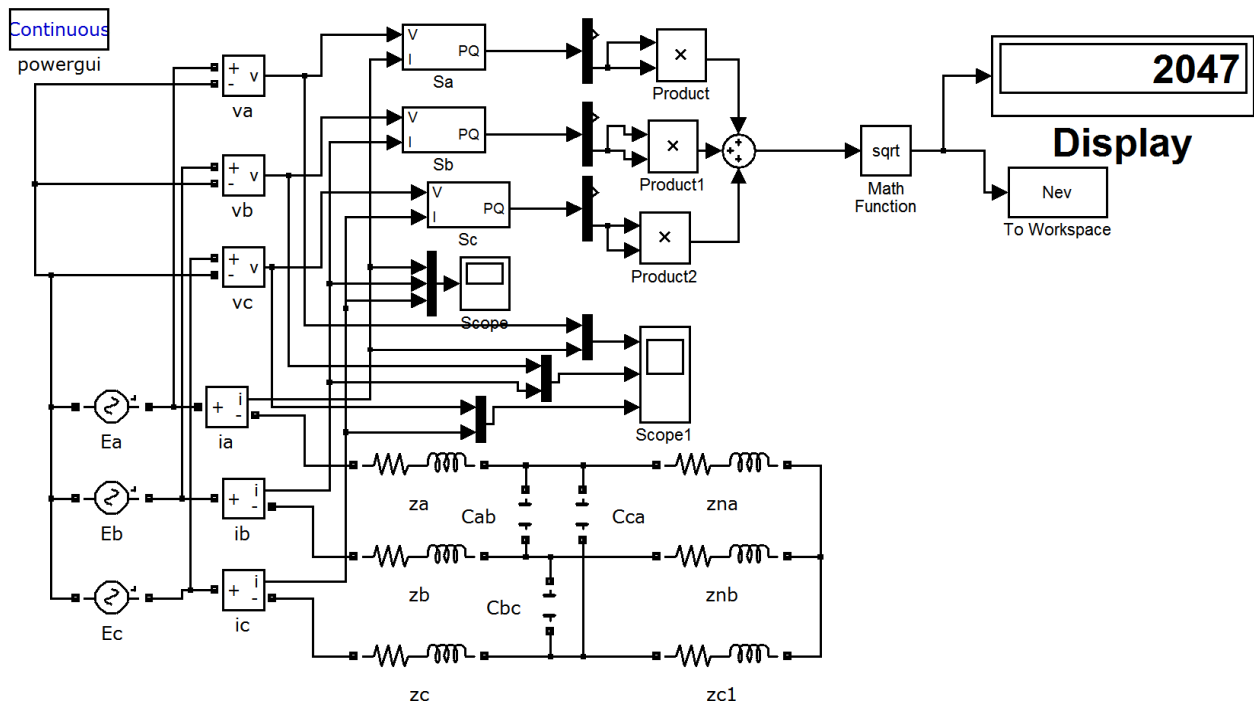


Рисунок 3.7 – Визуальная модель трехфазной системы электроснабжения в несимметричном режиме при отсутствии устройства компенсации реактивной мощности

На рисунке 3.8 приведены временные диаграммы токов в линиях электропередачи для несимметричного режима, свидетельствующие о значительных амплитудах этих токов и их существенной несимметрии: в фазах А и В амплитуды токов превышают 30 А, а в фазе С – более 10 А. Эти значения в точности совпадают с соответствующими значениями, полученными с помощью расчета в системе MathCAD, представленным в предыдущих разделах. Значение среднеквадратичного функционала достигает достаточно большой величины (2047 ВАр). Все эти показатели свидетельствуют о весьма неблагоприятном режиме работы системы электроснабжения при несимметричной нагрузке.

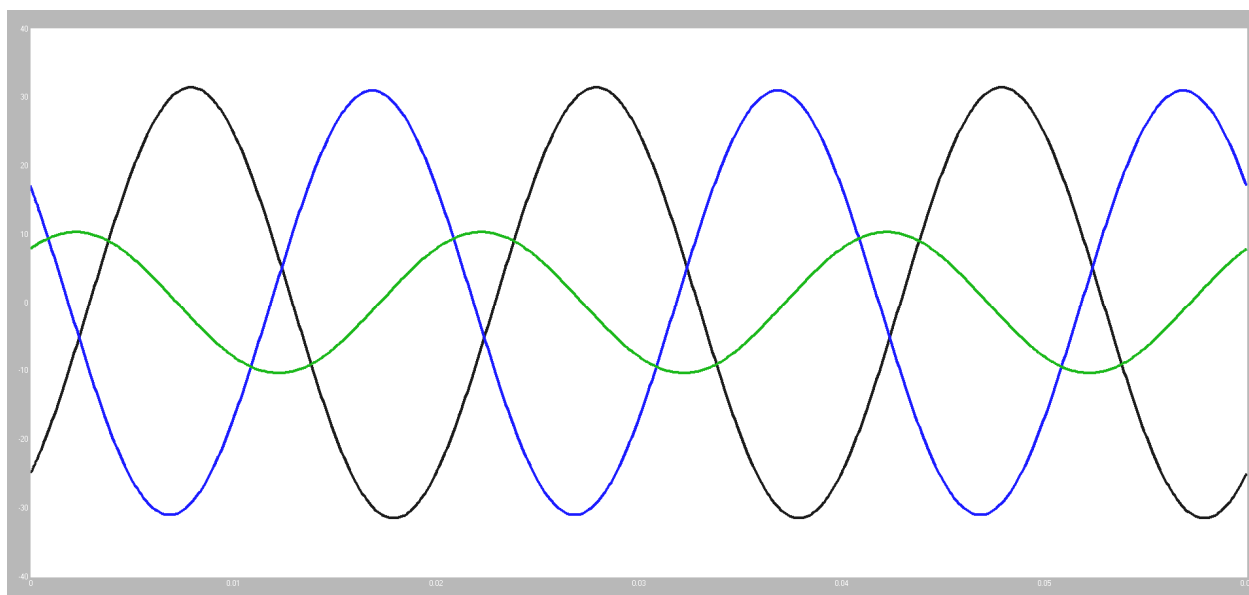


Рисунок 3.8 – Токи в фазах системы электроснабжения при отсутствии компенсации реактивной мощности

На рисунке 3.9 приведена компьютерная модель трехфазной системы электроснабжения с устройством компенсации реактивной мощности, которая позволяет определить оптимальные условия компенсации. Конденсаторы подключены к зажимам нагрузки по схеме треугольника. Емкости конденсаторов представлены переменными – C_{ab} , C_{bc} , C_{ca} . Эти параметры, с одной стороны, присутствуют в окне свойств каждого из конденсаторов, с другой – используются в программных модулях в качестве переменных оптимизации.

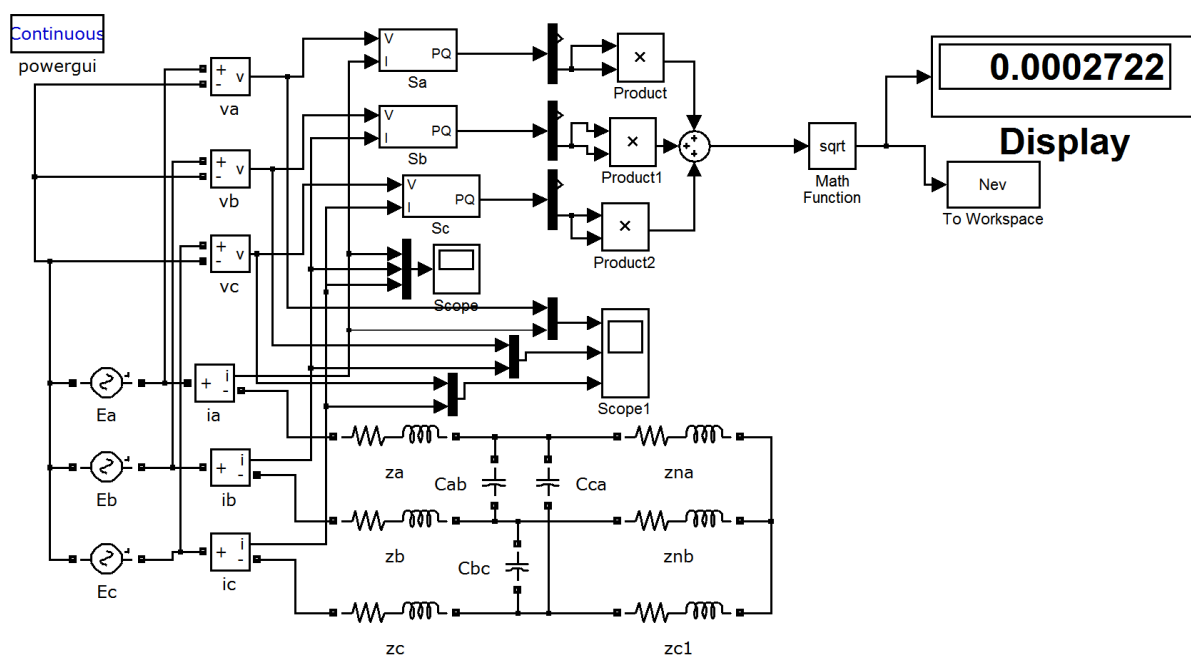


Рисунок 3.9 – Визуальная модель трехфазной системы электроснабжения с симметро-компенсирующим устройством после выполнения поисковой оптимизации

Модель работает совместно с программными модулями, написанными на языке программирования MATLAB. Содержание программных модулей представлено на рисунке 3.10.

<pre>warning off global Cab Cbc Cca Nst Nev Nst=0 Y=fminsearch('func_s3fnesim',[7 10 20]) Nst</pre>	<pre>function Nev=func_s3fnesim(x) global Cab Cbc Cca Nst Nev Cab=abs(x(1)*1E-6) Cbc=abs(x(2)*1E-6) Cca=abs(x(3)*1E-6) sim s3fnesim3 Nev Nst=Nst+1</pre>
a)	б)

Рисунок 3.10 – Тексты программ: а – вызывающая функция; б – файл-функция

Вызывающая функция объявляет глобальными все переменные, необходимые для работы модели и файл-функции, доставляющей значение целевой функции, которая подлежит оптимизации. К ним относятся параметры симметрично-компенсирующих конденсаторов, величина целевой функции Nev и количество вычислений целевой функции Nst. Далее следует вызов встроенной файл-функции *fminsearch()*, собственно и запускающей процесс поисковой оптимизации. Параметрами функции *fminsearch()* в минимальном их количестве являются имя файл-функции '*func_s3fnesim*', вычисляющей значение целевой функции, а также вектор начальных значений параметров оптимизации, которые могут задаваться произвольными значениями. В данном случае используется вектор [7 10 20].

В файл-функции значение целевой функции присваивается глобальной переменной Nev, что следует из заголовка этой функции. Строка с декларациями глобальных переменных фактически скопирована из вызывающей программы. Следующие три оператора присваивают значение вектора x, являющегося параметром файл-функции, емкостям конденсаторов, образующим симметрично-компенсирующее устройство. Как видно из текста программы, это присваивание осуществляется с коэффициентом масштабирования 10^6 . Это позволяет программе оптимизации оперировать не малыми величинами емкостей, выраженными в фарадах, а относительно большими значениями этих емкостей, выраженными в микрофарадах. Таким образом, переменные оптимизации нормируются, а в модель передаются действительные значения емкостей компенсирующих конденсаторов. Кроме того, присваиваемые значения берутся по модулю, что снимает ограничения на знак переменных оптимизации, заключенных в векторе x. Это позволяет точке поиска в программе оптимизации плавно переходить в область отрицательных значений составляющих вектора x.

После задания значений емкостей компенсирующих конденсаторов запускается визуальная модель системы электроснабжения при помощи оператора *sim s3fnesim3*, указывающего имя рабочего листа с этой визуальной моделью. В процессе работы модели осуществляется интегрирование дифференциальных уравнений системы электроснабжения,

которые автоматически формируются программой по структуре визуальной модели. По достижении конечного момента времени работы модели, вычисленное значение целевой функции N_{ev} передается в файл-функцию с помощью элемента To Workspace, далее оно поступает в вызывающую программу в распоряжение встроенной файл-функции *fminsearch()*, которая осуществляет собственно процесс оптимизации по алгоритму деформируемого многогранника [42; 67].

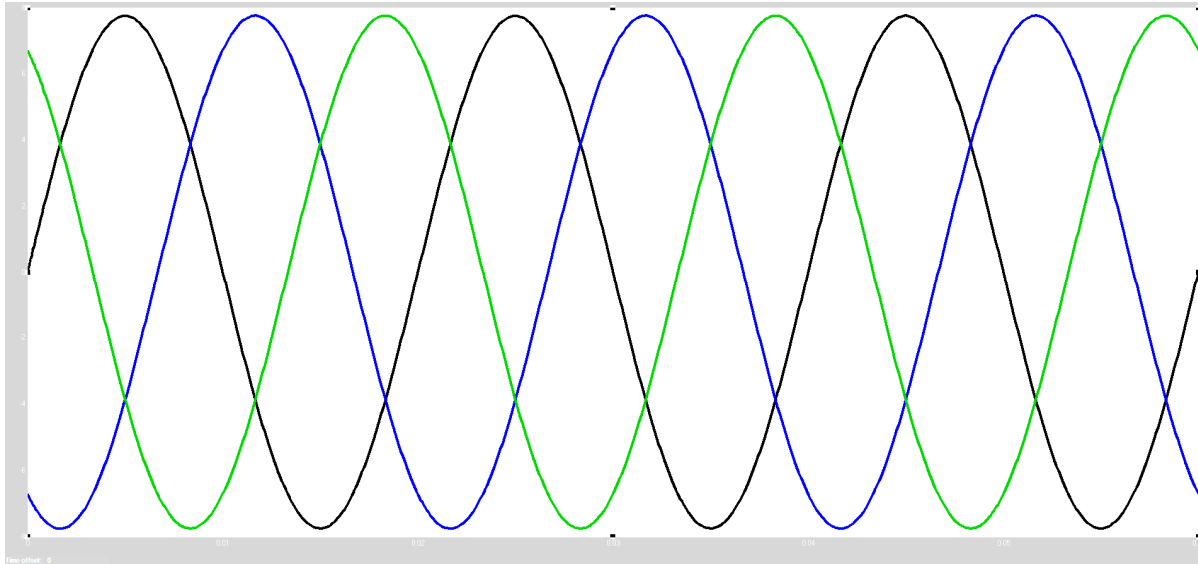


Рисунок 3.11 – Временные диаграммы фазных токов после компенсации реактивной мощности

В процессе оптимизации значение целевой функции уменьшилось до 0,0002722 ВАр. Найденные значения емкостей компенсирующих конденсаторов: $C_{ab} = 5.6209\text{E-}4$ Ф, $C_{bc} = 1.8229\text{E-}4$ Ф, $C_{ca} = 3.4461\text{E-}5$ Ф. Эти значения практически до 4-5 значащей цифры совпадают с теми значениями емкостей симметрично-компенсирующих конденсаторов, которые были вычислены с помощью MathCAD в предыдущих разделах. На рисунке 3.11 приведены временные диаграммы фазных токов в компенсированной системе, амплитуды которых совершенно одинаковы и составляют 7,754 А, что также совпадает со значениями, найденными при помощи оптимизации в системе MathCAD. Соответственно уменьшаются потери в линиях электропередачи.

В заключение можно отметить, что предложенный метод использования визуальной модели совместно с поисковой оптимизацией для точного расчета параметров устройства компенсации реактивной мощности дает возможность получить решение численными методами со сколь угодно заданной точностью. При этом не требуется предварительно составлять уравнения, описывающие модель исследуемой системы электроснабжения. Предложенная методика перспективна для исследования не только линейных систем электроснабжения, но и для систем с нелинейными элементами, в том числе и с силовыми полупроводниковыми приборами.

3.6 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИММЕТРО-КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ

Для исследования симметрично-компенсирующего устройства (СКУ) используются методы, основанные на аппарате симметричных составляющих с привлечением матричного исчисления и топологических методов, освещенные в [13; 14]. Следует отметить, что получаемые при этом математические выражения достаточно сложны, а в ряде случаев могут быть и довольно громоздкими. В ходе расчета в некоторых ситуациях может потребоваться дополнительный анализ для определения типа элемента СКУ и точек его подключения. Для таких случаев в ряде работ рекомендуется использовать с диаграммы и номограммы, что приводит к дополнительным затратам времени, а процедура проектирования становится алгоритмически прерывной. Для рассмотрения применения метода эквивалентирования нагрузки используем метод поисковой оптимизации для расчета параметров СКУ в трехфазной трехпроводной электрической системе. Применим указанное в [13; 14; 15] свойство несимметричной трехфазной нагрузки, согласно которому любую трехфазную несимметричную нагрузку можно представить в виде двух нагрузок – симметричной трехфазной нагрузки и однофазной нагрузки, подключаемой между фазами на линейное напряжение к зажимам трехфазной нагрузки. Эквивалентирование в указанных выше работах осуществляется на основе равенства симметричных составляющих путем достаточно сложных аналитических преобразований. Применение метода поисковой оптимизации [59] позволяет решить задачу определения сопротивления трехфазной симметричной и однофазной нагрузок, а также точки подключения последней. Решение задачи эквивалентирования представлено на рисунке 3.12.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ НАГРУЗКИ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ТРЕХФАЗНОЙ СИММЕТРИЧНОЙ И ОДНОФАЗНОЙ ЛИНЕЙНОЙ

$x := \text{Find}(iab, ibc, ica, ina, inb, inc, zab, zn0)$

	0	
0	16.2419351	-15.7792489i
1	$6.1503427 \cdot 10^{-7}$	$-1.6390675i \cdot 10^{-5}$
2	$-1.3842189 \cdot 10^{-5}$	$+8.723094i \cdot 10^{-6}$
x = 3	2.9143698	-9.2183214i
4	-9.6026464	+1.3303687i
5	6.6882766	+7.8879527i
6	1.8301217	+6.4988411i
7	3.1603434	+8.7890988i

$zab := x_6 = 1.8301217 + 6.49884107i$

$zn0 := x_7 = 3.160343381 + 8.789098777i$

Рисунок 3.12 – Определение эквивалента несимметричной нагрузки

Расчет эквивалента трехфазной несимметричной нагрузки в предлагаемой методике производится на основании равенства токов в линиях электропередачи исходной и эквивалентной системы, и поэтому этот расчет осуществляют вслед за расчетом несимметричного режима. Можно использовать ту же программу с той только разницей, что токи линий электропередачи будут считаться заданными и исключаящимися из числа неизвестных. Вместо них в число искомых переменных будут введены сопротивление Z_{n0} каждого сопротивления симметричной трехфазной нагрузки и сопротивление однофазной нагрузки. Вопрос о точках подключения последней легко решается путем определения по отдельности Z_{ab} , Z_{bc} и Z_{ca} на основании этой же программы. Результаты, полученные при этом, будут такими:

$$Z_{ab} = 1,83012 + j6,4988; \quad Z_{n0} = 3,16034 + j8,78909;$$

$$Z_{bc} = -6,565 - j1,656; \quad Z_{n0} = 1,810 + j2,206;$$

$$Z_{ca} = 4,735 - j4,842; \quad Z_{n0} = -0,297 + j2,906.$$

Они свидетельствуют о том, что подходящим будет первый вариант - включения однофазной нагрузки Z_{ab} , поскольку при двух других вариантах одна из действительных частей сопротивлений отрицательна, что свидетельствует о невозможности физической реализации, а в первом варианте обе действительные части положительны.

Проверим точность эквивалентирования. Для этого решим уравнения несимметричного режима, подставив найденные значения сопротивлений эквивалента в параметры системы. Результаты решения представлены на рисунке 3.13.

3. ПРОВЕРКА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ:

$x := \text{Find}(ia, ib, ic, iab, ibc, ica, ina, inb, inc)$

		0
0		19.1563188 -24.997579i
1		-25.8445809 +17.1096012i
2		6.6882622 +7.8879778i
3		16.2419351 -15.7792489i
x = 4		$6.1503427 \cdot 10^{-7}$ $-1.6390675i \cdot 10^{-5}$
5		$-1.3842189 \cdot 10^{-5}$ $+8.723094i \cdot 10^{-6}$
6		2.9143698 -9.2183214i
7		-9.6026464 +1.3303687i
8		6.6882766 +7.8879527i

ЛИНЕЙНЫЕ ТОКИ ТЕ ЖЕ , ЧТО И ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ 3-ФАЗНОЙ НАГРУЗКЕ !

Рисунок 3.13 – Проверка точности эквивалентирования нагрузки

Как видно из результатов расчета, значения токов в линиях электропередачи совпадают с точностью до седьмого знака после запятой с

результатами анализа режима в исходной схеме. Это свидетельствует о высокой точности эквивалентирования.

Рассчитаем параметры симметрично-компенсирующего устройства. После определения параметров эквивалента несимметричной трехфазной нагрузки нахождение параметров СКУ легко осуществляется с помощью эквивалентных преобразований и введения симметризирующих элементов по схеме Штейнметца [6; 8; 13]. Рабочий лист (рис.3.14) позволяет проследить последовательность расчетов. В ряде случаев осуществляется переход к проводимостям элементов, которые соответствуют параллельному соединению соответствующего резистора (его проводимость равна действительной части комплексной проводимости) и реактивного элемента (его проводимость равна мнимой части комплексной проводимости). Тип реактивного элемента определяется знаком при мнимой части проводимости: плюс соответствует конденсатору, минус – индуктивности.

На первом этапе звезда симметричной нагрузки преобразована в эквивалентный симметричный треугольник (по формулам Кеннели). Проводимость однофазной нагрузки Y_{ab} соответствует параллельному соединению индуктивности и резистора с проводимостью G_{ab} , обуславливающую активную составляющую вносимой несимметрии. Эта составляющая несимметрии далее, на втором этапе, компенсируется по схеме Штейнметца введением индуктивности L_{ca} и конденсатора C_{bc} , проводимости которых отличаются лишь знаком. Теперь схема симметрирована, и на третьем этапе рассчитываются суммарные реактивные проводимости Y_{ab} , Y_{bc} , Y_{ca} , включенные параллельно между фазами на линейные напряжения в точках подсоединения нагрузок. При суммировании в рабочем листе суммы используются сразу с необходимым обратным знаком, чтобы сразу получить реактивные проводимости конденсаторов, составляющих СКУ.

4 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СКУ:

$$z_{ab} = 1.8301217 + 6.4988411i \quad z_{n0} = 3.1603434 + 8.7890988i$$

Эквивалентный симметричный треугольник:

$$y_{n0} := \frac{1}{z_{n0}} = 0.0362275 - 0.1007508i \quad y_{nabc} := \frac{y_{n0} \cdot y_{n0}}{y_{n0} + y_{n0} + y_{n0}} = 0.0120758 - 0.0335836i$$

$$y_{ab} := \frac{1}{z_{ab}} = 0.0401481 - 0.1425676i$$

КОМПЕНСИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПО ШТЕЙНМЕТЦУ:

$$G_{ab} := \text{Re}(y_{ab}) = 0.0401481 \quad y_{Cbc} := j \cdot \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} = 0.0231795i \quad y_{Lca} := -j \cdot \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} = -0.0231795i$$

РАСЧЕТ РЕЗУЛЬТИРУЮЩИХ СИММЕТРО-КОМПЕНСИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ:

$$Y_{ab} := -j \cdot \text{Im}(y_{nabc}) - j \cdot \text{Im}(y_{ab}) = 0.1761512i \quad z_{ab} := \frac{1}{Y_{ab}} = -5.677i \quad C_{ab} := \frac{Y_{ab}}{j \cdot \omega} = 5.607 \times 10^{-4}$$

$$Y_{bc} := (-j \cdot \text{Im}(y_{nabc})) + y_{Cbc} = 0.0567631i \quad z_{bc} := \frac{1}{Y_{bc}} = -17.617i \quad C_{bc} := \frac{Y_{bc}}{j \cdot \omega} = 1.807 \times 10^{-4}$$

$$Y_{ca} := -j \cdot \text{Im}(y_{nabc}) + y_{Lca} = 0.0104041i \quad z_{ca} := \frac{1}{Y_{ca}} = -96.116i \quad C_{ca} := \frac{Y_{ca}}{j \cdot \omega} = 3.312 \times 10^{-5}$$

Рисунок 3.14 – Расчет параметров СКУ

Проверим работу рассчитанного СКУ, что осуществляется при подстановке в уравнения для расчета режима найденных сопротивлений Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} . Рабочий лист с расчетом этого режима приведен на рисунке 3.14.

5 ПРОВЕРКА СИММЕТРИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ:

$$\underline{z}_{na} := Ra + j \cdot w \cdot La = 0.7 + 1.571i \quad \underline{z}_{nb} := Rb + j \cdot w \cdot Lb = 1 + 3.142i \quad \underline{z}_{nc} := Rc + j \cdot w \cdot Lc = 2 + 12.566i$$

НАЧАЛЬНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ИСКОМЫХ ТОКОВ:

$$\underline{i}_a := 30 - j \cdot 30 \quad \underline{i}_b := -36 + j \cdot 21 \quad \underline{i}_c := 4 + j \cdot 9 \quad \underline{i}_{na} := 30 - j \cdot 30 \quad \underline{i}_{nb} := -36 + j \cdot 21 \quad \underline{i}_{nc} := 4 + j \cdot 9$$

$$\underline{i}_{ab} := j \quad \underline{i}_{bc} := j \quad \underline{i}_{ca} := j$$

РАСЧЕТ РЕЖИМА С КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ:

Given

$$e_a - e_b + z_b \cdot i_b - z_{ab} \cdot i_{ab} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_b - e_c + z_c \cdot i_c - z_{bc} \cdot i_{bc} - z_b \cdot i_b = 0$$

$$e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{ca} \cdot i_{ca} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_a - e_b + z_b \cdot i_b + z_{nb} \cdot i_{nb} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{nc} \cdot i_{nc} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$i_{na} + i_{nb} + i_{nc} = 0$$

$$i_a - i_{ab} + i_{ca} + i_{nb} + i_{nc} = 0$$

$$i_b + i_{ab} - i_{bc} - i_{nb} = 0$$

$$i_c + i_{bc} - i_{ca} - i_{nc} = 0$$

$$x := \text{Find}(i_a, i_b, i_c, i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}, i_{na}, i_{nb}, i_{nc})$$

	0
0	7.7497779-0.1288308i
1	-3.9996594-6.6429269i
2	-3.7501186+6.7717577i
3	-14.4901854+26.5761973i
4	9.7510626-0.237803i
5	-0.9314288-1.5260937i
6	21.3085345-28.2311218i
7	-28.2409074+20.1710734i
8	6.9323728+8.0600484i

$$\underline{i}_a := x_0 \quad \underline{i}_b := x_1 \quad \underline{i}_c := x_2 \quad i_a = 7.75 - 0.129i \quad i_b = -4 - 6.643i \quad i_c = -3.75 + 6.772i$$

$$\underline{i}_{na} := x_6 \quad \underline{i}_{nb} := x_7 \quad \underline{i}_{nc} := x_8 \quad i_{na} = 21.309 - 28.231i \quad i_{nb} = -28.241 + 20.171i \quad i_{nc} = 6.932 + 8.06i$$

$$\underline{i}_{ab} := x_3 \quad \underline{i}_{bc} := x_4 \quad \underline{i}_{ca} := x_5 \quad i_{ab} = -14.49 + 26.576i \quad i_{bc} = 9.751 - 0.238i \quad i_{ca} = -0.931 - 1.526i$$

РАСЧЕТ УГЛОВ МЕЖДУ ТОКАМИ И ПИТАЮЩИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ:

$$\arg(i_a) - \arg(e_a) = -0.017 \quad \arg(i_b) - \arg(e_b) = -0.018 \quad \arg(i_c) - \arg(e_c) = -0.018$$

АМПЛИТУДЫ ФАЗНЫХ ТОКОВ:

$$|i_a| = 7.751 \quad |i_b| = 7.754 \quad |i_c| = 7.741$$

КОСИНУСЫ УГЛОВ СДВИГА ФАЗНЫХ ТОКОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ:

$$\cos(\arg(x_0) - \arg(e_a)) = 0.99986185 \quad \cos(\arg(x_1) - \arg(e_b)) = 0.9998315$$

$$\cos(\arg(x_2) - \arg(e_c)) = 0.99984066$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ НАГРУЗКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА И ИСТОЧНИКОВ:

$$U_a := e_a - (r_a + j \cdot w \cdot l_a) \cdot x_0 \quad U_a = 99.185 - 2.422i \quad |U_a| = 99.214 \quad \arg(U_a) \cdot \frac{180}{\pi} = -1.399$$

$$U_b := e_b - (r_b + j \cdot w \cdot l_b) \cdot x_1 \quad U_b = -51.687 - 84.682i \quad |U_b| = 99.21 \quad \arg(U_b) \cdot \frac{180}{\pi} = -121.399$$

$$U_c := e_c - (r_c + j \cdot w \cdot l_c) \cdot x_2 \quad U_c = -47.498 + 87.103i \quad |U_c| = 99.212 \quad \arg(U_c) \cdot \frac{180}{\pi} = 118.604$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЩЕМ УЗЛЕ НАГРУЗКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА И ИСТОЧНИКОВ:

$$U_0 := U_a - z_{na} \cdot x_6 \quad U_0 = 39.923 - 16.131i \quad U_{U0} := U_b - z_{nb} \cdot x_7 \quad U_{U0} = 39.923 - 16.131i$$

$$U_{UU0} := U_c - z_{nc} \cdot x_8 \quad U_{UU0} = 39.923 - 16.131i \quad |U_0| = 43.059 \quad \arg(U_0) \cdot \frac{180}{\pi} = -22.002$$

ПОЛНЫЕ МОЩНОСТИ, ОДАВАЕМЫЕ ИСТОЧНИКАМИ ПО ФАЗАМ:

$$S_a := 0.5 \cdot e_a \cdot \overline{i_a} \quad S_a = 387.488897 + 6.441541i \quad S_b := 0.5 \cdot e_b \cdot \overline{i_b}$$

$$S_b = 387.639 + 7.117i \quad S_c := 0.5 \cdot e_c \cdot \overline{i_c} \quad S_c = 386.979 + 6.909i$$

$$\text{суммарные: } S_{sumE} := S_a + S_b + S_c = 1162.106 + 20.468i$$

МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ:

$$S_{ta} := 0.5 \cdot z_a \cdot i_a \cdot \overline{i_a} \quad S_{ta} = 3.004 + 9.437i \quad S_{tb} := 0.5 \cdot z_b \cdot i_b \cdot \overline{i_b}$$

$$S_{tb} = 3.006 + 9.445i \quad S_{tc} := 0.5 \cdot z_c \cdot i_c \cdot \overline{i_c} \quad S_{tc} = 2.996 + 9.412i$$

$$\text{суммарные: } S_t := S_{ta} + S_{tb} + S_{tc} \quad S_t = 9.006 + 28.293i$$

МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМЫЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ:

$$S_{na} := 0.5 \cdot z_{na} \cdot i_{na} \cdot \overline{i_{na}} \quad S_{na} = 437.867 + 982.572i \quad S_{nb} := 0.5 \cdot z_{nb} \cdot i_{nb} \cdot \overline{i_{nb}}$$

$$S_{nb} = 602.211 + 1891.9i \quad S_{nc} := 0.5 \cdot z_{nc} \cdot i_{nc} \cdot \overline{i_{nc}} \quad S_{nc} = 113.022 + 710.139i$$

$$\text{суммарные: } S_n := S_{na} + S_{nb} + S_{nc} \quad S_n = 1153.1 + 3584.612i \quad |S_n| = 3765.512$$

МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМЫЕ КОМПЕНСИРУЮЩИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ:

$$S_{Cab} := 0.5 \cdot z_{ab} \cdot i_{ab} \cdot \overline{i_{ab}} \quad S_{Cab} = -2600.777i \quad S_{Cbc} := 0.5 \cdot z_{bc} \cdot i_{bc} \cdot \overline{i_{bc}}$$

$$S_{Cbc} = -838.042i \quad S_{Cca} := 0.5 \cdot z_{ca} \cdot i_{ca} \cdot \overline{i_{ca}} \quad S_{Cca} = -153.619i$$

$$\text{суммарные: } S_C := S_{Cab} + S_{Cbc} + S_{Cca} \quad S_C = -3592.437i$$

ПРОВЕРКА БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ:

$$S_t + S_n + S_C = 1162.106 + 20.468i$$

$$S_{sumE} = 1162.106 + 20.468i$$

Рисунок 3.15 – Расчет режима системы с СКУ

Как видно из контрольного расчета, СКУ с рассчитанными параметрами достаточно точное: амплитуды токов в линиях электропередачи выровнялись, их амплитуды по фазам А, В, С составляют соответственно 7,751, 7,754, 7,741, а косинусы углов сдвига токов источников относительно их напряжений по значениям близки к единице: 0,99986, 0,99983, 0,99984. Незначительны также остаточные реактивные мощности, обусловленные неучетом индуктивностей линий электропередач при расчете параметров СКУ.

Таким образом, предложенный метод эквивалентирования несимметричной трехфазной нагрузки на основе поисковой оптимизации позволяет относительно просто и с достаточно высокой точностью находить требуемые параметры эквивалентных нагрузок, симметричных трехфазной и несимметричных однофазной. Далее это обстоятельство позволяет с помощью простых и наглядных преобразований полученной системы на основе формул Кеннели и Штейнметца найти параметры СКУ. Контрольный расчет показал высокую точность симметрирования и компенсации реактивной мощности.

3.7 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НА МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОВ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

В предыдущих разделах показано, каким образом можно решать задачи компенсации реактивной мощности используя поисковую оптимизацию. В этих работах используются модели несимметричных трехфазных систем с симметрирующими устройствами, подключаемыми к зажимам нагрузки. Задача определяется как оптимизационная, где переменными параметрами оптимизации служат величины параметров симметрирующих элементов. Критерием оптимизации является сведение к нулю реактивных мощностей, потребляемых от источников электрической энергии. В модели такие измерения произвести не трудно, поскольку к ней можно подключить требуемые виртуальные приборы на зажимах генераторов электрической энергии. На практике не все требуемые измерения доступны потребителю электрической энергии. Ему доступна лишь та часть системы, которая непосредственно составляет нагрузку. Кроме того, в руководящих указаниях нормируется только коэффициент несимметрии для напряжений на зажимах потребителя, именно его предельные значения (2 -4) % должны обеспечиваться при потреблении электроэнергии несимметричными нагрузками.

Рассмотрим вопросы разработки метода оптимизации режима несимметричной трехфазной трехпроводной системы электроснабжения на визуальной модели с поисковой оптимизацией, когда целевая функция формируется путем измерений на стороне нагрузки при помощи фильтра симметричной составляющей обратной последовательности.

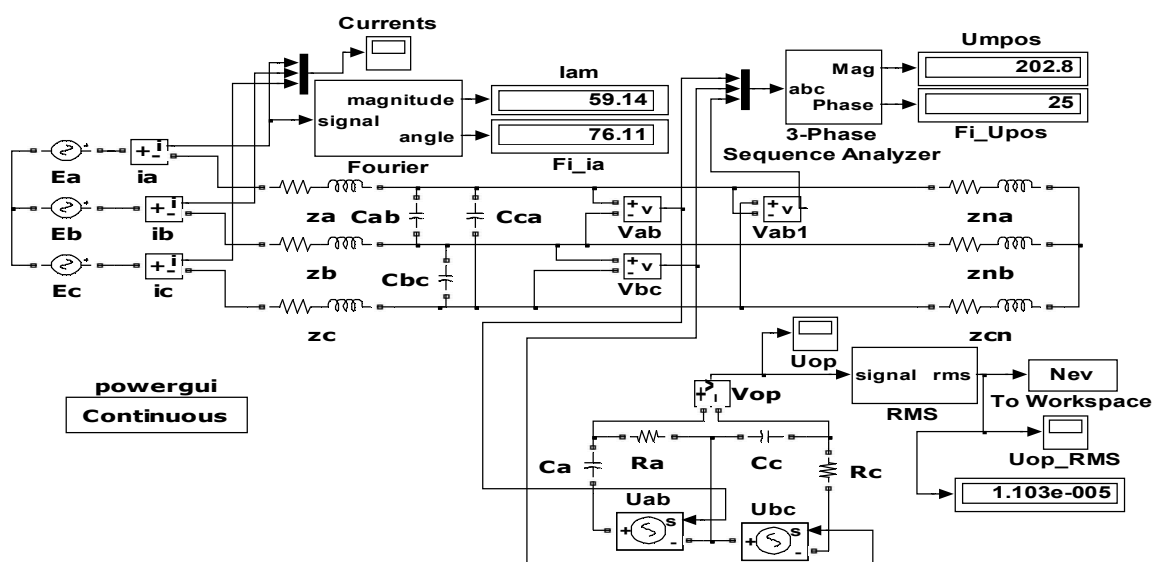


Рисунок 3.16 – Визуальная модель обобщенной трехфазной системы электроснабжения

Проанализируем обобщенную несимметричную трехфазную трехпроводную систему с заданными параметрами, величины которых указаны в предыдущих разделах. Её визуальная модель в системе

SimPowerSystem представлена на рисунке 3.16. Для измерения симметричной составляющей обратной последовательности трехфазного напряжения на зажимах нагрузки к ним подсоединен фильтр обратной последовательности. Выбрана схема резистивно-емкостного фильтра, представленная на рисунке 3.16 элементами C_a , R_a , C_c , R_c . Расчет параметров элементов фильтра осуществлен с помощью системы компьютерной математики MathCAD. Для частоты питающих напряжений получены следующие параметры выбранного фильтра, удовлетворяющие условие выделения напряжения обратной последовательности при полном подавлении напряжения прямой последовательности: $C_a = 5,513289$ мкФ; $C_c = 3,183099$ мкФ; $R_a = 1000$ Ом; $R_c = 577,350269$ Ом.

Во избежание непосредственного влияния элементов фильтра обратной составляющей на процессы в силовой части схемы и искажения результатов исследования в модели фильтр не подключен непосредственно к зажимам нагрузки. Рационально подключить фильтр к трем зажимам, повторяющим линейные напряжения на нагрузке при помощи зависимых источников напряжения U_{ab} и U_{bc} (рис. 3.16), которые управляются сигналами от виртуальных измерителей напряжений V_{ab} и V_{bc} . В модели выходное напряжение фильтра измеряется виртуальным вольтметром V_{or} и подается на измеритель действующего значения RMS . Сигнал с выхода последнего прибора используется в качестве значения целевой функции при оптимизации.

Программа оптимизации `fminsearch` представляет собой встроенную в MATLAB функцию, которая в качестве обязательных параметров включает имя файл-функции, доставляющей значение целевой функции. Файл-функция содержит вызов модели, составленной на рабочем листе с помощью элементов библиотеки SimPowerSystem. Для того чтобы связать переменные оптимизации и значение целевой функции в модели, файл-функции и основной программе, эти переменные объявлены глобальными. От модели с именем `s3fnesim3FOP_CSofV` в программе значение целевой функции, объявленное именем `Nev`, передается в рабочее пространство MATLAB посредством специального блока `To Workspace`. Тексты вызывающей программы и файл-функции представлены на рисунке 3.17, а и б соответственно. По завершении оптимизации определенные значения переменных оптимизации и целевой функции могут быть прочитаны из рабочего пространства с необходимым количеством значащих цифр.

```
warning off
global Cab Cbc Cca Nst Nev
Nst=0
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[700 1000 200])
Nst
```

а

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global Cab Cbc Cca Nst Nev
Cab=abs(x(1)*1E-6)
Cbc=abs(x(2)*1E-6)
Cca=abs(x(3)*1E-6)
sim s3fnesim3FOP_CSofV
Nev
Nst = Nst+1
```

б

Рисунок 3.17 –Тексты программ: а – вызывающая функция;
б – файл-функция

Необходимо заметить, что в общем случае симметрирование системы электроснабжения может быть достигнуто при множестве сочетаний параметров симметрирующего устройства. Достижимые значения параметров оптимизации определяются начальными значениями вектора переменных оптимизации. Процесс оптимизации определяется алгоритмом оптимизации по методу деформируемого многогранника и рассматривается как случайный. В таблице 3.1 представлены результаты оптимизации для случаев трех вариантов начальных значений вектора переменных оптимизации.

Таблица 3.1 – Результаты оптимизации в зависимости от начальных значений вектора переменных оптимизации

Номер варианта	1 вариант	2 вариант	3 вариант
Начальные значения вектора x (мкФ)	[7, 10, 12]	[70, 100, 120]	[700, 1000, 1200]
Ёмкости симметрирующих конденсаторов: – C_{ab} ; – C_{bc} ; – C_{ca}	213,6047; 433,7939; 285,9409	553,6363; 173,8255; 25,2725	1089,6738; 709,8629; 562,0100
Амплитуда и фаза тока в фазе А: – I_{Am} (А); – φ_A (эл. град.)	25,91; 68,93	7,756; –5,814	59,14; 76,11
Амплитуда и фаза прямой составляющей линейного напряжения на нагрузке: – $U_{ЛПР}$ (В); – $\varphi_{ЛПР}$ (эл. град.)	185,4; 27,03	171,5; 28,64	202,8; 25,00
Амплитуда обратной составляющей линейного напряжения на нагрузке	8,18E-6	6,943E-6	9,982E-6
Ёмкости конденсаторов при двухконденсаторном симметрировании: – C_{ab} ; – C_{bc}	527,6638; 147,8530	527,6638; 147,8530	527,6638; 147,8529

Моделирование осуществлялось с помощью метода ode23 (stiff/Mod. Rosenbrock) при максимально допустимом шаге интегрирования –0,0001 с. Модель, представленная на рисунке 3.16, показывает состояние приборов после оптимизации для третьего варианта. Следует заметить, что симметрирование при полной компенсации реактивной мощности соответствует варианту параметров $C_{ab} = 562,1295$ мкФ; $C_{bc} = 182,3177$ мкФ; $C_{ca} = 34,465$ мкФ. Для этого случая амплитуды токов в проводах линии электропередачи минимальны и составляют 7,754 А, а все линейные токи абсолютно совпадают с фазными напряжениями источников электрической энергии, что соответствует единичному коэффициенту

мощности [73]. Сравнивая результаты оптимизации, можно заметить, что наиболее близким к варианту симметрирования с полной компенсацией реактивной мощности является второй вариант, который характеризуется наименьшими значениями угла сдвига тока и его амплитуды. Остальные варианты обеспечивают симметрирование с перекомпенсацией режима по реактивной мощности. Для этих вариантов характерен опережающий угол тока в линиях электропередачи и значительные величины ёмкостей компенсирующих конденсаторов по сравнению с вариантом полной компенсации реактивной мощности. Амплитуды линейных напряжений на нагрузке возрастают и превышают аналогичные напряжения в начале линии электропередачи.

Для приведения системы к оптимальному режиму предложен метод вращения векторов токов в линиях электропередачи. Вращение осуществляется путем изменения величин емкостей батарей конденсаторов на одну и ту же величину. Поскольку реактивная мощность компенсирующего устройства изменяется на одну и ту же величину по каждой фазе, то симметрия токов в линиях электропередачи не нарушается. Идентификацию наступления оптимального режима при полной компенсации реактивной мощности можно осуществлять несколькими способами: измерять реактивные мощности, отдаваемые каждым источником энергии – в оптимальном режиме они должны стать равными нулю; определять оптимальный режим, наблюдая за уменьшением до нуля абсолютной величины угла сдвига тока в линии по отношению к соответствующему фазному напряжению. В оптимальном режиме амплитуда каждого линейного тока становится минимальной, что и свидетельствует о входе системы электроснабжения в оптимальный режим. Последний способ является наиболее приемлемым с точки зрения практической реализации, поскольку он предполагает минимальный объем измерений.

Граничным случаем вращений векторов линейных токов является уменьшение до нуля величины ёмкости симметрирующего конденсатора с минимальной ёмкостью. Этот конденсатор, таким образом, исключается из симметрирующего устройства, и система работает в симметричном режиме с двухконденсаторным симметрирующим устройством. Расчет ёмкостей двухконденсаторного симметрирующего устройства осуществляется вычитанием из величин ёмкостей трехконденсаторного симметрирующего устройства ёмкости конденсатора с минимальной ёмкостью. Результаты таких расчетов для всех трех вариантов приведены в последней строке таблицы 3.1. Расчет параметров двухконденсаторного симметрирующего устройства для оптимального режима дает точные результаты: $C_{ab} = 527,6645$ мкФ; $C_{bc} = 147,8527$ мкФ. Как видно из сравнения, полученные результаты совпадают с точностью до шестой значащей цифры. Проверка на модели режимов с двухконденсаторным симметрирующим устройством подтвердила высокую точность расчёта симметричного режима в системе электроснабжения.

В заключение нужно заметить, что предложенный метод расчета оптимального режима в несимметричной трехфазной системе электроснабжения на основе применения визуальной модели и методов оптимизации позволяет избежать сложных аналитических расчетов, а также неточных графических вычислений. Реализация предложенного метода осуществляется с помощью простых средств моделирования и относительно несложного дополнительного программного обеспечения, которое можно легко модифицировать. Компьютерные эксперименты подтвердили высокую надежность и довольно быструю сходимость процесса оптимизации к решению независимо от начальных условий оптимизации. Применение фильтров симметричных составляющих – эффективное и простое средство для вычисления целевой функции оптимизации. При этом в модели исключается влияние самого фильтра с помощью зависимых источников напряжения. С помощью простого и эффективного приема поворота векторов линейных токов можно перейти от симметричного режима к режиму полной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения. Для этого достаточно изменить параметры симметрирующего устройства на одну и ту же величину одновременно. Тем самым минимизируются потери в системе электроснабжения и повышается ее коэффициент полезного действия.

3.8 РАСЧЕТ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ ПО КРИТЕРИЮ ВЫРАВНИВАНИЯ ПИТАЮЩИХ ТОКОВ

Несимметричные потребители создают целый ряд проблем, связанных с неравномерностью нагрузки отдельных фаз системы электроснабжения. Это вызывает так называемый перекося фаз, что может негативно воздействовать на других потребителей. Кроме того, несимметрия нагрузки приводит к изменению фазовых сдвигов токов фаз относительно их напряжений. В результате в системе возникает дополнительная реактивная мощность, называемая реактивной мощностью сдвига. В итоге указанные явления вызывают сверхнормативную нагрузку на линии электропередачи, что приводит к существенным потерям электроэнергии. Поэтому борьба с несимметрией в трехфазных системах – чрезвычайно актуальная проблема наряду с принятием мер по улучшению других показателей качества электроэнергии.

Для устранения несимметрии в трехфазных системах электроснабжения на клеммах нагрузки включают дополнительные симметрирующие устройства. Они предназначены для введения в систему дополнительных реактивных токов таким образом, чтобы скомпенсировать реактивную мощность сдвига. Симметрирующие устройства не должны потреблять активную мощность, создавая тем самым необратимые тепловые потери, поэтому их составляют из реактивных элементов. Расчет параметров симметрирующих устройств усложняется тем, что он в общем случае представляет собой нелинейную задачу. В ряде случаев задачу упрощают

путем неучёта некоторых факторов, например импедансов самих линий электропередач [36; 74]. Совершенствование аппаратных и программных средств вычислительной техники позволило успешно применять их для решения рассматриваемой проблемы. При этом задача определения параметров симметрирующих устройств формулируется как задача поисковой оптимизации и решается с помощью математических пакетов MathCAD и MATLAB с использованием встроенных функций оптимизации. Как показали расчеты, решение в этом случае учитывает все факторы и достигает высокой точности, что имеет значение при реализации микропроцессорных систем управления в устройствах симметрирования и компенсации реактивной мощности трехфазных систем электроснабжения.

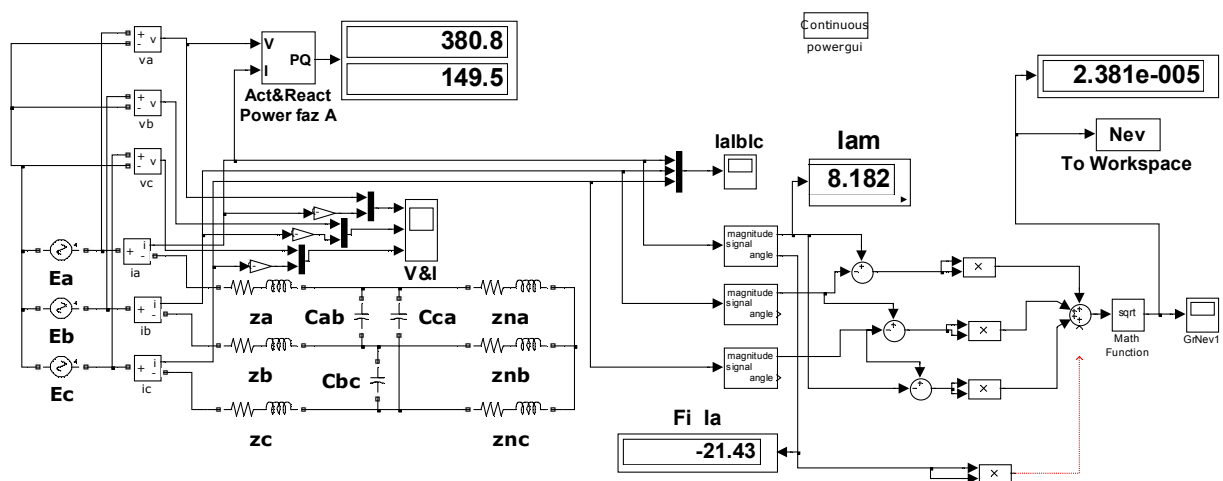


Рисунок 3.18 – Модель обобщенной трехфазной системы электроснабжения с несимметричной нагрузкой

В предыдущих разделах при решении задачи определения параметров симметрирующих устройств оптимизация осуществлялась с помощью комплексного критерия, в состав которого входили реактивные мощности, потребляемые от источников питания обобщенной трехфазной системы электроснабжения (рис. 3.18). Такой критерий является наиболее точным, поскольку именно режим работы источников электрической энергии определяет, в конечном счете, экономические затраты по генерации электроэнергии. Используемые при этом математические модели позволяют сделать доступными измерения токов и напряжений источников электроэнергии в обобщенных трехфазных системах электроснабжения, поэтому в реальных условиях в месте потребления информация о режиме генератора электроэнергии отсутствует. Принципиально она может быть получена с некоторым запаздыванием в интеллектуальной системе электроснабжения, оснащенной системами контроля и телемеханики. Однако на практике приходится довольствоваться информацией о режимах непосредственно в точках подключения нагрузки. Исходя из этих

обстоятельств, в данном разделе решается задача определения параметров симметрирующего устройства по критерию выравнивания токов в питающей линии электропередачи, а также пересчета параметров для превращения его в устройство полной компенсации реактивной мощности системы.

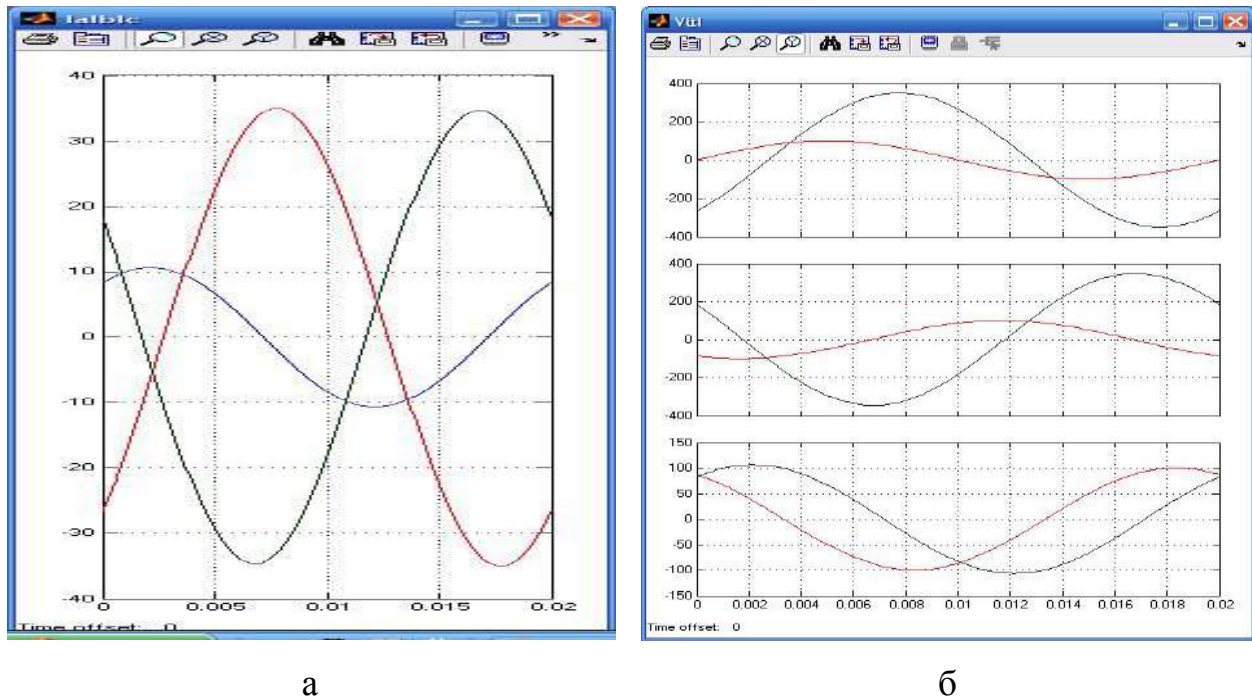


Рисунок 3.19 – Несимметричный режим: а – токи в линиях электропередачи при несимметричном режиме; б – напряжения и токи фаз А, В, С в несимметричном режиме

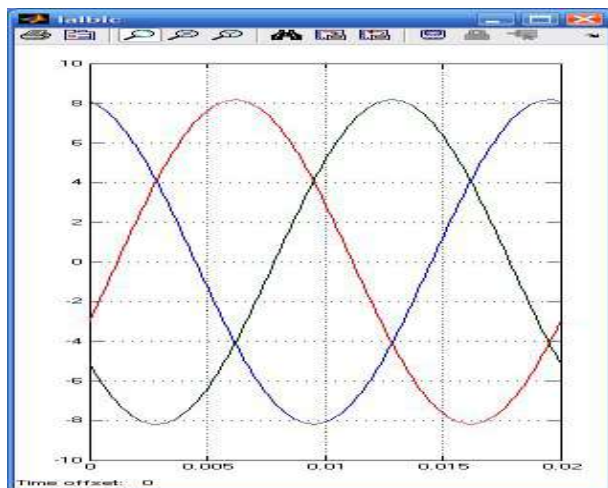
Используемая для оптимизации модель обобщенной трехфазной системы электроснабжения в системе SimPowerSystem представлена на рисунке 3.18. Три источника синусоидального напряжения представляют собою симметричную систему электропитания нормированным напряжением с амплитудой 100 В. От источников электроэнергия передаётся через симметричную линию электропередачи с активным сопротивлением $R = 0,1$ Ом и индуктивностью $L = 0,001$ Гн. Несимметричная трехфазная нагрузка характеризуется следующими параметрами: $R_a = 0,7$ Ом; $L_a = 0,005$ Гн; $R_b = 1$ Ом; $L_b = 0,01$ Гн; $R_c = 2$ Ом; $L_c = 0,04$ Гн. Временные диаграммы токов в линиях питания для случая несимметричной нагрузки (без подключения симметрирующего устройства) представлены на рисунке 3.19,а. Как видно из диаграмм, режим характеризуется проявлением существенной несимметрии. Оценивая амплитуды симметричных составляющих, установили такие значения: амплитуда тока прямой последовательности – 22,957 А, амплитуда тока обратной последовательности – 12,628 А. Кривые токов линий электропередач существенно сдвинуты относительно напряжений питающих источников (рис. 3.19,б) так, что коэффициенты мощности составляют: по фазе А – 0,608; по фазе В – 0,061; по фазе С – 0,337. Все это свидетельствует

о том, что режим потребления электроэнергии в системе весьма неблагоприятный.

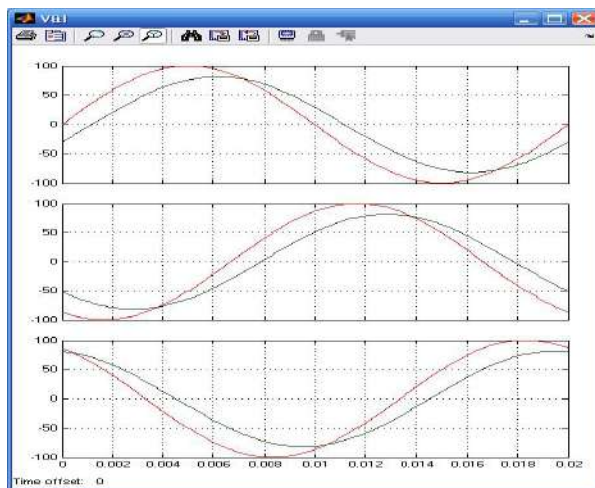
Оптимизация режима несимметричной системы осуществляется путем подавления обратной симметричной составляющей. В системе SimPowerSystem для этой цели можно использовать специальный виртуальный измеритель амплитуд симметричных составляющих. Для упрощения задачи здесь сконструирован функционал (целевая функция) для оптимизации, сведение которого к нулю должно сопровождаться уравниванием амплитуд токов в линиях. С этой целью в модели измеряются амплитудные значения токов в линиях I_A , I_B , I_C , а далее вычисляется значение шаровой метрики всех возможных разностей амплитудных значений токов в питающих линиях. Значение указанной шаровой метрики и представляет целевую функцию, определяемую таким выражением:

$$N = \sqrt{(I_A - I_B)^2 + (I_B - I_C)^2 + (I_C - I_A)^2}.$$

Значение целевой функции вычисляется непосредственно в модели и далее передаётся в рабочую область системы MATLAB с помощью виртуального прибора *To workspace* с именем Nev (рис. 3.18).



а)



б)

Рисунок 3.20 – Временные диаграммы при симметричном режиме: а – питающие токи ; б – напряжения и токи фаз А, В, С (токи в масштабе 10:1)

Из рабочей области это значение с помощью вспомогательной функции передается оптимизирующей программе, вызывающей функцию MATLAB, – `fminsearch()`. Эта функция реализует известный метод деформируемого многогранника, который является методом нулевого порядка и не требует вычисления производных. Для этой функции в качестве фактических параметров задаются имя вспомогательной функции, доставляющей значение целевой функции, а также вектор начальных значений параметров симметрокомпенсирующего устройства. Для удобства работы программы параметры нормированы и перед вызовом модели умножаются на 10^6 . Они и составляют

истинные значения емкостей конденсаторов, соединенных в треугольник и представляющих собой симметро-компенсирующее устройство. Окончание процесса оптимизации достигается после вычисления целевой функции, при котором достигается необходимая точность вычисления параметров (переменных) оптимизации, являющихся емкостями конденсаторов симметро-компенсирующего устройства.

Особенностью решения по предложенному алгоритму является то обстоятельство, что в зависимости от значений начального вектора параметров оптимизации может быть найден любой режим системы, отвечающий требованию уравнивания амплитуд питающих токов, потребляемых от источников электроэнергии. Таким образом, находится не единственный глобальный минимум, а любой локальный, к которому сводится решение при заданных начальных значениях вектора параметров оптимизации.

На рисунке 3.18 модель представлена в виде, когда была закончена поисковая оптимизация от вектора начальных значений параметров оптимизации [9 13 17]. По показаниям виртуальных приборов можно судить, что значение целевой функции составляет величину $N_{ev} = 2.381E-5$, что свидетельствует о высокой точности нахождения оптимума. Амплитуды токов во всех трех линиях составляют 8,182 А. Фаза А отдает 380,8 Вт активной мощности и 149,5 ВАр - реактивной, эти же значения характеризуют режимы электроснабжения остальных двух фаз. Наличие положительной реактивной мощности, отдаваемой источником, свидетельствует о том, что при найденных в процессе решения параметрах симметро-компенсирующего устройства компенсация реактивной мощности осуществляется не полностью. Об этом же свидетельствует и значение угла сдвига тока относительно напряжения, которое измеряется виртуальным гармоническим анализатором и составляет -21,43 эл. град. Величины емкостей симметро-компенсирующего устройства представлены вектором решения $x = [529,5539 \ 149,7699 \ 1,925]$, которые фактически представляют соответственно значения емкостей, выраженные в микрофарадах.

На рисунке 3.20, а представлены временные диаграммы токов в линиях: амплитуды всех трех токов уравнились, а синусоида тока в фазе А отстает на соответствующий угол от напряжения. На рисунке 3.20, б представлены попарно токи и напряжения всех трех фаз. Для наглядности токи увеличены на порядок. Эти диаграммы показывают, что токи незначительно отстают от напряжений, а энергетические показатели системы электроснабжения существенно улучшились: $\cos(21,43^\circ) = 0,931$, а амплитуды токов по сравнению с несимметричным режимом уменьшились в четыре раза, что существенно снизило потери в линиях электропередачи.

Для сравнения с режимом полной компенсации реактивной мощности с помощью этого же моделирующего комплекса был установлен глобальный минимум. Для этого в модели (рис. 3.18) к сумматору была подведена четвертая связь, которая изображена пунктиром. При этом в выражение целевой функции дополнительно введена составляющая, отображающая угол

сдвига тока в фазе А по отношению к фазному напряжению. Следовательно, теперь целевую функцию можно определить с помощью следующего выражения:

$$N = \sqrt{(I_A - I_B)^2 + (I_B - I_C)^2 + (I_C - I_A)^2 + \varphi_A^2},$$

где φ_A - угол сдвига тока питающего источника относительно его напряжения, измеренный с помощью настроенного на первую гармонику виртуального гармонического анализатора в электрических градусах. Поисковая оптимизация завершается лишь после того, как целевая функция сведется к нулю, для чего необходимо также, чтобы нулевым стал и фазовый сдвиг тока источника относительно его напряжения.

Данные полученного режима полной компенсации реактивной мощности будут следующими: значение целевой функции: $N_{ev} = 3,541E-5$; амплитуды токов во всех трех линиях – 7,754 А; фаза А отдает 387,7 Вт активной мощности и 0,0003402 Вар реактивной мощности, такие же значения характеризуют режимы электроснабжения обеих других фаз. Отсутствие реактивной мощности, отдаваемой источником, свидетельствует о том, что при найденных параметрах симметрично-компенсирующего устройства компенсация реактивной мощности осуществлена в полной мере. Это же подтверждает и значение угла сдвига тока относительно напряжения, которое измеряется с помощью виртуального гармонического анализатора и составляет $7,06E-7$ эл. град. Величины емкостей симметрично-компенсирующего устройства представлены вектором решения $x = [562,0871 \quad 182,3055 \quad 34,4631]$, которые фактически соответствуют значениям емкостей, выраженным в микрофарадах.

Необходимо отметить, что режим полной компенсации можно получить на основе симметричного режима, если все емкости конденсаторов симметрично-компенсирующего устройства постепенно увеличивать на одну и ту же малую величину (для достижения точности приближения). При таком «довороте» параметров симметрично-компенсирующего устройства эти параметры, в конечном счете, достигнут значений, определяющих режим полной компенсации реактивной мощности.

Исследования, приведенные в настоящей работе, показали целесообразность расчета параметров симметрично-компенсирующего устройства как задачи поисковой оптимизации с привлечением модели системы электроснабжения и оптимизирующей функции *fminsearch()*. Использование при оптимизации критерия выравнивания питающих токов позволяет упростить решение, поскольку при этом отыскивается любой локальный оптимум. Переход к режиму полной компенсации реактивной мощности системы может быть достигнут или путем усложнения целевой функции, или путем пересчета параметров симметрично-компенсирующего устройства по достаточно простому алгоритму.

4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ

4.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ SPS-МОДЕЛИ И ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Трехфазные системы электроснабжения, содержащие нулевой провод, подвержены воздействию отрицательных факторов, связанных с возникновением в системе реактивной мощности. Её наличие при линейной нагрузке связано не только с реактивным характером нагрузки, но и с наличием в нагрузке несимметрии. В частности, системы потребления электроэнергии в коммунальной сфере и в сельском хозяйстве предусматривают питание от одной из фаз трехфазной системы через нулевой провод [60]. Подключенные к отдельным фазам нагрузки, как правило, неравномерны. Это вызывает так называемый перекос фаз, который приводит не только к нерациональным режимам передачи электроэнергии, но и к опасным режимам для тех потребителей, которые чувствительны к отклонениям питающих напряжений от номинальных значений. Поэтому симметрирование режимов и компенсация реактивной мощности представляют собой чрезвычайно актуальную задачу, решение которой включает в себе важный резерв повышения энергоэффективности в целом.

Задача расчета симметрирующих устройств связана с определением как параметров их элементов, так и электрических величин, связанных с ними, поэтому в общем случае приходится решать нелинейные уравнения. Для упрощения решений нужно вводить упрощающие допущения, полагая, например, что напряжения на нагрузке и симметрирующем устройстве совпадают с напряжениями питающих источников трехфазной системы. Существенным является также вопрос о типах элементов, составляющих симметрирующее устройство. Этот вопрос должен решаться каждый раз для конкретного состава нагрузки и при этом использоваться предварительно вычисленные диапазоны симметрирования в зависимости от параметров несимметричной нагрузки. Особенно актуально это в случае четырехпроводной несимметричной системы электроснабжения, представляющей наибольшие сложности для симметрирования [13 - 20]

Между тем развитие современных вычислительных методов и средств дает возможность решения указанных задач синтеза, симметрирования и компенсации реактивной мощности с помощью численных методов, достигая при этом заданной точности [73 - 75].

Целью раздела является применение численных оптимизационных методов в сочетании с математической моделью четырехпроводной трехфазной системы электроснабжения на переменном синусоидальном токе с несимметричной нагрузкой для анализа и синтеза симметрирующего устройства, обеспечивающего одновременно и полную компенсацию

реактивной мощности в системе.

Рассмотрим обобщенную трехфазную систему электроснабжения с нулевым проводом. Источники питания представляются источниками синусоидальных напряжений с одинаковыми амплитудами ($E_m = 100$ В), с частотой 50 Гц и фазовыми сдвигами 120 эл. град. относительно друг друга. К нагрузке питание доставляется через симметричную линию электропередачи с активно-индуктивным комплексным сопротивлением ($r=0,1$ Ом; $L = 0,001$ Гн). Нагрузка соединена в звезду, которая через нулевой провод соединяется со звездой источников напряжения. Сопротивление нулевого провода принимается равным утроенному сопротивлению одной фазы линии электропередачи ($r_0 = 0,3$; $L_0 = 0,003$ Гн). Нагрузки по фазам неравномерны, и также активно-индуктивны: $R_a = 1,5$ Ом; $L_a = 0,025$ Гн; $R_b=1,0$ Ом; $L_b = 0,01$ Гн; $R_c = 2,0$ Ом; $L_c = 0,04$ Гн. Необходимо определить структуру и параметры СКУ, обеспечивающего симметрирование системы электроснабжения и полную компенсацию в ней реактивной мощности.

Для несимметричного режима модель системы электроснабжения приведена на рисунке 4.1.

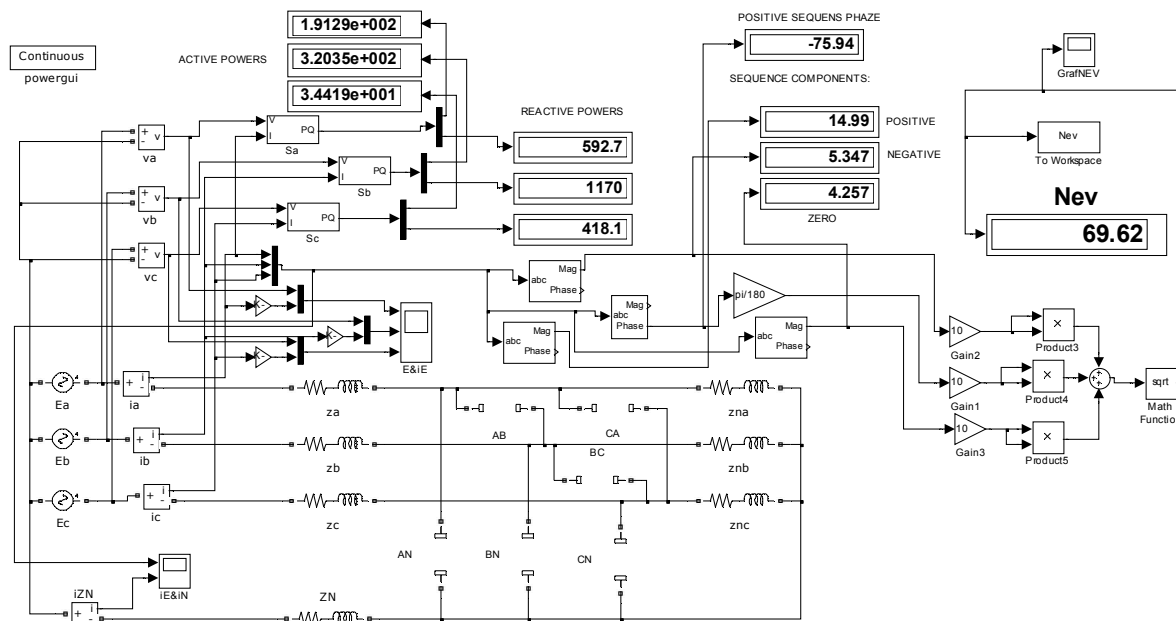


Рисунок 4.1 – Модель исследуемой системы при отсутствии симметрирующего устройства

Элементы СКУ выключены из структуры модели с помощью опции Open circuit в окне свойств каждого элемента. Приборы фиксируют параметры несимметричного режима, при котором полные мощности, отдаваемые источниками по фазам А, В и С, соответственно равны $191,29+j592,7$; $320,35+j1170$ и $34,419+j418,1$ ВА. Этот режим соответствует коэффициентам мощности по фазам соответственно: 0,307; 0,264 и 0,082. На рисунке 4.2 показаны токи в фазах А, В, С и нулевом проводе для несимметричного режима системы. Амплитуды токов в фазах составляют 12,46; 24,26 и 8,39 А соответственно. Амплитуда тока в нулевом проводе составляет 12,772 А, что сопоставимо с амплитудами токов в самих фазах.

Анализаторы симметричных составляющих токов в фазах и нагрузке дают следующие значения амплитуд прямой, обратной и нулевой симметричных составляющих: $I_1 = 14,99 \text{ A}$; $I_2 = 5,347 \text{ A}$; $I_0 = 4.257 \text{ A}$

Фазовый сдвиг прямой симметричной составляющей определяется величиной $\phi_1 = -75,94 \text{ эл. град.}$

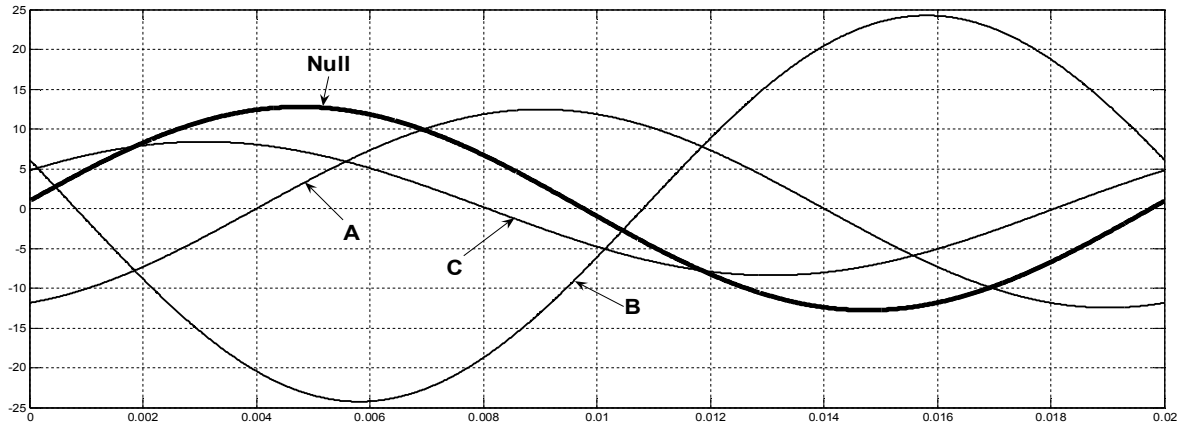


Рисунок 4.2 – Токи в фазах (A, B, C) и в нулевом проводе (Null) для несимметричного режима

Таким образом, несимметрия нагрузки обуславливает в рассматриваемой системе тяжелый режим электроснабжения, характеризующийся большой неравномерностью загрузок фаз, низкими энергетическими показателями и существенной токовой перегрузкой нулевого провода.

Поисковая оптимизация [59] предполагает использование методов оптимизации для автоматизации конструирования СКУ. С этой целью в модели, используемой в процессе поисковой оптимизации, необходимо вычислить целевую функцию. Эта функция может быть сформирована различными способами, однако в любом случае её минимизация должна привести к искомому оптимальному режиму, обеспечивающему в рассматриваемом случае симметрирование и полную компенсацию реактивной мощности. Для формирования целевой функции для системы синусоидального тока в модель введены приборы измерения симметричных составляющих, содержащиеся в библиотеке SimPowerSystem [65; 66]. Измерения токов в источниках питания (они же являются токами линий электропередачи) осуществляется при помощи виртуальных приборов измерения токов. Эти значения через мультиплексор соединяются и одной шиной подаются на три анализатора симметричных составляющих, настроенных на анализ прямой, обратной и нулевой последовательностей токов в линиях электропередачи. Для формирования целевой функции из шести получаемых выходных величин анализаторов используются лишь три: амплитуды I_2 обратной и I_0 нулевой последовательностей, а также фаза ϕ_1 прямой последовательности. Из этих величин, пронормированных с помощью коэффициентов ранжирования, конструируется целевая функция

как шаровая метрика. Значение целевой функции через рабочую область системы моделирования передается в основную подпрограмму-функцию поиска оптимального решения `fminsearch()` через блок “To workspace”, обозначенный на схеме визуальной модели Nev. В результате оптимизации значение целевой функции должно быть сведено к нулю, что возможно при условиях равенства нулю каждой из составляющих шаровой метрики. Физически это будет означать полную симметризацию системы электроснабжения и полную компенсацию в ней реактивной мощности.

В качестве параметров оптимизации должны выступать величины параметров элементов СКУ. На пути синтеза СКУ требуется решение задач структурного и параметрического синтеза [15]. Структурный анализ предполагает задание топологии СКУ с учетом зажимов подключения его к системе электроснабжения, в которой требуется обеспечить симметрирование и компенсацию реактивной мощности. В [15] показано, что для трехфазной системы электроснабжения с нулевым проводом необходимым и достаточным является пятиэлементный вариант СКУ, в котором три элемента подключаются между фазами, а остальные два – между фазами и нулевым проводом. Для определения мест подключения и типов подключаемых реактивных элементов предложены различные варианты схем и аналитические выражения, которые в зависимости от диапазонов изменения фазных углов нагрузки определяют в свою очередь диапазоны симметрирования. В предлагаемом компьютерном методе оптимизации применить аналитические формулы без потери общности невозможно. Поэтому зададимся, например, включением трех реактивных элементов между фазами и двух реактивных элементов между каждой из фаз А, В и нулевым проводом со стороны нагрузки. Будем полагать, что все пять реактивных элементов симметро-компенсирующего устройства являются конденсаторами. Проследим за процессом поисковой оптимизации, который, как указывалось ранее, должен обнаружить неправильно назначенный тип элемента путем его вытеснения. Сигналом на вытеснение элемента будет служить стремление процесса оптимизации дать параметру оптимизации предельное значение. При этом величина целевой функции перестает изменяться, не достигая своего оптимального значения. В этом случае необходимо или исключить элемент путем его разрыва (или закорачивания), или изменить тип реактивного элемента на дуальный.

После нескольких уточнений и замен реактивных элементов были получены результаты, которые характеризуются следующими параметрами симметро-компенсирующего устройства: $L_{ab} = 0,1512$ Гн; $C_{bc} = 122,67$ мкФ; $L_{ca} = 6,315$ Гн; $C_{an} = 440,13$ мкФ; $C_{bn} = 779,75$ мкФ. Величина целевой функции при этом зафиксировалась на значении 4,905, не достигнув требуемого нулевого значения. В процессе оптимизации наблюдалось увеличение параметра L_{ca} , сопротивление которого на основной частоте достигло значения 1983,915 Ом, что свидетельствует о малом потреблении электроэнергии этим элементом и о его вытеснении в процессе оптимизации. После замены этой индуктивности на конденсатор C_{ca} , зададим его начальное

значение 1 мкФ и возобновим процесс поисковой оптимизации, определив значения параметров в конечной точке последней оптимизации как начальные значения нового процесса. С учетом коэффициентов нормирования 10^{-6} и 10^{-2} для конденсаторов и индуктивностей соответственно, начальные значения параметров оптимизации задаются в виде вектора $x = [15,12 \ 122,67 \ 1 \ 440,13 \ 779,75]$.

В завершение этого, последнего процесса оптимизации получены следующие значения параметров симметро-компенсирующего устройства: $L_{ab} = 0,2356052020$ Гн; $C_{bc} = 138,547657$ мкФ; $C_{ca} = 27,3564659$ мкФ; $C_{an} = 416,3018323$ мкФ; $C_{bn} = 778,4783526$ мкФ. Величина целевой функции достигла близкого к нулю значения: $N_{ev} = 4,78E-5$, амплитуда обратной симметричной составляющей $I_{обр} = 1,299E-6$, амплитуда нулевой симметричной составляющей $I_0 = 4,534E-6$, фазовый угол прямой симметричной составляющей $\varphi_{np} = 4,415E-5$. Столь же незначительны величины реактивных мощностей, отдаваемых каждым из источников питания: $Q_a = 0,00029$ Вар; $Q_b = 0,00036$ Вар; $Q_c = 0,00016$ Вар, в то время как активные мощности, отдаваемые источниками, сравнялись и составили такие величины $P_a = P_b = P_c = 212,156$ Вт. Амплитуды токов, отдаваемых каждым из источников, равны амплитуде прямой симметричной составляющей токов в линиях электропередачи: $I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = I_{np} = 4,243$ А, и эти значения в несколько раз меньше, чем в несимметричном режиме (12,46; 24,26 и 8,39 А). Амплитуда тока в нулевом проводе равна утроенной амплитуде нулевой симметричной составляющей: $I_{nm} = 3I_0 = 13,602E-6$, что составляет близкую к нулю величину. Эти результаты свидетельствуют о высокой точности расчета параметров симметро-компенсирующего устройства и оптимального режима, возникающего при подключении этого устройства.

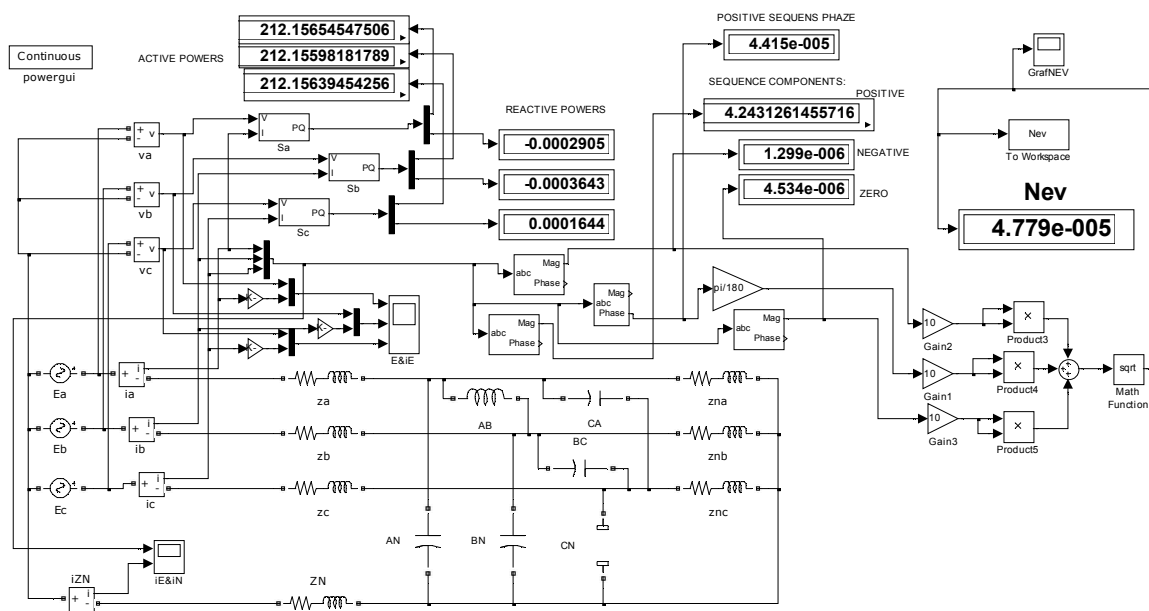


Рисунок 4.3 – Визуальная модель после завершения процесса поисковой оптимизации

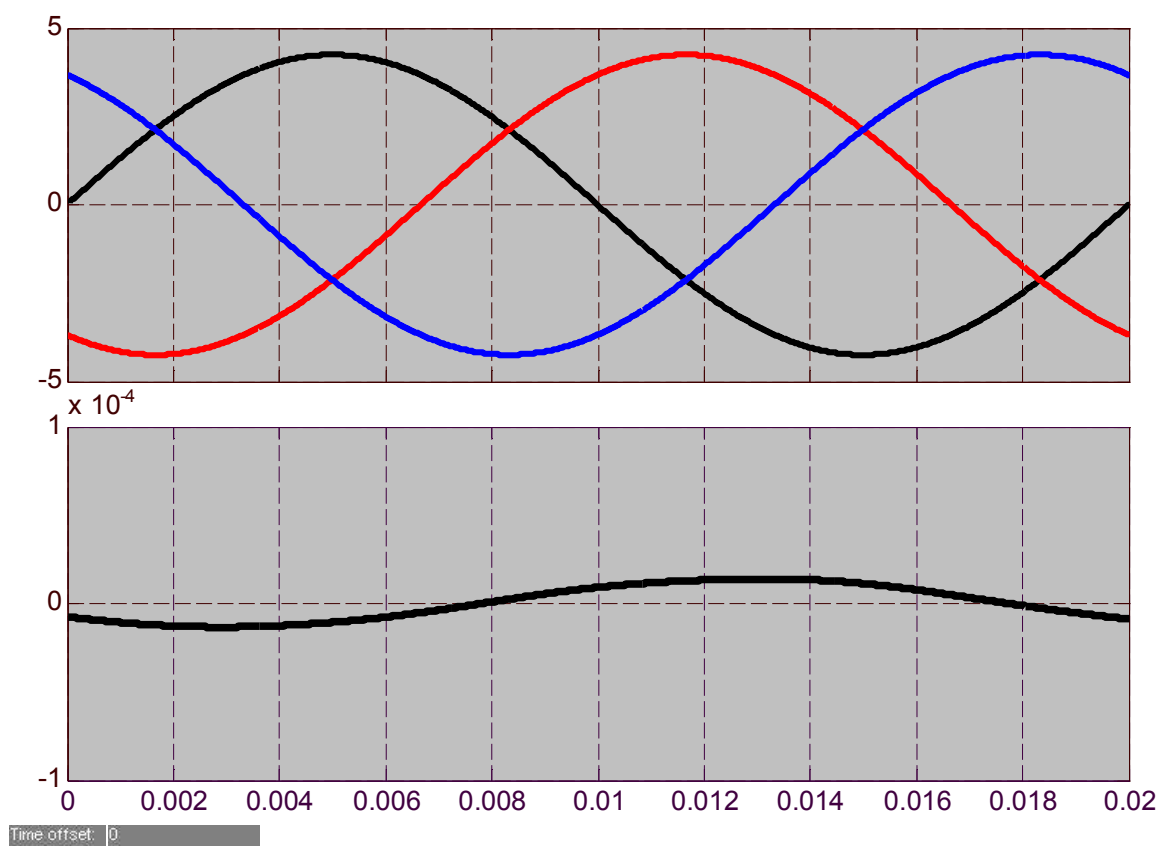


Рисунок 4.4 – Временные диаграммы линейных токов и тока в нулевом проводе

На рисунке 4.3 изображена визуальная модель системы электроснабжения с нулевым проводом и показаниями, соответствующими завершению процесса оптимизации, а на рисунке 4.4 - временные диаграммы линейных токов и тока в нулевом проводе после подключения синтезированного симметро-компенсирующего устройства.

4.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ОСВОБОЖДЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Результаты предыдущего раздела наглядно показали, что процесс поисковой оптимизации имеет замечательное свойство – в процессе расчетов адаптироваться к условиям достижения оптимума, а значения параметров элементов указывают на их соответствие условиям решения задачи. Однако использование этого свойства вынуждает разработчика активно сопровождать процесс поисковой оптимизации: он должен изменять структуру синтезируемого устройства, состава элементов, типов этих элементов, способа их включения и начальных значений параметров оптимизации, которые также влияют на траектории изображающей точки и затраты времени для достижения искомого решения.

Применение описанного выше принципа освобождения параметров оптимизации (см. 2.5) позволяет за счет увеличения числа параметров

оптимизации исключить необходимость вмешательства разработчика в процесс поисковой оптимизации и переложить весь объем вычислительной работы и принятие решений на компьютер. При достижении локального оптимума в этом случае необходимо будет пересчитать результаты в область реальных параметров.

Для освобождения параметров применительно к рассматриваемой задаче будем исходить из варианта избыточного шестиэлементного набора симметро-компенсирующего устройства, в котором три реактивных элемента включены между каждой парой фаз, а остальные три – между каждой фазой и нулевым проводом. Кроме того, следовало бы решить, какой именно тип реактивного элемента (конденсатор или катушка индуктивности) должен быть включен на каждой ветви СКУ. В рассматриваемом случае предлагается использовать искусственный прием включения в каждой ветви СКУ пары шунтирующих друг друга конденсатора и катушки индуктивностей. Они, в сущности, образуют обобщенный реактивный элемент с возможностью одновременного изменения параметров обоих элементов в процессе оптимизации. Тем самым процесс оптимизации избавляется от необходимости вмешательства в него с целью корректировки структуры или типов элементов СКУ. Разумеется, количество параметров оптимизации удваивается, однако при этом оптимальное решение может быть достигнуто при множестве сочетаний параметров каждой пары, входящей в каждый обобщенный элемент. Таким образом, процесс оптимизации завершается при достижении любого из бесконечного множества образующихся локальных минимумов. После этого решается вопрос о замене пары каждого обобщенного реактивного элемента одним реактивным элементом, тип которого легко определяется в зависимости от превалирования реактивности в заменяемом обобщенном элементе.

На рисунке 4.7 показана модель системы электроснабжения с подключённым СКУ. Оно представлено в виде шестиэлементной группы обобщенных реактивных элементов, включенных между фазами (AB, BC, CA) и подсоединенных к нулевому проводу (AN, BN, CN).

Эта модель вызывается функцией формирования целевой функции Nev, текст которой приведен на рисунке 4.5:

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global Cab Cbc Cca Can Cbn Ccn Lab Lbc Lca Lan Lbn Lcn Nst Nev
Cab=abs(x(1)*1E-6)
Lab=abs(x(2)*1E-2)
Cbc=abs(x(3)*1E-6)
Lbc=abs(x(4)*1E-2)
Cca=abs(x(5)*1E-6)
Lca=abs(x(6)*1E-2)
Can=abs(x(7)*1E-6)
Lan=abs(x(8)*1E-2)
Cbn=abs(x(9)*1E-6)
Lbn=abs(x(10)*1E-2)
```

```

Ccn=abs(x(11)*1E-6)
Lcn=abs(x(12)*1E-2)
sim s3fnesim3a
x
Nst=Nst+1

```

Рисунок 4.5 – Текст программы функции формирования целевой функции

В тексте функции параметры элементов СКУ объявлены глобальными переменными, а далее размещены операторы присваивания значений емкостей и индуктивностей с нормировочными коэффициентами 1E-6 для конденсаторов и 1E-2 для индуктивностей. Эти коэффициенты уменьшают разброс значений вектора x , который является фактическим матричным параметром для функции оптимизации.

Функция оптимизации `fminsearch()` вызывается в основной программе, текст которой приведен на рисунке 4.6.

```

global Cab Cbc Cca Can Cbn Ccn Lab Lbc Lca Lan Lbn Lcn Nst Nev
Nst=0
options=optimset('MaxFunEvals',10000,'MaxIter',10000,'TolX',1e-3,'Tolfun',1e-3);
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[100 200 100 200 100 200 100 200 100 200 100 200],options)
Nst

```

Рисунок 4.6 – Текст основной программы

Глобальные переменные повторяются, заданы опции по точности оптимизации и непосредственно осуществлен вызов функции оптимизации. Переменная Nst отслеживает число итераций при оптимизации. В процессе работы модели на интервале 0,02, максимально допустимый шаг интегрирования принимался равным 1E-5 с метод интегрирования – `ode23s` (`stiff/Mod. Rosenbrock`).

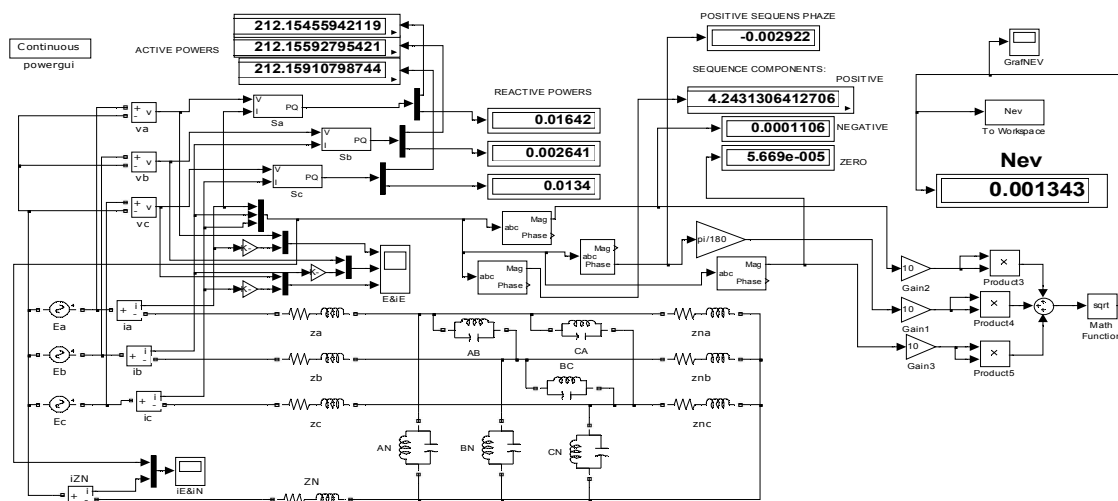


Рисунок 4.7 – Модель исследуемой системы после оптимизации СКУ

На рисунке 4.7 приборы показывают состояние системы после завершения оптимизации. Целевая функция уменьшилась от величины 69,62 при несимметричном режиме до близкого к нулю значения – 0,001343 при действии СКУ. Активные мощности, отдаваемые каждым источником питания, составляют 212,15 Вт, а их реактивные мощности – 0,01642; 0,00264 и 0,0134 Вар, то есть близки к нулю. Близки к нулю и амплитуды обратной и нулевой симметричных составляющих, а также угол сдвига прямой симметричной составляющей относительно фазы А системы питающих напряжений: $I_2 = 0,0001106$ А; $I_0 = 0,00005669$ А; $\varphi_1 = -0,002922$ эл.град.

Амплитуды токов во всех трёх фазах определяются амплитудой прямой симметричной составляющей $I_1 = 4,2431306412706$ А, они в 2 – 6 раз меньше, чем в несимметричном режиме. Ток в нулевом проводе, равный утроенной амплитуде нулевой составляющей, практически отсутствует, то есть нулевой провод полностью разгружен. Об этом же свидетельствуют временные диаграммы токов в вычисленном режиме полной симметризации и компенсации, приведенные на рисунке 4.8.

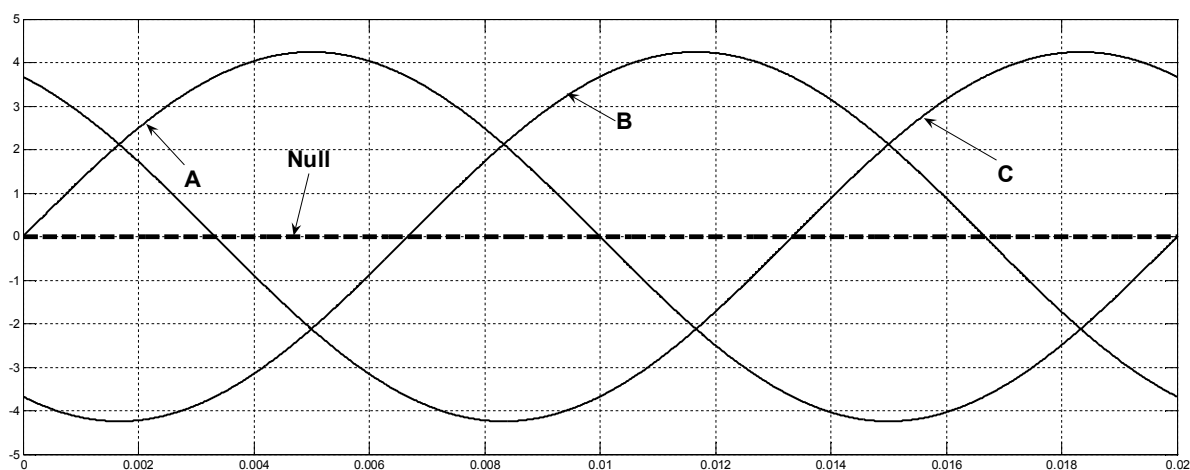


Рисунок 4.8 – Токи в фазах (А, В, С) и в нулевом проводе (Null) для скомпенсированного режима

Найденный вектор, являющийся параметром оптимизации, представлен следующими значениями: $x = [218,2532 \ 629,3048 \ 401,0210 \ 358,7305 \ -289,3894 \ 424,7741 \ -142,6967 \ 2,0050 \ -0,6514 \ 921,5297 \ -4,7847 \ 1,2928]$.

Эти значения из рабочей области перенесены в электронную таблицу 4.1, представленную ниже, с учетом указанных нормирующих коэффициентов в столбцах 1 и 2. С учётом круговой частоты рассчитаны проводимости Y_C емкостного и Y_L индуктивного элементов каждой ветви шестиэлементного СКУ с обобщенными реактивными элементами. В столбце 5 проводимости емкостной и индуктивной составляющих просуммированы, а в столбце 6 вычислены обратные им величины – сопротивления каждого обобщенного реактивного элемента. Учитывая знак сопротивления, можем заключить, что элементы АВ, ВС и СА носят емкостной характер, а АН, ВН и

CN – индуктивный (столбец 7). Параметры элементов рассчитаны и помещены в последнем столбце.

Таблица 4.1 – Параметры симметрично-компенсирующего устройства

1	2	3	4	5	6	7	8
Capacitor	Inductance	YC	YL	YC+YL	ZCL		
2.18253E-04	6.29305E+00	6.85663E-02	5.05812E-04	6.80605E-02	-14.69282	AB: C	2.166432E-04
4.01021E-04	3.58731E+00	1.25984E-01	8.87323E-04	1.25097E-01	-7.99379	BC: C	3.981966E-04
2.89389E-04	4.2477E+00	9.0914E-02	7.49363E-04	9.0165E-02	-11.09078	CA: C	2.870041E-04
1.42697E-04	2.00500E-02	4.48295E-02	1.58758E-01	-1.13929E-01	8.77743	AN: L	0.027939429
6.51400E-07	9.21530E+00	2.04643E-04	3.45415E-04	-1.40771E-04	7103.71899	BN: L	22.61183982
4.78470E-06	1.29280E-02	1.50316E-03	2.46217E-01	-2.44714E-01	4.08640	CN: L	0.01300741

Замена каждого обобщенного реактивного элемента в модели системы электроснабжения на один реактивный элемент с определенным типом элемента и его параметром даёт возможность проверить работоспособность схемы с реальными параметрами СКУ. Проведенные расчеты показали полное совпадение в этом случае результатов с найденным путём оптимизации решением. Степень совпадения определяется лишь точностью переноса значащих цифр из таблицы в модель в качестве параметров реактивных элементов шестиэлементного СКУ. Кроме того, рассматривая параметры СКУ, обратим внимание на параметры элемента, подключаемого между фазой В и нулевым проводом N: им является катушка с индуктивностью 22,61183982 Гн, её сопротивление составляет 7103,71899 Ом. Это сопротивление на три порядка превышает сопротивление других элементов СКУ, и, следовательно, этот элемент практически не влияет на работу СКУ и может быть исключён из нее. Таким образом, можем перейти к пятиэлементной схеме СКУ в соответствии с теоретическими положениями, изложенными в [15]. Нужно всё же иметь в виду, что простое исключение избыточного элемента СКУ, строго говоря, в определённой степени смещает точку решения. Так, в нашем случае расчет показал, что амплитуда прямой симметричной составляющей равняется 4,2436921965517, а целевая функция – 0,05451. Значения активных мощностей источников по фазам А, В и С составили соответственно 22,0844; 212,1842 и 212,2847 Вт, а амплитуда тока в нулевом проводе увеличилась до 0,00735 А. Столь малые отклонения обусловлены значительным сопротивлением избыточного элемента. В общем случае эти отклонения могут быть более существенными. При таком варианте уточненные значения можно получить, производя оптимизационный расчет повторно. Эта процедура упрощается тремя обстоятельствами: во-первых, структура и типы элементов уже чётко определены; во-вторых, количество параметров уменьшилось до пяти; в-третьих, найденные значения параметров уже представляют собой хорошее приближение к точке решения. Таким образом, утоняющий расчёт

выполняется достаточно быстро, без существенных затрат компьютерного времени. Для нашего примера утоняющий расчет пятиэлементного СКУ представлен следующими результатами (значения скопированы из рабочей области с максимальным количеством значащих цифр): $C_{ab}=0,000216493842415$; $C_{bc} = 0,000398047577256$; $C_{ca} = 0,000286855106222$; $L_{an} = 0,027974913313993$; $L_{cn}=0,013015028665648$.

Этот вариант симметро-компенсирующего устройства отличается по структуре и типам элементов от варианта, найденного в 4.1. Однако оптимальный режим с точки зрения основных элементов системы электроснабжения, то есть источников, линий электропередачи и нагрузки, оказался идентичным. Это свидетельствует о неоднозначности решения задачи синтеза симметро-компенсирующего устройства для трехфазной системы электроснабжения с нулевым проводом.

В заключение отметим, что предложенный метод дает возможность осуществить численное решение задачи оптимизации режима трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с помощью метода поисковой оптимизации, позволяющего не использовать сложных символьных преобразований. Сформулированы критерии оптимизации при решении задачи симметрирования и компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения, которые позволяют сформировать целевую функцию, минимизация которой приводит к решению поставленной задачи с заданной точностью. Введено понятие обобщенного реактивного элемента, использование которого в структуре симметро-компенсирующего устройства позволяет свести задачу оптимизации к нахождению лишь одного локального минимума из множества всех образующихся локальных минимумов, что облегчает нахождение оптимального решения. Предложена методика перехода от обобщенного реактивного элемента к одному элементу, тип которого определяется по преобладающей реактивности каждого обобщенного реактивного элемента. Обоснована возможность нахождения решения для случая шестиэлементного симметро-компенсирующего устройства, а избыточный реактивный элемент исключается после сопоставления величин параметров устройства. Описан процесс реализации предложенной методики, состоящий в комплексном использовании программных функций и SPS-модели системы электроснабжения, показана их взаимная связь. Проведенные расчеты продемонстрировали универсальность, работоспособность и высокую точность предложенной методики.

4.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ДЕКОМПОЗИЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

При решении задач синтеза симметро-компенсирующих устройств важно обеспечить быструю сходимость оптимизационного процесса. В значительной степени это обусловлено выбором начальных значений

переменных оптимизации. При использовании визуальных моделей к числу параметров оптимизации относят величины реактивных элементов, образующих симметрично-компенсирующее устройство. Неудачный выбор начальных значений этих параметров может привести к существенному замедлению расчета из-за прохождения овражных гиперповерхностей или вообще к заиклииванию процесса оптимизации [58; 59]. При расчетах в системе MathCAD с использованием оптимизации к числу параметров оптимизации помимо параметров симметрично-компенсирующего устройства необходимо относить также токи и напряжения, действующие во всей системе электроснабжения. Это значительно увеличивает количество оптимизируемых параметров, а следовательно, и их начальных значений. В таком случае эти значения представляются комплексными числами, что также затрудняет выбор начальных значений. Неудачное присваивание начальных значений в этом случае приводит к отказу со стороны системы MathCAD выдавать какое-либо решение вообще. Этот случай усугубляется невозможностью проследить ход процесса оптимизации с целью коррекции начальных значений. Например, простая замена комплекса сопротивления нагрузки в фазе А с целью симметрирования и компенсации реактивной мощности уже приводит к необходимости искать другие начальные условия, то есть к отказу программы MathCAD выдавать решение.

Для облегчения решения задачи определения начальных значений параметров оптимизации предлагается следующий подход. Приблизительно можно считать, что напряжения на точках подключения нагрузки равны напряжениям, вырабатываемым генераторами электрической энергии. Действительно, как показали расчеты на обобщенной схеме, в симметричном режиме потери напряжения составляют около 0,75 %, в то время как в несимметричном режиме они составляли до 10 %. Знания напряжений на нагрузке позволяют найти токи через ветви трехфазной нагрузки, которые и можно принять как начальные приближенные значения. Для определения начальных значений токов в линиях нагрузки необходимо воспользоваться тем, что они должны быть сдвинуты друг относительно друга на 120 эл. град.

Развитие этой концепции привело к разработке алгоритма предварительного точного расчета симметрированного режима без подключения симметрично-компенсирующего устройства. Этот алгоритм базируется на декомпозиции системы электроснабжения. Рассмотрим согласно предложенному алгоритму систему электроснабжения, в которой источник питания с линией электропередачи, нагрузка и симметрично-компенсирующее устройства отделены друг от друга. Такую декомпозицию осуществим в узлах присоединения нагрузки и симметрично-компенсирующего устройства к сети путем разрезания этих узлов. При этом на первом этапе рассчитаем симметричный режим без учета влияния симметрично-компенсирующего устройства. Алгоритм расчета включает такие этапы:

1. Зададим начальное значение амплитуды тока в линии электропередачи фазы А, учитывая при этом нулевой фазовый угол тока этой фазы.

2. Токи двух других фаз можно выразить посредством оператора a сдвига на 120 эл. град.

3. Напряжения фаз на конце линии электропередачи вычисляем, вычтя из напряжений источников фазных напряжений падение напряжений на самой линии электропередачи, поскольку токи в них определены, а комплексные сопротивления самих линий электропередачи считаются заданными.

4. Эти напряжения считаем приложенными к трехфазной нагрузке, хотя нагрузки и отделены от системы питания.

5. Рассчитаем токи в фазах нагрузки, предварительно определив потенциал общего узла нагрузки (в случае соединения нагрузки по схеме звезды).

6. Уточним решения, исходя из уравнения баланса активных мощностей, отдаваемых источниками напряжения, питающими систему электроснабжения и потребляемых остальными частями – линией электропередачи и нагрузкой.

Описанный алгоритм можно реализован для трехфазной системы электроснабжения без нулевого провода на основе визуальной модели представленной на рисунке 4.9.

В левой части модели сосредоточены источники электрической энергии в виде источников напряжения синусоидального напряжения. Через линию электропередачи цепь замыкается посредством источников тока, задающих токи в линиях. Достаточно подключить два источника в смежных фазах А и В, в третьей фазе – С необходимый ток будет задан автоматически. Задающие токи во всех фазах совпадают с фазами питающих напряжений и имеют одинаковую амплитуду, как и должно быть при совершенной симметрии и полной компенсации реактивной мощности. Во избежание топологических вырождений, обусловленных последовательным включением индуктивностей и источников тока, каждая из линий электропередачи представлена параллельно включенными резистором ($R = 1,0869604401 \text{ Ом}$) и индуктивностью $L = 0,0011013212 \text{ Гн}$, что соответствует эквиваленту последовательно включенного резистора 0,1 Ом и индуктивности 0,001 Гн, как это и предусмотрено в тестовой системе электроснабжения.

Правая часть питает несимметричную трехфазную нагрузку от зависимых источников напряжения, вследствие чего с одной стороны система разделяется на две части, а с другой - обеспечивается подача на нагрузку тех напряжений, которые имеют место в действительности при симметричном режиме с полной компенсацией реактивной мощности. С этой целью для обеспечения напряжений между фазами АВ и ВС достаточно установить лишь два зависимых источника напряжения. Для задания нужных напряжений в левой части установлены соответствующие измерители напряжения, сигналы с которых управляют источниками напряжения правой части, для чего подаются на управляющий вход соответствующего управляемого источника напряжения.

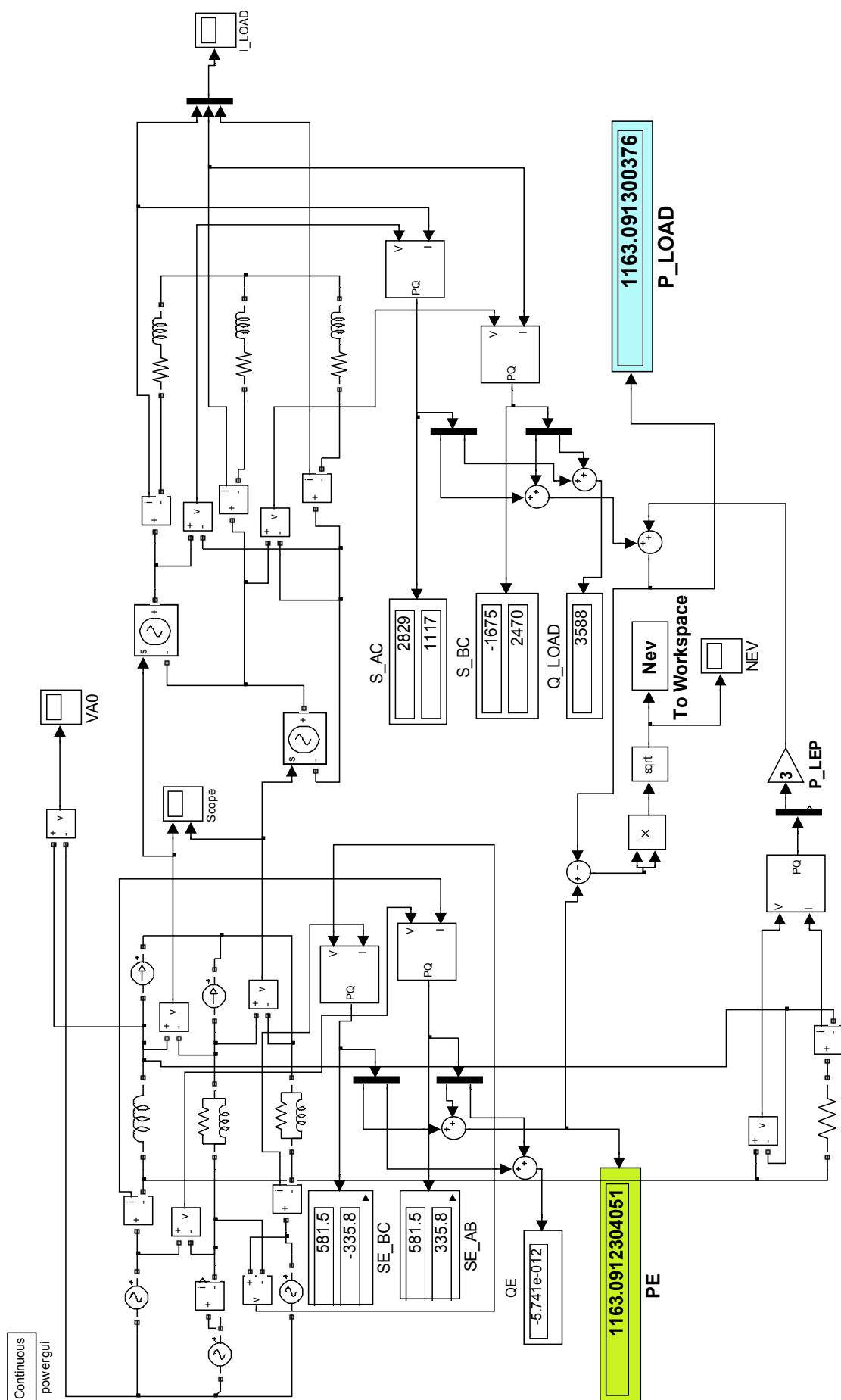


Рисунок 4.9 – Визуальная модель разделенной системы электроснабжения

Целью поисковой оптимизации является нахождение амплитуды токов, отдаваемых источниками и протекающих в линиях электропередачи, при которой удовлетворяются уравнения баланса активной мощности в системе электроснабжения. Для формирования целевой функции введены измерители мощности. На трехфазной нагрузке и на источниках питания мощности измеряются с помощью метода двух пар приборов. Вольтметры подключены на два линейных напряжения, и для измерения мощности используется ток в той фазе, которой не касается соответствующий вольтметр. Потери мощности на линии электропередачи измеряются на резисторе фазы А, действительная часть этой мощности затем утраивается, поскольку параметры схемы замещения линии электропередачи одинаковы для всех фаз. Потребляемые активные мощности суммируются, равным образом суммируются и отдаваемые активные мощности. Разница сумм и образует целевую функцию, значение которой передается программам посредством блока *To Workspace*, дающего значение глобальной переменной с именем *Nev*.

Особенностью визуальной модели, в состав которой введены зависимые источники напряжения, является то обстоятельство, что она перестает рассматриваться как линейная при том, что система не содержит ни одного нелинейного элемента. Поэтому при запуске модели система моделирования не рассчитывает установившийся режим и не подставляет в нулевой момент времени начальные значения переменных состояния, которые отвечают установившемуся значению. Поэтому приходится увеличивать время прогона модели, чтобы достигнуть установившегося режима. В нашем случае оказалось достаточным задать это время – 0,2 с, чтобы получить приемлемую точность достижения установившегося режима.

Результаты поисковой оптимизации представлены на рисунке 4.9, где модель изображена в состоянии после завершения процесса оптимизации. Активная мощность, отдаваемая источниками, составила 1163,0912304051 Вт, суммарная потребляемая активная мощность равна 1163,091300376 Вт. Значение целевой функции в конечной точке траектории процесса оптимизации составило $6,9971\text{E}-5$, что свидетельствует о высокой степени точности достижения решения. Амплитуды токов источников составляют величину 7,753941535949707 А, что практически соответствует решениям задачи поисковой оптимизации при подключении симметрично-компенсирующего устройства, где найденное значение составило 7,754045 А. Несущественное расхождение пятой значащей цифры можно еще уменьшить, если уменьшить шаг интегрирования уравнений модели и увеличить время работы модели для более точного определения параметров установившегося процесса системы электроснабжения.

Теперь, когда рассчитаны параметры режима симметрии и полной компенсации реактивной мощности, можно синтезировать само симметрично-компенсирующее устройство. Дело в том, что узлы присоединения симметрично-компенсирующего устройства при его отсутствии не уравновешены по закону Кирхгофа для токов.

Это позволяет определить токи в четырех проводах, присоединяющих симметро-компенсирующее устройство к системе электроснабжения. Токи в проводах, подходящих к фазам А, В, С, определяются разностями тока в фазном проводе линии электропередачи и тока фазного провода нагрузки. Ток в проводе, соединяющем симметро-компенсирующее устройство с нейтральным проводом, определяется суммой токов, протекающих в нагрузках при условии полной разгрузки нейтрального провода. Напряжения на фазных зажимах, к которым подключается симметро-компенсирующее устройство, были определены ранее, а напряжение на нейтральном проводе равно нулю, так как ток в нейтрали отсутствует, и потенциалы общей точки соединения источников и нагрузок одинаковы и равны нулю. Эти токи и напряжения являются исходными данными для структурного и параметрического синтеза симметро-компенсирующего устройства. Эта задача по всем показателям более проста, по сравнению с анализом и синтезом всей системы электроснабжения. Ее можно решить с помощью метода поисковой оптимизации, используя SPS-модель.

На основе изложенной теории эта задача эффективно решается и с помощью средств системы MatCAD. На рисунке 4.11 приведен рабочий лист MathCAD, представляющий полное решение задачи симметрирования и полной компенсации при заданных параметрах системы электроснабжения.

ДИАКОПТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕЖИМА

4 провода 3 фазы нулевое сопротивление справа
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

$$\begin{aligned}
 w &:= 100\pi & w &= 314.159 & j &:= \sqrt{-1} = i & a &:= \exp\left(j \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) = -0.5 + 0.866i & \text{ORIGIN} &:= 1 \\
 E_m &:= 100 & e_a &:= E_m = 100 & e_b &:= E_m a^2 = -50 - 86.603i & e_c &:= E_m a = -50 + 86.603i \\
 r_a &:= 0.1 & r_b &:= 0.1 & r_c &:= 0.1 & l_a &:= 0.001 & l_b &:= 0.001 & l_c &:= 0.001 \\
 R_a &:= 1.5 & R_b &:= 1 & R_c &:= 2 & L_a &:= 0.025 & L_b &:= 0.01 & L_c &:= 0.04 \\
 z_a &:= r_a + j \cdot w \cdot l_a = 0.1 + 0.314i & z_b &:= r_b + j \cdot w \cdot l_b = 0.1 + 0.314i & z_c &:= r_c + j \cdot w \cdot l_c = 0.1 + 0.314i \\
 z_n &:= R_a + j \cdot w \cdot L_a = 1.5 + 7.854i & z_{nb} &:= R_b + j \cdot w \cdot L_b = 1 + 3.142i & z_{nc} &:= R_c + j \cdot w \cdot L_c = 2 + 12.566i \\
 y_{na} &:= \frac{1}{z_{na}} = 0.023 - 0.123i & y_{nb} &:= \frac{1}{z_{nb}} = 0.092 - 0.289i & y_{nc} &:= \frac{1}{z_{nc}} = 0.012 - 0.078i \\
 z_N &:= 3z_a = 0.3 + 0.942i & y_N &:= \frac{1}{z_N} = 0.307 - 0.963i & \text{если нет нейтрали, то } y_N &:= 0 \\
 y_N &:= 0
 \end{aligned}$$

Часть 1. ДИАКОПТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА:

$$\begin{aligned}
 u_{00} &:= 40 + j \cdot 40 & u_{as} &:= e_a & u_{bs} &:= e_b & u_{cs} &:= e_c & u_{na} &:= e_a & u_{nb} &:= e_b & u_{nc} &:= e_c & u_{al} &:= e_a & u_{bl} &:= e_b \\
 u_{cl} &:= e_c & i_{na} &:= \frac{e_a}{z_{na}} & i_{nb} &:= \frac{e_b}{z_{nb}} & i_{nc} &:= \frac{e_c}{z_{nc}} & i_{as} &:= 0 & i_{bs} &:= 0 & i_{cs} &:= 0
 \end{aligned}$$

Given

$$\begin{aligned}
 u_{00} &= \frac{u_{al} \cdot y_{na} + u_{bl} \cdot y_{nb} + u_{cl} \cdot y_{nc}}{y_{na} + y_{nb} + y_{nc} + y_N} \\
 u_{as} &= e_a - z_a \cdot i_{as} \\
 u_{bs} &= e_b - z_b \cdot i_{bs} \\
 u_{cs} &= e_c - z_c \cdot i_{cs} \\
 u_{na} &= u_{al} - u_{00} \\
 u_{nb} &= u_{bl} - u_{00} \\
 u_{nc} &= u_{cl} - u_{00}
 \end{aligned}$$

Продолжение рисунка 4.10

$$ina = yna \cdot una \quad inb = ynb \cdot unb \quad inc = ync \cdot unc$$

$$ual = uas \quad ubl = ubc \quad ucl = ucs$$

$$ina = ias \quad inb = ibs \quad inc = ics$$

$$ina + inb + inc = yN \cdot u_{00}$$

если есть нейтральный провод и yN не нулевая

а если нет, то $yN=0$ и справа тоже будет 0, что совершенно справедливо!

$$z := \text{Find}(u_{00}, ias, ibs, ics, uas, ubc, ucs, una, unb, unc, ina, inb, inc, ual, ubl, ucl)$$

$$|z_2| = 12.456$$

$$|z_3| = 24.255$$

$$|z_4| = 8.391$$

$$|z_2 + z_3 + z_4| = 12.772$$

	1
1	-2.946-12.284i
2	3.826-11.854i
3	-23.463+6.148i
4	6.898+4.778i
5	95.893-0.017i
6	-45.722-79.846i
7	-49.189+83.958i
z = 8	98.84+12.268i
9	-42.776-67.562i
10	-46.242+96.242i
11	3.826-11.854i
12	-23.463+6.148i
13	6.898+4.778i
14	95.893-0.017i
15	-45.722-79.846i
16	-49.189+83.958i

$$I_2 := \frac{(z_2 + a^2 \cdot z_3 + a \cdot z_4)}{3} = 4.431 + 2.992i \quad |I_2| = 5.347$$

$$I_1 := \frac{(z_2 + a \cdot z_3 + a^2 \cdot z_4)}{3} = 3.641 - 14.537i \quad |I_1| = 14.986 \quad \arg(I_1) \cdot \frac{180}{\pi} = -75.94$$

Часть 2. ДИАКОПТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИММЕТРИЗИРОВАННОГО РЕЖИМА (БЕЗ ПОДКЛЮЧЕНИЯ С К У):

$$u_{00} := 40 + j \cdot 40 \quad uas := ea \quad ubc := eb \quad ucs := ec \quad una := ea \quad unb := eb \quad unc := ec \quad ual := ea \quad ubl := eb$$

$$ucl := ec \quad ina := \frac{ea}{zna} \quad inb := \frac{eb}{znb} \quad inc := \frac{ec}{znc} \quad ias := 1 \quad ibs := 1 \quad ics := 1$$

Given

$$u_{00} = \frac{ual \cdot una + ubl \cdot unb + ucl \cdot unc}{yna + ynb + ync}$$

эта формула включается в случае трехпроводной системы

если есть нейтраль, то использовать $u_{00}=0!$

$$u_{00} = 0$$

$$ics = a \cdot ias$$

$$ibs = a \cdot ics$$

$$\arg(ias) = \arg(ea)$$

$$uas = ea - za \cdot ias$$

$$ubs = eb - zb \cdot ibs$$

$$ucs = ec - zc \cdot ics$$

$$una = ual - u_{00}$$

$$unb = ubl - u_{00}$$

$$unc = ucl - u_{00}$$

$$ina = yna \cdot una$$

$$inb = ynb \cdot unb$$

$$inc = ync \cdot unc$$

$$ual = uas$$

$$ubl = ubl$$

$$ucl = ucs$$

$$\operatorname{Re}(una \cdot \overline{ina} + unb \cdot \overline{inb} + unc \cdot \overline{inc} + 3 \cdot za \cdot ias \cdot \overline{ias}) = \operatorname{Re}(3 \cdot ea \cdot \overline{ias})$$

$$z := \text{Find}(u_{00}, ias, ibs, ics, uas, ubl, ucs, una, unb, unc, ina, inb, inc, ual, ubl, ucl)$$

$$\begin{pmatrix} u_{00} \\ ias \\ ibs \\ ics \\ uas \\ ubl \\ ucs \\ una \\ unb \\ unc \\ ina \\ inb \\ inc \\ ual \\ ubl \\ ucl \end{pmatrix} := z = \begin{pmatrix} 0 \\ 4.243124285 \\ -2.1215621423 - 3.6746534218i \\ -2.1215621423 + 3.6746534218i \\ 99.5756875715 - 1.333016808i \\ -50.9422702052 - 85.5685666322i \\ -48.6334173663 + 86.9015834403i \\ 99.5756875715 - 1.333016808i \\ -50.9422702052 - 85.5685666322i \\ -48.6334173663 + 86.9015834403i \\ 2.1724248389 - 12.2634677291i \\ -29.4181681978 + 6.8513344602i \\ 6.1438337306 + 4.8479458944i \\ 99.5756875715 - 1.333016808i \\ -50.9422702052 - 85.5685666322i \\ -48.6334173663 + 86.9015834403i \end{pmatrix}$$

$$\frac{ea \cdot ias}{2} = 212.156214226 \quad ias = 4.243124285 \quad |ual| = 99.58461 \quad |ubl| = 99.58461 \quad |ucl| = 99.58461$$

Часть 3. СИНТЕЗ СИММЕТРО-КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

$u_{ab} := u_{al} - u_{bl} = 150.518 + 84.236i$
 $u_{bc} := u_{bl} - u_{cl} = -2.309 - 172.47i$
 $u_{ca} := u_{cl} - u_{al} = -148.209 + 88.235i$
 $u_{aN} := u_{al} - u_{oo} = 99.576 - 1.333i$
 $u_{bN} := u_{bl} - u_{oo} = -50.942 - 85.569i$
 $u_{cN} := u_{cl} - u_{oo} = -48.633 + 86.902i$
 $i_{as} = 4.243$
 $i_{bs} = -2.122 - 3.675i$
 $i_{cs} = -2.122 + 3.675i$
 $i_{ka} := i_{as} - i_{na} = 2.071 + 12.263i$
 $i_{kb} := i_{bs} - i_{nb} = 27.297 - 10.526i$
 $i_{kc} := i_{cs} - i_{nc} = -8.265 - 1.173i$
 $i_{N} := i_{na} + i_{nb} + i_{nc} = -21.102 - 0.564i$
 $i_{kN} := i_{N} = -21.102 - 0.564i$

Начальные значения неизвестных:

$i_{ab} := -0 = 0$ $i_{bc} := 0 = 0$ $i_{ca} := 0 = 0$ $i_{aN} := -0.0 = 0$ $i_{bN} := 0 = 0$ $i_{cN} := 0. = 0$
 $z_{ab} := j \cdot 30.0 = 30i$ $z_{bc} := j \cdot 100.0 = 100i$ $z_{ca} := j \cdot 200.0 = 200i$
 $z_{aN} := 0.0 + j \cdot 100.0 = 100i$ $z_{bN} := 0.0 + j \cdot 100.0 = 100i$ $z_{cN} := 0.0 + j \cdot 100.0 = 100i$

Given

$z_{ab} \cdot i_{ab} = u_{ab}$
 $z_{bc} \cdot i_{bc} = u_{bc}$
 $z_{ca} \cdot i_{ca} = u_{ca}$
 $z_{aN} \cdot i_{aN} = u_{aN}$
 $z_{bN} \cdot i_{bN} = u_{bN}$
 $z_{cN} \cdot i_{cN} = u_{cN}$

$i_{ab} - i_{ca} + i_{aN} = i_{ka}$
 $i_{bc} - i_{ab} + i_{bN} = i_{kt}$
 $i_{ca} - i_{bc} + i_{cN} = i_{kc}$
 $i_{aN} + i_{bN} + i_{cN} = -i_{kN}$

$\text{Re}(z_{ab}) = 0$
 $\text{Re}(z_{bc}) = 0$
 $\text{Re}(z_{ca}) = 0$
 $\text{Re}(z_{aN}) = 0$
 $\text{Re}(z_{bN}) = 0$
 $\text{Re}(z_{cN}) = 0$

$\text{Im}(z_{ab}) = 10^9$
 $\text{Im}(z_{bc}) = 10^9$
 $\text{Im}(z_{ca}) = 10^9$
 $\text{Im}(z_{aN}) = 10^9$
 $\text{Im}(z_{bN}) = 10^9$
 $\text{Im}(z_{cN}) = 10^9$

если нет нейтрали, то включить тринижних оператора!

если есть нейтраль, то 5 (из 6) верхних операторов отключить, лишь 1 оставить - там, где исключается один из 6 сим-комп элементов!

$z := \text{Find}(iab, ibc, ica, iaN, ibN, icN, zab, zbc, zca, zaN, zbN, zcN)$

$$z = \begin{pmatrix} iab \\ ibc \\ ica \\ iaN \\ ibN \\ icN \\ zab \\ zbc \\ zca \\ zaN \\ zbN \\ zcN \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 - 0i \\ 9.837132 - 0.131689i \\ -1.950386 - 3.276095i \\ 0.120314 + 8.987373i \\ 17.459474 - 10.394299i \\ 3.522122 + 1.971113i \\ 1000000000i \\ -17.532564i \\ -45.239566i \\ -11.07951i \\ -4.900982i \\ 24.673075i \end{pmatrix}$$

Часть 4. РАСЧЕТ ЁМКОСТЕЙ И ИНДУКТИВНОСТЕЙ СКУ:
(действительны лишь положительные значения!)

$$Cab := \frac{1}{j \cdot w \cdot z_7} = -3.1830988618 \times 10^{-12} \quad Lab := \frac{z_7}{j \cdot w} = 3.1830988618 \times 10^6$$

$$Cbc := \frac{1}{j \cdot w \cdot z_8} = 1.8155352999 \times 10^{-4} \quad Lbc := \frac{z_8}{j \cdot w} = -0.0558078841$$

$$Cca := \frac{1}{j \cdot w \cdot z_9} = 7.0360950935 \times 10^{-5} \quad Lca := \frac{z_9}{j \cdot w} = -0.1440020101$$

$$CaN := \frac{1}{j \cdot w \cdot z_{10}} = 2.8729600354 \times 10^{-4} \quad LaN := \frac{z_{10}}{j \cdot w} = -0.0352671748$$

$$CbN := \frac{1}{j \cdot w \cdot z_{11}} = 6.4948185484 \times 10^{-4} \quad LbN := \frac{z_{11}}{j \cdot w} = -0.0156003101$$

$$CcN := \frac{1}{j \cdot w \cdot z_{12}} = -1.2901102952 \times 10^{-4} \quad LcN := \frac{z_{12}}{j \cdot w} = 0.0785368383$$

5. ПРОВЕРКА:

$$\begin{aligned} IN &:= iaN + ibN + icN = 21.102 + 0.564i & |IN| &= 21.10945 \\ iab - ica + iaN &= 2.070699 + 12.263468i & ika &= 2.070699 + 12.263468i \\ ibc - iab + ibN &= 27.296606 - 10.525988i & ikb &= 27.296606 - 10.525988i \\ ica - ibc + icN &= -8.265396 - 1.173292i & ikc &= -8.265396 - 1.173292i \end{aligned}$$

Рисунок 4.10 – Рабочий лист MathCAD, представляющий полное решение задачи симметрирования и полной компенсации

Представленная программа является универсальной в том смысле, что она предусматривает возможность расчета симметриро-компенсирующего устройства как трехпроводной, так и четырехпроводной трехфазной системы

электроснабжения. В начале листа заданы исходные данные, причем комплексное сопротивление нейтрального провода принимается равным утроенному сопротивлению проводов линии электропередачи. Это может соответствовать случаю, когда нейтральный провод в кабеле представляет собой жилу с меньшим сечением, чем провод фаз. Если рассматривается трехпроводная система электроснабжения, то проводимость нейтрального провода y_N должна быть нулевой. Далее в первой части программы рассчитывается несимметричный режим. Уравнения, описывающие отдельные части источников и нагрузки, дополнены уравнениями связи этих частей токами и напряжениями. После нахождения решения представлены амплитуды токов в фазах и нейтральном проводе. Кроме того приведены расчеты параметров обратной и прямой симметричных составляющих, их значения полностью совпадают с результатами моделирования несимметричного режима на SPS-модели.

Во второй части программы произведен расчет параметров симметричного режима без подключения самого симметро-компенсирующего устройства. В этом случае используется диакоптический подход, и уравнения этой части отличаются от представленных в предыдущей тем, что исключены связи подсистемы источников и подсистемы нагрузки через токи. Связь через напряжения сохранена, вследствие чего напряжения на выходе автономно работающей сети передаются на нагрузки. Вначале определяется потенциал общего узла соединения ветвей нагрузки в звезду в случае трехпроводной системы электроснабжения. В четырехпроводной системе, в случае ее уравнивания, ток в нейтральном проводе отсутствует, и потенциал общего узла соединения ветвей нагрузки в звезду в этом случае должен равняться нулю.

Далее определяются условия для токов, протекающих через источники питания и линии электропередачи. Эти токи должны образовывать симметричную трехфазную систему, причем каждый из них должен совпадать по фазе с соответствующим фазным напряжением источника питания. Следующие уравнения повторяют уравнения первой части и представляют собой математическое описание поведения обеих подсистем источников с линией электропередачи и нагрузок, которые записаны в первой части программы. Однако уравнения связей токов между собой в этом случае исключены, вследствие чего и обеспечивается автономная работа подсистем, позволяющая определить симметричный режим без подключения симметро-компенсирующего устройства. Последним оператором перед получением решения записано условие баланса активных мощностей. В левой части записана суммарная активная мощность, потребляемая нагрузками и линией электропередачи, а в правой – суммарная активная мощность, отдаваемая источниками питания системы, численно равная утроенной мощности, которая отдается источником питания фазы А.

Решение помещается в переменную z , представляющую собой вектор, в котором искомые переменные размещены в том же порядке, что и в операторе *Find*. Переменная u_{00} представляет собой потенциал общего узла

соединения нагрузок в звезду. При наличии нейтрального провода этот потенциал равен потенциалу общего узла соединения источников питания в звезду, то есть нулю, что и отображено на рабочем листе. Следующей представлена переменная ias , которая является величиной амплитуды токов, отдаваемых источниками питания и протекающими в линиях электропередачи. Она равна 4,243124 А, что полностью совпадает с результатами поисковой оптимизации, осуществленной с помощью SPS-модели в предыдущем разделе. Начиная с ias , значения переменных, чьи значения найдены в результате поисковой оптимизации, расположены следующими тройками: ias , ibs , ics – токи, отдаваемые источниками питания и протекающие через линии электропередачи; uas , ubs , ucs – напряжения на концах линии электропередачи; una , unb , unc – напряжения на нагрузках (они совпадают с предыдущей тройкой напряжений); ina , inb , inc – токи, протекающие в ветвях трехфазной несимметричной нагрузки; ual , ubl , ucl – потенциалы узлов, к которым присоединяется трехфазная несимметричная нагрузка (совпадают с uas , ubs , ucs по условиям симметричного режима). Под матрицей решения приведен расчет активной мощности, отдаваемой каждым источником питания, а также значения амплитуд токов в линиях электропередачи и потенциалов узлов нагрузки. Таким образом, можно сделать вывод, что напряжения выровнялись, и потери напряжения по сравнению с несимметричным режимом значительно уменьшились.

Третья часть описываемой программы осуществляет собственно синтез симметро-компенсирующего устройства. Предварительно рассчитываются все шесть напряжений, которые прилагаются к реактивному четырехполюснику, представляющему симметро-компенсирующее устройство. К ним относятся линейные напряжения uab , ubc , uca между узлами, к которым подключаются ветви нагрузки; напряжения uaN , ubN , ucN между каждым из узлов нагрузок и нейтральным проводом.

Токи, которые должны втекать в ветви реактивного многополюсника, представляющего симметро-компенсирующее устройство, определяют на основании закона Кирхгофа. В проводниках, подсоединенных к фазам питающей системы на конце линии электропередачи, должны протекать токи, обозначенные ika , ikb , ikc . В проводнике, подсоединяющем симметро-компенсирующее устройство к нейтральному проводу, – ток ikN . Когда все токи и напряжения реактивного многополюсника будут определены, можно произвести параметрический синтез симметро-компенсирующего устройства. Для общности составим уравнения для шестиэлементного устройства, хотя для симметрирования трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения достаточно использовать пятиэлементную схему. Один из шести элементов исключим, задавая его сопротивление достаточно большим, чтобы он существенно не влиял на токи, потребляемые остальными пятью элементами симметро-компенсирующего устройства.

После задания начальных значений искомых переменных под оператором поисковой оптимизации записывается система топологических и компонентных уравнений, описывающих реактивный шестиэлементный

многополюсник симметро-компенсирующего устройства. Приравнивая к нулю мнимые части комплексных сопротивлений элементов многополюсника, исключительно реактивными элементами задаем условие его реализации. Для коэффициентов при мнимых частях можно задать их очень большими значениями 10^9 , что позволяет заблаговременно исключить их из реактивного многополюсника. Так, в случае трехпроводной системы электроснабжения необходимо разблокировать операторы, задающие равными указанной большой величине сопротивления z_{aN} , z_{bN} , z_{cN} , присоединенные к нейтрали, поскольку известно, что система симметрируется только с помощью трех реактивных элементов. При четырехпроводной системе электроснабжения достаточно разблокировать только один из шести операторов, задающих коэффициенты при мнимых частях комплексных сопротивлений симметрирующих элементов. Этот элемент и не будет принимать участия в синтезируемой схеме симметро-компенсирующего устройства. Ограничения на знак коэффициентов при мнимых частях комплексных сопротивлений элементов не вводятся, что позволяет программе правильно определить, какой именно тип элемента должен включиться на соответствующем месте. Отрицательный коэффициент соответствует емкостному характеру сопротивления, при этом варианте должен быть включен конденсатор. В противном случае необходимо включать катушку индуктивности. Результаты параметрического синтеза с помощью оператора *Find* засылаются в вектор z в той последовательности, в которой они перечислены в круглых скобках этого оператора. Здесь представлены токи и комплексные сопротивления элементов симметро-компенсирующего устройства.

В четвертой части рассчитываются параметры конденсаторов и индуктивностей симметро-компенсирующего устройства. Для каждого комплексного сопротивления элемента рассчитывается величина как индуктивности, так и емкости, причем расчет производится в комплексном виде. В связи с этим, как результат, действующий параметр получаем с положительным знаком, а неверный результат – с отрицательным. Таким образом идентифицируется тип элемента, который должен быть включен на соответствующей позиции симметро-компенсирующего устройства. По результату, отображенному на рабочем листе, видно, что элемент ab отсутствует, на позициях bc , ca , aN и bN включены конденсаторы с указанными значениями, а на позиции cN – индуктивность.

5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ИНДУКТИВНЫМИ СВЯЗЯМИ

5.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформаторы по праву считаются одним из наиболее распространенных типов оборудования, широко используемых в электроэнергетических системах передачи и распределения энергии, в силовой преобразовательной технике, в системах измерения и контроля режимов электрических систем. Моделирование электрических систем с трансформаторами - актуальное задание в плане проектирования, а также исследования режимов, протекающих в электротехнических системах и комплексах. Адекватность моделирования во многом зависит от того, насколько точно удастся отобразить свойства и характеристики реального трансформатора, преобразовав их в параметры его математической модели.

Системы с индуктивными связями широко применяются в электрических системах и комплексах. Наиболее распространенным элементом с индуктивными связями является трансформатор, без которого практически не обходится ни одна система передачи и преобразования электрической энергии. С их помощью изменяются уровни напряжений, согласуются нагрузки с сетью. Кроме того, элементы с индуктивными связями широко применяются в преобразователях электрической энергии для обеспечения работы коммутирующих узлов. Индуктивно связанные элементы применяются для выравнивания токов в отдельных ветвях вентильных комплектов, а также для уменьшения амплитуд линейных токов и симметрирования путем уменьшения нулевой симметричной составляющей с помощью так называемого нейтраллера [17].

Вопрос о параметрах схем замещения трансформаторов активно обсуждается в последнее время [61]. Это объясняется тем, что в системах моделирования электрических и электронных систем применяются различные способы представления моделей трансформаторов. Так, в системах PSPICE, Micro-CAP-V, EWB-5.12, Desigh-Lab-8.0, OrCAD-9.2 используются трансформаторы в виде катушек индуктивностей, магнитно связанных друг с другом [62; 63]. При этом задаются и параметры магнитных сердечников с учетом их свойств насыщения и гистерезиса, что имеет значение при рассмотрении, например, работы на высоких частотах и в режиме малого сигнала. При моделировании силовых электрических систем в системе Simulink [65; 66] в окно свойств модели трансформатора предлагается ввести параметры Т-образной схемы замещения трансформатора. Здесь в распоряжении пользователя имеются модели однофазного и трехфазных трансформаторов. Трехфазные трансформаторы представляются в виде совокупности трех однофазных трансформаторов. В то же время в Simulink содержатся и модели индуктивно связанных катушек.

В системе СИМПАТ [70; 71] можно вводить информацию о нескольких индуктивностях, каждая из которых индуктивно связана со всеми другими. Это позволяет, например, учесть в многофазном многообмоточном трансформаторе связи между обмотками различных сердечников трехфазного трансформатора с учетом ослабления магнитного потока за счет шунтирования третьим стержнем.

Для трансформатора обычно задаются паспортные (каталожные) данные завода-изготовителя, которые размещаются на щитке трансформатора, они также сообщаются в соответствующих справочниках [64].

В связи с этим разработчик, использующий в процессе проектирования или исследования одну из имеющихся систем моделирования электротехнических систем и комплексов, должен определить параметры трансформатора, которые предусматривает применяемая система моделирования.

Используем традиционный набор паспортных данных трансформатора:

S_H – номинальная полная мощность;

U_{1H} , U_{2H} – действующие значения первичного и вторичного номинальных линейных напряжений;

P_K , P_X – активные потери в опытах короткого замыкания и холостого хода соответственно;

e_K , i_X – напряжение и ток холостого хода, определяемые в долях от номинальных значений первичного напряжения и тока и задаваемые обычно в процентах.

m – количество фаз трансформатора;

f – частота питающего напряжения.

Для Т-образной схемы замещения трансформатора с последовательной ветвью намагничивания (рис. 5.1) расчет параметров осуществляется в следующем порядке:

1. Определяем номинальную полную мощность, приходящуюся на одну фазу:

$$S_{H1} = \frac{S_H}{m}. \quad (5.1)$$

2. Вычисляем номинальное действующее значение фазного напряжения на первичной стороне

$$U_\phi = \frac{U_{1H}}{\sqrt{m}}. \quad (5.2)$$

3. Действующее значение номинального первичного тока

$$I_{1H} = \frac{S_{1H}}{U_\phi}. \quad (5.3)$$

4. Действующее значение напряжения короткого замыкания на одной фазе:

$$U_{K3} = e_K U_{\Phi}. \quad (5.4)$$

5. В опыте короткого замыкания в первичной обмотке протекает номинальный ток, и полное сопротивление короткого замыкания

$$z_{K3} = \frac{U_{K3}}{I_{1H}}. \quad (5.5)$$

При этом через ветвь намагничивания протекает ток, который в $\frac{1}{i_x e_K}$ раз меньше номинального, и поэтому влиянием указанной ветви пренебрегаем.

6. Активное сопротивление к. з. (короткого замыкания), характеризующее омическое сопротивление проводов обмоток, определяется по тепловым потерям к. з. Мощность потерь к. з. на одну фазу.

$$P_{K1} = \frac{P_K}{m}, \quad (5.6)$$

и активное сопротивление к. з.:

$$r_{K3} = \frac{P_{K1}}{I_{1H}^2} = \frac{P_K}{m I_{1H}^2}. \quad (5.7)$$

7. Индуктивное сопротивление к. з. определяется по прямоугольному треугольнику сопротивлений:

$$x_{K3} = \sqrt{z_{K3}^2 - r_{K3}^2}. \quad (5.8)$$

8. Активное и индуктивное сопротивления распределяются поровну между первичной и вторичной сторонами с учетом приведения вторичной стороны к первичной.

$$r_1 = r'_2 = 0,5 r_{K3}; \quad x_{S1} = x'_{S2} = 0,5 x_{K3}. \quad (5.9)$$

Отсюда определяем индуктивности рассеивания первичной и вторичной обмоток:

$$L_{S1} = L'_{S2} = \frac{x_{S1}}{2\pi f} = \frac{0,5 x_{K3}}{2\pi f}. \quad (5.10)$$

Действительное значение индуктивности рассеивания вторичной обмотки

$$L_{S2} = L'_{S2} \cdot n_{21}^2 = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 L'_{S2}. \quad (5.11)$$

И ее активное сопротивление

$$r_2 = r_2' \cdot n_{21}^2 = r_1 \cdot \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2. \quad (5.12)$$

9. Ток холостого хода (далее х.х.) найдем как соответствующую долю полного тока:

$$I_{xx} = i_x \cdot I_{1H}. \quad (5.13)$$

10. Ток I_{xx} протекает в первичной обмотке при разомкнутой вторичной и при подаче от источника номинального первичного напряжения. Полное сопротивление х. х.:

$$z_{xx} = \frac{U_\phi}{I_{xx}} = \frac{U_{1H}^2}{i_x S_H}. \quad (5.14)$$

11. Активная часть r_{xx} полного сопротивления х.х. определяется тепловыми потерями при х. х. Потери х.х. на одну фазу

$$P_{x1} = \frac{P_x}{m}. \quad (5.15)$$

Поскольку при этом протекает ток I_{xx} , то активная составляющая сопротивления х. х.

$$r_{xx} = \frac{P_{x1}}{I_{xx}^2} = \frac{P_x U_{1H}^2}{i_x^2 S_H^2}. \quad (5.16)$$

12. Реактивная составляющая полного сопротивления х.х. вычисляется по треугольнику сопротивлений:

$$x_{xx} = \sqrt{z_{xx}^2 - r_{xx}^2}. \quad (5.17)$$

13. Индуктивность первичной обмотки

$$L_1 = \frac{x_{xx}}{2\pi f}. \quad (5.18)$$

14. Поскольку полное сопротивление х. х включает в себя ветвь первичной обмотки r_1 – L_{S1} и ветвь намагничивания L_μ – R_μ , можно рассчитать параметры ветви намагничивания:

$$R_\mu = r_{xx} - r_1; \quad (5.19)$$

$$L_\mu = L_1 - L_{S1}. \quad (5.20)$$

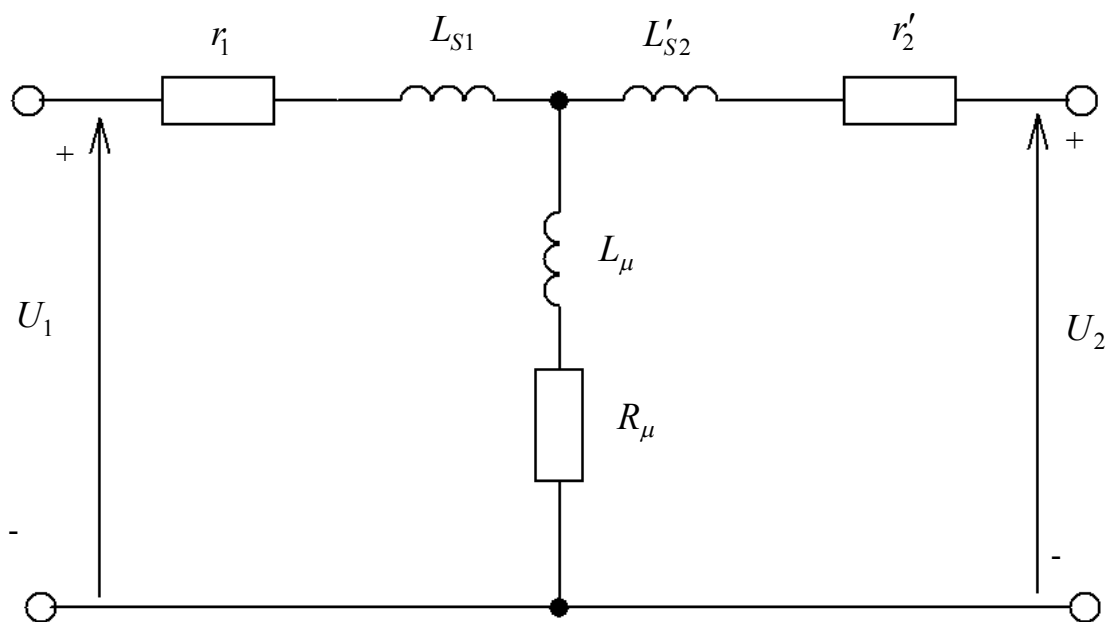


Рисунок 5.1 – Эквивалентная Т-образная схема замещения одной фазы трансформатора с последовательной намагничивающей ветвью

На этом типовой расчет параметров эквивалентной схемы замещения трансформатора считается законченным [8]. Однако эта схема замещения, которая адекватно отображает свойства и характеристики трансформатора как электрической машины или элемента системы электроснабжения, не вполне пригодна для использования в моделировании. Для перехода к эквивалентным параметрам индуктивно связанных катушек индуктивности последовательная ветвь намагничивания не рациональна. Действительно, если индуктивности L_1 и L_2 из этой схемы определяются, а r_1 и r_2 могут быть подсоединены последовательно по отношению к этим индуктивностям как сопротивления проводов катушек, то остается неопределенным коэффициент связи k_{12} , характеризующий взаимную индуктивность $\mu_{12} = k_{12} \sqrt{L_1 L_2}$. Трехполюсник, составленный из L_{S1} , L'_{S2} и L_m не дает полного представления о коэффициенте связи, поскольку после его преобразования в систему двух магнитно связанных катушек индуктивностей остается неясным, куда следует включать сопротивление R_m активных потерь на х. х. Поэтому целесообразно перейти к параллельной ветви намагничивания $R_m - L_m$, где оба элемента R_m и L_m присоединены к одной паре узлов. В пользу такого представления говорит и эквивалентная схема трансформатора, используемая в системе SimPowerSystem [66] (рис. 5.2).

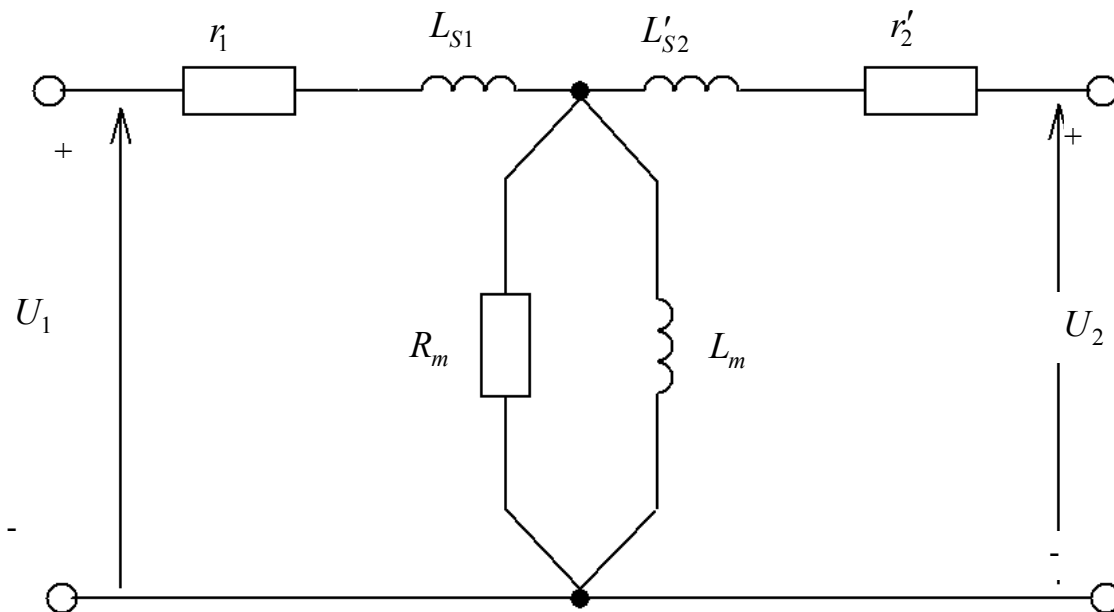


Рисунок. 5.2 – Эквивалентная Т-образная схема замещения одной фазы трансформатора с параллельной намагничивающей ветвью

Для вычисления параметров параллельной цепи намагничивания L_m - R_m , воспользуемся уравнением, в котором проводимости параллельной и последовательной ветвей одинаковы:

$$\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jx_m} = \frac{1}{R_\mu + jx_\mu}. \quad (5.21)$$

Решая это уравнение относительно R_m и x_m , получим:

$$R_m = \frac{R_\mu^2 + x_\mu^2}{R_\mu} = \frac{R_\mu^2 + (\omega L_\mu)^2}{R_\mu}; \quad (5.22)$$

$$x_m = \frac{R_\mu^2 + x_\mu^2}{x_\mu} = \frac{R_\mu^2 + (\omega L_\mu)^2}{\omega L_\mu} = \omega L_m, \quad (5.23)$$

откуда:

$$L_m = \frac{x_m}{\omega} = \frac{R_\mu^2 + (\omega L_\mu)^2}{\omega^2 L_\mu}. \quad (5.24)$$

Обозначим $R_0 = R_m + r_1$ и вынесем этот резистор на входные зажимы (рис. 5.3).

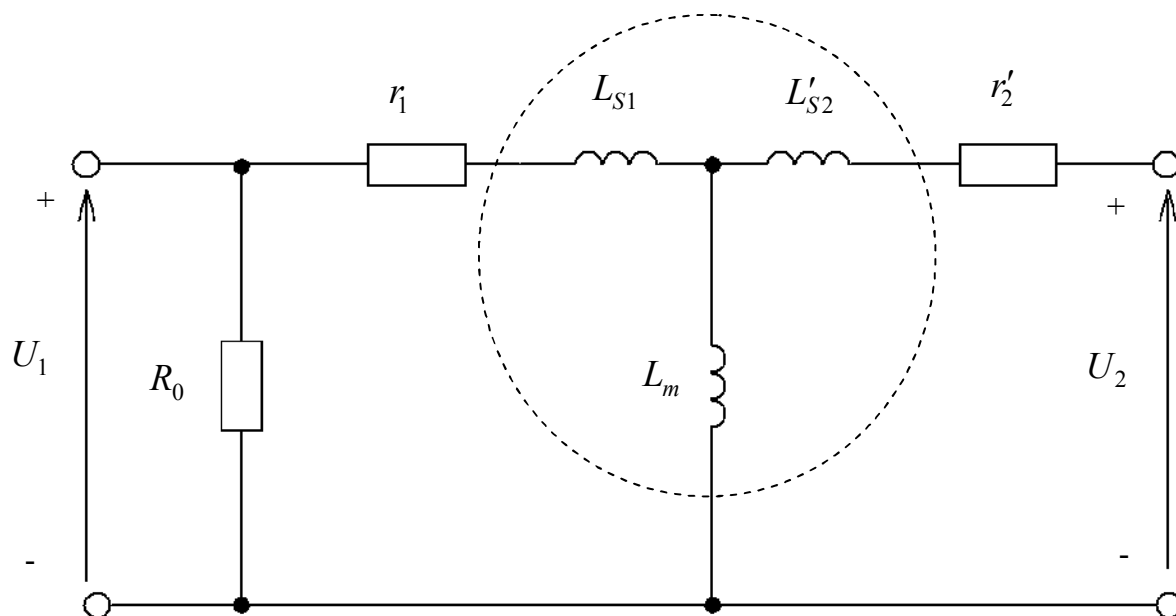


Рисунок 5.3 – Схема замещения трансформатора с выделенным индуктивным трехполюсником

Трехполюсник, состоящий из индуктивностей (на рис. 5.3 очерчен пунктирной линией), определяет параметры взаимно-связанных катушек индуктивностей:

$$L_1 = L_{S1} + L_m; \quad (5.25)$$

$$L_2 = n_{21}^2 L_1 = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 L_1. \quad (5.26)$$

Коэффициент связи катушек индуктивностей:

$$k_{12} = \frac{L_m}{L_1} = \frac{L_m}{L_m + L_{S1}}. \quad (5.27)$$

Взаимная индуктивность:

$$M = k_{12} \sqrt{L_1 L_2} = k_{12} L_1 \frac{U_{2H}}{U_{1H}}. \quad (5.28)$$

Предложенная методика реализована в системе MathCAD, рабочий лист с соответствующей программой приведен на рис. 5.4.

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:**

Sn := 25000 U1n := 10000 U2n := 400 $\underline{m} := 3$

f := 50 ek := 4.7 ix := 3.2 Pk := 0690 Px := 0125 w := 2 • π • f = 314.159

БЛОК ВЫЧИСЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА:
Мощность, приходящаяся на одну фазу :

$$S1 := \frac{S_n}{m} = 8.333 \times 10^3$$

Напряжение на первичной обмотке:

$$U1f := \frac{U1n}{\sqrt{m}} = 5.774 \times 10^3$$

Номинальный ток в первичной обмотке:

$$I1n := \frac{S1}{U1f} = 1.443$$

Напряжение короткого замыкания: $U_{kf} := \frac{U1f \cdot e_k}{100} = 271.355$

Полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_k := \frac{U_{kf}}{I1n} = 188$$

Активная сост. сопротивления к.з.

$$R_k := \frac{P_k}{m \cdot I1n^2} = 110.4$$

Реактивная сост. сопротивления к.з.:

$$X_k := \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 152.17$$

Активное сопротивление первичной обмотки в Т-образной схеме замещения:

$$R1 := \frac{R_k}{2} = 55.2$$

Индуктивное сопротивление рассеивания первичной обмотки в Т-образной схеме замещения:

$$X1s := \frac{X_k}{2} = 76.085$$

Индуктивность рассеивания первичной обмотки в Т-образной схеме замещения: $L1s := \frac{X1s}{w} = 0.242$

Ток х. х. в первичной обмотке: $I_x := \frac{i_x \cdot I1n}{100} = 0.04619$

Полное сопротивление х. х.: $Z_x := \frac{U1f}{I_x} = 1.25 \times 10^5$

Активное сопротивление холостого хода:

$$R_x := \frac{P_x \cdot 10000}{3 \cdot (i_x \cdot I1n)^2} = 1.953 \times 10^4$$

Индуктивное сопротивление холостого хода:

$$X_x := \sqrt{Z_x^2 - R_x^2} = 1.235 \times 10^5$$

Активное сопротивление, отражающее потери в стали сердечника:

$$R_\mu := R_x - R1 = 1.948 \times 10^4$$

Индуктивное сопротивление последовательной намагничивающей ветви:

$$X_{\mu} := X_x - X_{1s} = 1.234 \times 10^5$$

Параметры параллельной намагничивающей ветви:

$$R_m := R_{\mu} + \frac{X_{\mu}^2}{R_{\mu}} = 8.012 \times 10^5 \quad X_m := X_{\mu} + \frac{R_{\mu}^2}{X_{\mu}} = 1.265 \times 10^5$$

Индуктивность рассеивания первичной обмотки:

$$L_{1s} := \frac{X_{1s}}{\omega} = 0.242$$

Индуктивность ветви намагничивания

$$L_m := \frac{X_m}{\omega} = 402.543$$

Индуктивность катушки первичной обмотки:

$$L_1 := L_m + L_{1s} = 402.786$$

Индуктивность катушки вторичной обмотки:

$$L_2 := \frac{U_{2n}^2 \cdot L_1}{U_{1n}^2} = 0.644$$

Коэффициент связи катушек трансформатора:

$$k := \frac{X_m}{X_m + X_{1s}} = 0.999398$$

Взаимная индуктивность катушек:

$$M := k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = 16.102$$

Сопротивление резистора, шунтирующего первичную обмотку и учитывающего потери в стали трансформатора:

$$R_o := R_m + R_1 = 8.012 \times 10^5$$

Параметры модели для Simulink:

$$S_n = 2.5 \times 10^4 \quad U_{1n} = 1 \times 10^4 \quad U_{2n} = 400 \quad f = 50$$

$$L_{1s} = 0.242 \quad L_m = 402.543 \quad R_1 = 55.2 \quad R_m = 8.012 \times 10^5$$

Параметры взаимно связанных катушек индуктивности, представляющих трансформатор:

$$L_1 = 402.786 \quad L_2 = 0.644 \quad k = 0.999399 \quad M = 16.102 \quad R_o = 8.012 \times 10^5$$

Рисунок 5.4 – Программа в системе MathCAD для расчета параметров модели трансформатора

В программе рассматривается контрольный пример для трехфазного

трансформатора типа ТМ-25/10 со следующими паспортными данными:
 $S_H = 25 \text{ кВА}$; $f_H = 50 \text{ Гц}$; $U_{1H} = 10 \text{ кВ}$; $U_{2H} = 400 \text{ В}$; $e_K = 4,7\%$; $i_x = 3,2\%$;
 $P_K = 690 \text{ Вт}$; $P_x = 125 \text{ Вт}$. Обе обмотки соединены в звезду. Полученные
 расчетные данные для Т-образной схемы замещения таковы:

$$R_1 = 55,2 \text{ Ом}; L_{S1} = 0,242187 \text{ Гн};$$

$$R_2 = 0,08832 \text{ Ом}; L_{S2} = 3,875 \cdot 10^{-4} \text{ Гн};$$

$$R_\mu = 19\,480 \text{ Ом}; L_\mu = 388,338 \text{ Гн};$$

$$R_m = 800\,000 \text{ Ом}; L_m = 402,592978 \text{ Гн}.$$

Параметры трехфазного трансформатора для модели SimPowerSystem:

$$S_H = 25\,000 \text{ ВА}; f = 50 \text{ Гц};$$

первая обмотка:

$$V_{1H} = 10\,000 \text{ В}; R_1 = 55,2 \text{ Ом}; L_1 = 0,242187 \text{ Гн};$$

вторая обмотка:

$$V_{2H} = 400 \text{ В}; R_2 = 0,08832 \text{ Ом}; L_2 = 0,0003875 \text{ Гн};$$

ветвь намагничивания:

$$R_m = 801\,200 \text{ Ом}; L_m = 402,592978 \text{ Гн}.$$

Параметры для магнитно-связанных катушек индуктивности (по схеме замещения, изображенной на рис. 5.3):

Первичная катушка с учетом (5.25):

$$R_1 = 55,2 \text{ Ом}; L_1 = 402,835 \text{ Гн},$$

вторичная катушка с учетом (5.26):

$$R_2 = 0,08832 \text{ Ом}; L_2 = 0,644536 \text{ Гн},$$

коэффициент связи с учетом (5.27):

$$K_{12} = 0,99939879,$$

взаимная индуктивность с учетом (5.28):

$$M = 16,103719 \text{ Гн}.$$

Сопротивление резистора, шунтирующего первичную катушку и учитывающее потери на перемагничивание стали будет таким:

$$R_0 = 801\,200 \text{ Ом}.$$

Для проверки точности представления эквивалентных схем замещения в системе SimPowerSystems (далее - SPS) составлена динамическая модель, изображенная на рисунке 5.5.

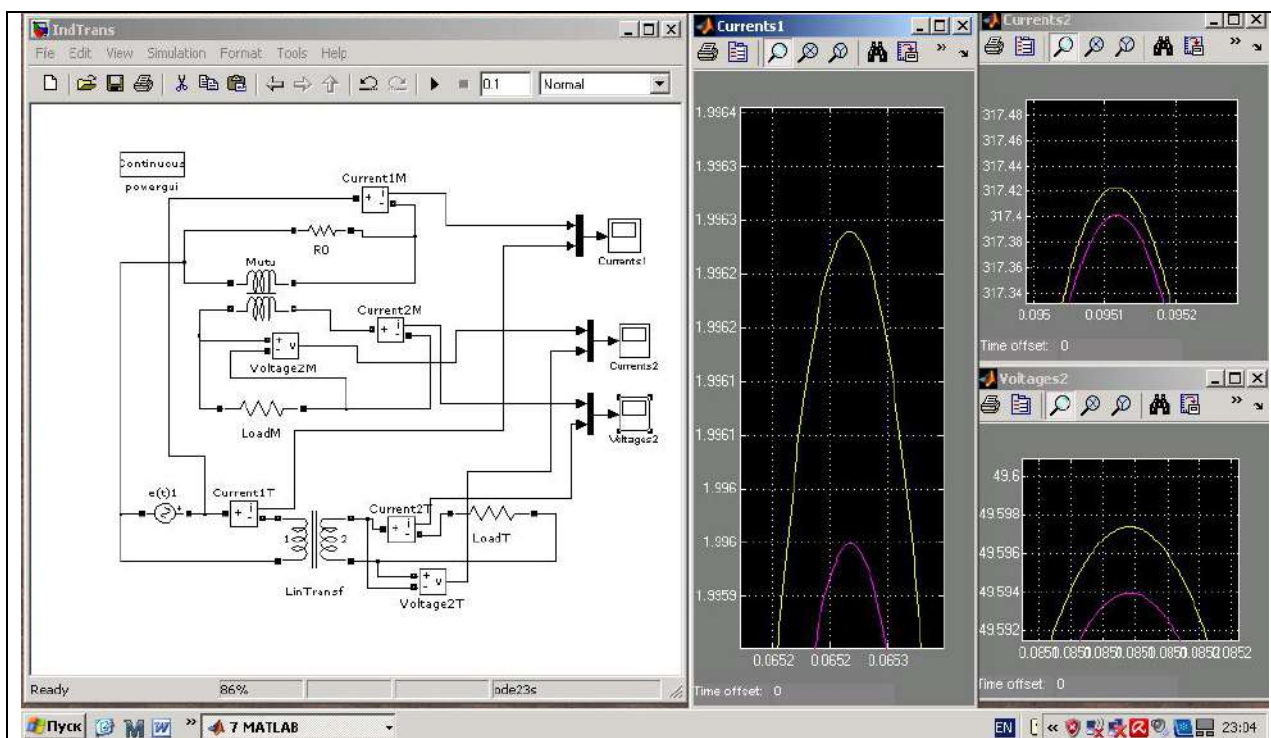


Рисунок 5.5 – SPS-модель для проверки точности предложенной методики

На рисунке 5.5 представлены однофазные варианты питания одинаковых активных нагрузок $R_H = 6,1 \text{ Ом}$, включенных на вторичных сторонах, при питании первичных обмоток от одного источника синусоидального напряжения. В верхней части использована SPS-модель двух взаимно связанных катушек индуктивностей, а в нижней – SPS-модель трансформатора. Результаты работы обеих моделей в процессе моделирования в течение нескольких периодов питающего напряжения выводятся на три виртуальных осциллографа. При этом измеряются первичный и вторичный токи, а также напряжение на нагрузке. Одноименные электрические величины с помощью Simulink-мультиплексов подаются на общий виртуальный осциллограф и строятся, таким образом, в общих осях. Каждая из контролируемых пар указанных величин практически сливается одна с другой. Лишь при значительном увеличении графиков можно различить незначительное расхождение графиков.

На рисунке 5.5 в правой части приведены фрагменты временных диаграмм виртуальных осциллографов при их значительном увеличении. При рассмотрении этих диаграмм видно, что расхождение их обусловлено лишь пятой значащей цифрой. Значения амплитуд первичных токов равны 1,9960 и 1,9963 А, для вторичных токов - 49,594 и 49,597 А, для вторичных напряжений - 317,40 и 317,42 В. Это свидетельствует о высокой точности предложенной методики определения параметров моделей трансформаторов.

5.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОРОМ НА ВИЗУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Одним из наиболее экономичных способов компенсации реактивной мощности является применение конденсаторных установок [30]. Преимущество их использования состоит в небольших эксплуатационных затратах и простоте монтажа и обслуживания. Ранее была рассмотрена возможность полной компенсации реактивной мощности в системе с несимметричной активно-индуктивной нагрузкой на основе использования компенсирующего устройства, состоящего из межфазных конденсаторов. Однако при этом не рассматривался случай, когда напряжение в линиях электропередачи может существенно превышать напряжение, подаваемое на нагрузку. В таком случае используется трансформатор, и несимметричная нагрузка на вторичной обмотке создает нежелательный режим несимметричной работы самого трансформатора. Значения вторичных напряжений могут составлять несколько десятков киловольт. Это имеет место, например, в системах электроснабжения железнодорожного транспорта. Включение высоковольтных конденсаторов при таких напряжениях не всегда возможно. В связи с этим можно предложить подключение симметро-компенсирующего устройства через понижающий трансформатор, что позволяет воспользоваться только низковольтными компенсирующими конденсаторами. Таким образом, необходимо рассчитать параметры симметро-компенсирующего устройства, подключаемого к зажимам нагрузки через трансформатор при помощи поисковой оптимизации, используя компьютерную модель трехфазной системы электроснабжения. Схема исследуемой системы электроснабжения представлена на рисунке 5.6.

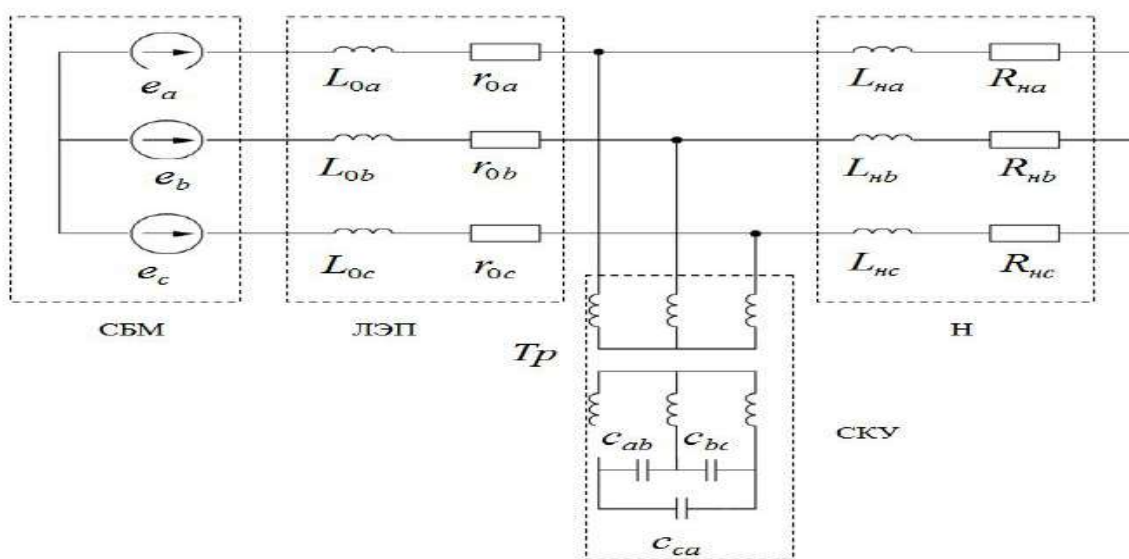


Рисунок 5.6 – Трехфазная электрическая сеть с симметро-компенсирующим конденсаторным устройством компенсации реактивной мощности, подключенным через трансформатор

Амплитуды фазных напряжений источников сети бесконечной мощности равны: $U_a=U_b=U_c=100В$. Сопротивления и индуктивности в линии электропередачи (далее - ЛЭП) соответственно приняты такими: $r_{0a}=r_{0b}=r_{0c}=0,1 Ом$ и $L_{0a}=L_{0b}=L_{0c}=0,001 Гн$. Нагрузка Н по фазам распределена неравномерно и характеризуется следующими значениями сопротивлений и индуктивностей:

$$R_a=0.7 Ом; L_a=0,005 Гн; R_b=1 Ом; L_b=0,01 Гн; R_c=2 Ом; L_c=0,04 Гн.$$

Первичные и вторичные обмотки трансформатора соединены в звезду, а конденсаторы - треугольником. Для модели рассчитаем номинальные параметры трансформатора - мощность, активные и индуктивные сопротивления обмоток. Расчет будем осуществлять, используя рассчитанные ранее значения емкостей симметрирующих конденсаторов по схеме без подключения трансформатора. Расчет номинальных параметров трансформатора осуществляется на основании максимального тока нагрузки трансформатора при рассмотрении схемы системы электроснабжения без трансформатора. Путем оптимизации были получены следующие величины емкостей симметрирующих конденсаторов:
 $C_{ab}=563 мкФ$; $C_{bc}=182 мкФ$; $C_{ca}=34,46 мкФ$.

При расчете мощности трансформатора, ориентируемся на конденсатор C_{ab} с наименьшим сопротивлением:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,6209} 10^6 = 5,664 Ом \quad (5.29)$$

Амплитудное значение тока этого конденсатора

$$I_m = \frac{U_{\text{л}}}{x_C} = \frac{100\sqrt{3}}{5,664} = 30,5807 А \quad (5.30)$$

Мощность в одной фазе представлена произведением линейного тока и линейного межфазного напряжения

$$P_a = \frac{I_m U_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \frac{30,5807 \cdot 100}{2} = 2648,363 \quad (5.31)$$

Номинальное значение мощности трансформатора:

$$2648,363 \times 3 = 7945,088 Вт \quad (5.32)$$

Примем номинальную мощность трансформатора равной типовой 10000 Вт.

Осуществим расчет внутренних сопротивлений и индуктивностей трансформатора, линейно подключенных к линии электропередачи с коэффициентом трансформации 4:1, ток холостого хода, составляет 2%, а напряжение короткого замыкания 7%. Активные потери при опыте холостого хода приняты $P_x = 70 Вт$, активные потери в опыте короткого замыкания $P_k = 600 Вт$.

Рассчитаем действующее линейное напряжение первичной обмотки:

$$U_{1н} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{\sqrt{2}} = 122,45 \text{ В} \quad (5.33)$$

Действующее линейное напряжение вторичной обмотки рассчитаем на основании коэффициента трансформации:

$$U_{2н} = \frac{U_{1н}}{k} = \frac{122,45}{4} = 30,619 \text{ В} \quad (5.34)$$

Мощность, приходящаяся на одну фазу,

$$S_1 = \frac{S_H}{3} = \frac{10000}{3} = 3333,33 \text{ Вт} \quad (5.35)$$

Действующее значение напряжения на первичной обмотке трансформатора

$$U_{1ф} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{m}} = \frac{122,48}{\sqrt{3}} = 70,71 \text{ В} \quad (5.36)$$

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора находим из соотношения номинальной мощности и номинального фазного напряжения:

$$I_{1н} = \frac{S_1}{U_{1ф}} = \frac{3333,33}{70,71} = 47,14 \text{ А} \quad (5.37)$$

Номинальный ток во вторичной обмотке

$$I_{2н} = \frac{I_{1н} \cdot U_{1н}}{U_{2н}} = \frac{47,14 \cdot 122,474}{30,619} = 188,562 \text{ А} \quad (5.38)$$

Рассчитаем фазное напряжение короткого замыкания

$$U_{Kф} = \frac{e_k \cdot U_{1ф}}{100} = \frac{7 \cdot 70,71}{100} = 4,95 \text{ В} \quad (5.39)$$

Полное сопротивление короткого замыкания находим как отношение напряжения короткого замыкания к номинальному току.

$$Z_k = \frac{U_{Kф}}{I_{1ном}} = \frac{4,95}{47,14} = 0,105 \text{ Ом} \quad (5.40)$$

Активную составляющую сопротивления короткого замыкания рассчитываем по следующей формуле:

$$R_k = \frac{P_K}{3 I_{1ном}^2} = \frac{600}{3 \cdot 47,14^2} = 0,09 \text{ Ом} \quad (5.41)$$

Найдем реактивную составляющую короткого замыкания .

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{0,105^2 - 0,09^2} = 0,054 \text{ Ом} \quad (5.42)$$

Активные и индуктивные сопротивления первичной обмотки трансформатора будем считать равными половине активного и индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$R_1 = \frac{R_K}{2} = 0,045 \text{ Ом}; \quad (5.43)$$

$$X_1 = \frac{X_K}{2} = 0,027 \text{ Ом}. \quad (5.44)$$

Активное сопротивление вторичной обмотки в Т-образной схеме замещения:

$$R_2 = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 \cdot R_1 = 0,002813 \text{ Ом}. \quad (5.45)$$

Индуктивность рассеивания первичной обмотки в Т-образной схеме замещения

$$L_{1s} = \frac{X_1}{\omega} = 0,00008608 \text{ Гн}. \quad (5.46)$$

Индуктивность рассеивания вторичной обмотки в Т-образной схеме

$$L_{2s} = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 \cdot L_{1s} = 0,00000538 \text{ Гн}. \quad (5.47)$$

Ток холостого хода в первичной обмотке

$$I_x = \frac{i_x \cdot I_{1H}}{100} = 0,94281 \text{ А.} \quad (5.48)$$

Полное сопротивление холостого хода

$$Z_x = \frac{U_{1\phi}}{I_x} = 75 \text{ Ом}. \quad (5.49)$$

Активное сопротивление холостого хода

$$R_x = \frac{P_x}{m \cdot I_x^2} = 26,25 \text{ Ом}. \quad (5.50)$$

Вычислим индуктивное сопротивление холостого хода:

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2} = 70,256 \text{ Ом}. \quad (5.51)$$

Рассчитаем активное сопротивление, соответствующее потерям в стали

сердечника:

$$R_{\mu} = R_x - R_1 = 26,205 \text{ Ом.} \quad (5.52)$$

Индуктивное сопротивление последовательной намагничивающей ветви

$$X_{\mu} = X_x - X_{1S} = 70,229 \text{ Ом.} \quad (5.53)$$

Вычислим параметры параллельной намагничивающей ветви:

$$R_m = R_{\mu} + \frac{X_{\mu}^2}{R_{\mu}} = 214,419 \text{ Ом;} \quad (5.54)$$

$$X_m = X_{\mu} + \frac{R_{\mu}^2}{X_{\mu}} = 80,007 \text{ Ом.} \quad (5.55)$$

Таким образом, вычислены все параметры трансформатора, которые далее будут подставлены в модели MATLAB.

Реализация компьютерной модели трехфазной системы электроснабжения с компенсирующей системой, которая позволяет определить оптимальные условия компенсации реактивной мощности. приведена на рисунке 5.7. Параметры модели соответствуют указанным ранее и рассчитанным значениям.

Мгновенные значения токов и напряжений в модели измеряются виртуальными амперметрами и вольтметрами и передаются на специальные блоки расчета реактивных мощностей фаз - Sa, Sb и Sc. Затем вычисляется среднеквадратичный функционал реактивных мощностей, для чего используются блоки умножителей и сумматора, который и принимается как целевая функция. Значение целевой функции передается в рабочее пространство MATLAB, где используется встроенной файл-функцией оптимизации fminsearch() [67]. В процессе оптимизации значение целевой функции сводится к минимуму посредством изменения значений емкостей конденсаторов Cab, Cbc и Cca. При проведении компьютерных экспериментов был использован метод stiff23s Розенброка, шаг интегрирования - 0.0001 с, что позволило проводить расчеты с высокой точностью. Время прогона модели составляет 0,06 с, что достаточно для выхода модели на установившийся режим.

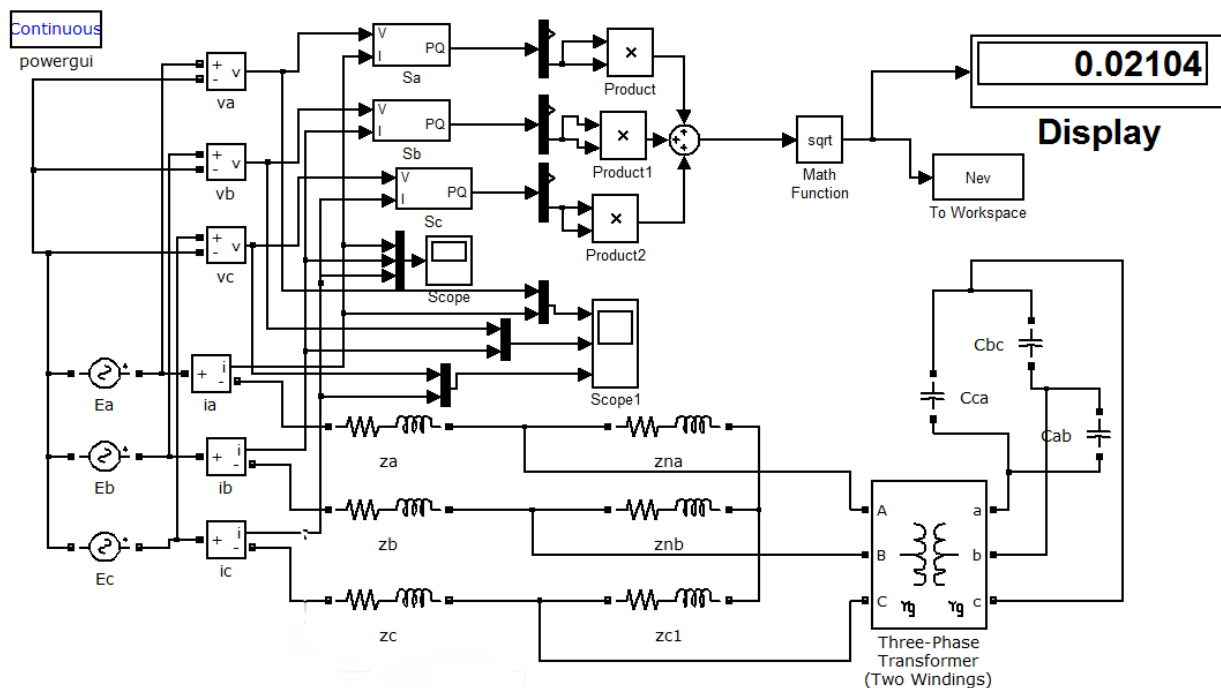


Рисунок 5.7 – Визуальная модель трехфазной системы электроснабжения с симметрирующим устройством, подключенным через трансформатор

Начальные значения параметров оптимизации принимаются равными 10 мкФ, при этом начальное значение целевой функции составляет 1199. Наблюдается большой разброс в значениях амплитуд токов в фазах, а значения амплитуд токов достаточно велики - более 30 А (рис. 5.8).

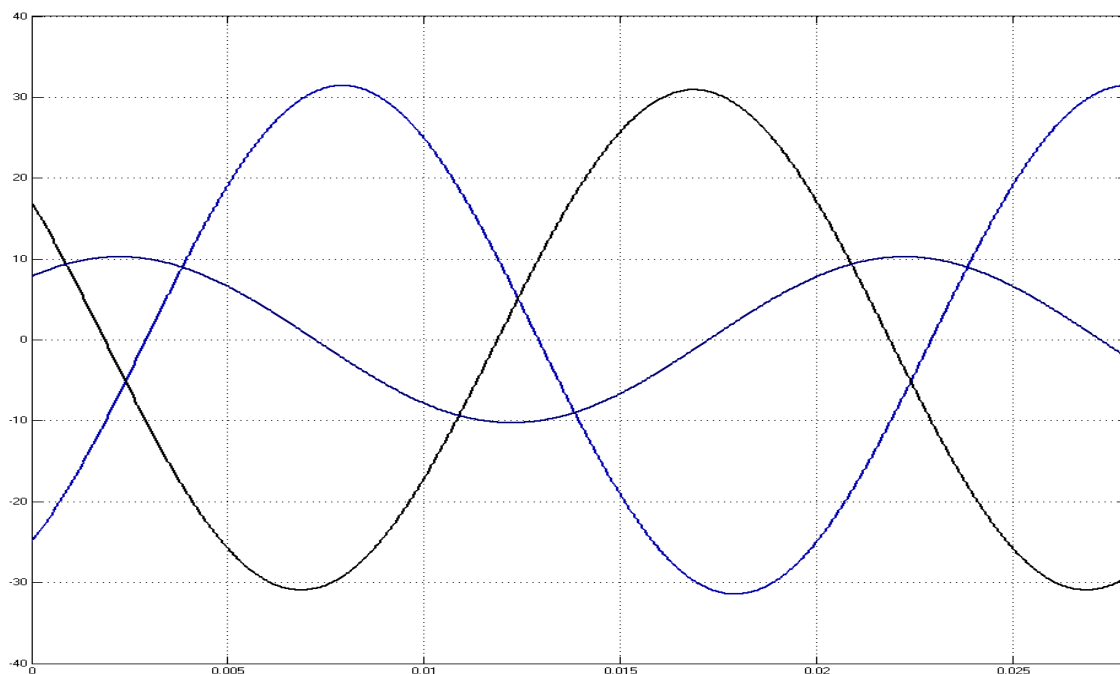


Рисунок 5.8 – Временные диаграммы сетевых токов до оптимизации

Оптимизировались несколько вариантов работы модели, в которых менялся коэффициент трансформации трансформатора. Результаты оптимизации сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. – Результаты моделирования и оптимизации режимов

Коэффициент трансформации	C_{ab}	C_{bc}	C_{ca}
100:100	5,5980e-004	2,0741e-004	4,0230e-005
100:50	0,0022	8,2962e-004	1,6092e-004
100:25	0,0090	0,0033	6,4397e-004

Проведенные исследования показали, что снижение коэффициента трансформации приводит к возрастанию значений емкостей конденсаторов (рис. 5.9).

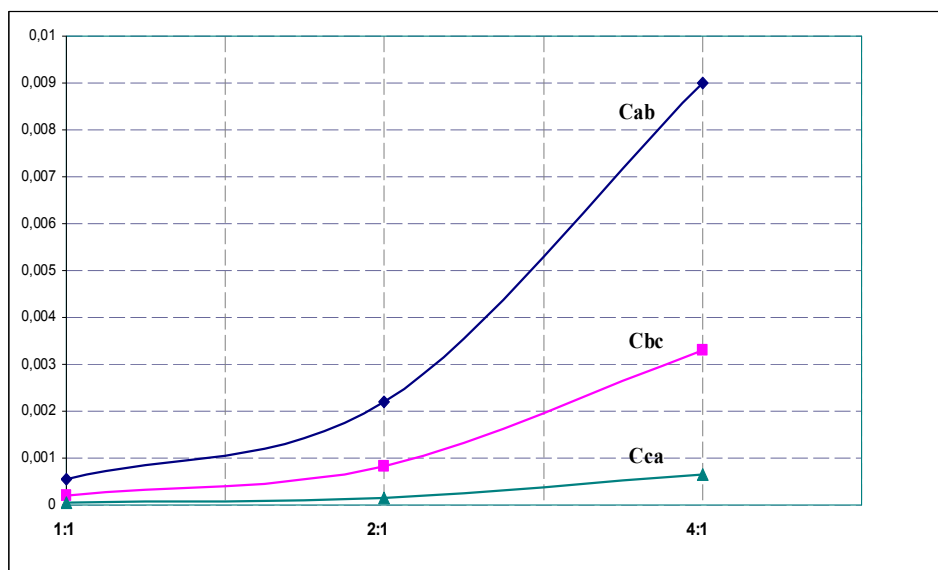


Рисунок 5.9 – Зависимость значений емкостей конденсаторов от коэффициента трансформации

На рисунке 5.10 представлены графики фазных токов после установления режима компенсации. Они показывают, что амплитуды стали равными по величине (7,8 А), а фазы в точности совпадают с фазами питающих напряжений, что свидетельствует о том, что источники отдают лишь активную мощность.

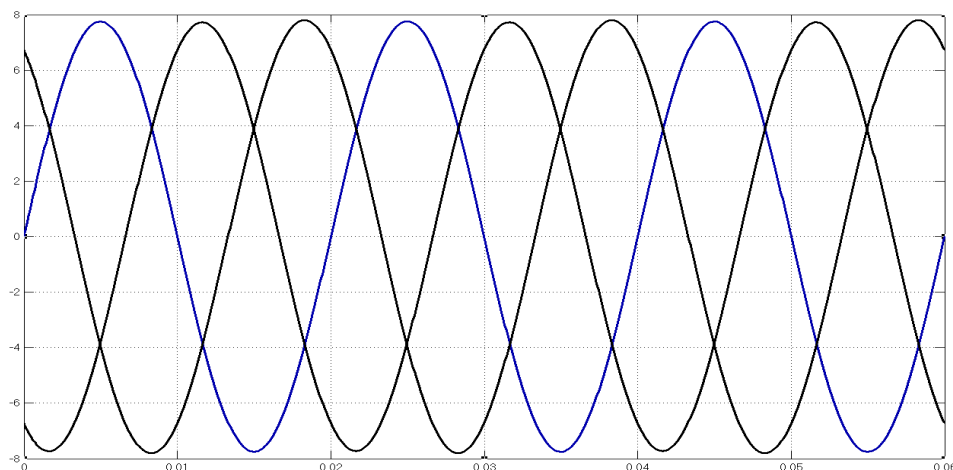


Рисунок 5.10 – Временные диаграммы сетевых токов после оптимизации при коэффициенте трансформации 4:1

Таким образом, проведенное исследование показало, что симметро-компенсирующее конденсаторное устройство можно подключить к системе электроснабжения через понижающий трансформатор, что можно использовать в тех случаях, когда напряжение системы достаточно высоко. Путем моделирования и при помощи алгоритмов поисковой оптимизации в исследуемой системе электроснабжения достигнута компенсация реактивной мощности и полное симметрирование. Рассчитываемые предложенным методом параметры симметро-компенсирующего устройства обеспечивают совершенные симметрирование и компенсацию реактивной мощности, учитывая реактивность и несимметричность нагрузки, а также реактивности линии электропередачи и трансформатора симметро-компенсирующего устройства. Результаты расчетов, представленные в виде графиков, в соответствии с принятой нагрузкой отражают изменения емкостей конденсаторов в зависимости от коэффициента трансформации трансформатора, через который подключено симметро-компенсирующее устройство.

5.3 КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Электрификация железных дорог является естественным процессом, связанным с повышением показателей качества обслуживания пассажирских и грузовых перевозок. При этом обеспечиваются высокие показатели в отношении скорости, пропускной способности, экологии и комфорта пассажиров. Статистика показывает, что на большей части электрифицированных железных дорог используются системы электроснабжения на переменном токе промышленной частоты 50 Гц при напряжении 25 кВ [39]. Являясь мощными потребителями электроэнергии, тяговые системы железнодорожного транспорта существенно влияют на питающую сеть. Это влияние негативно, так как снижаются такие показатели, как коэффициенты симметрии и мощности. Основной схемой питания тяговой нагрузки на железной дороге является схема питания от трехфазной сети через трансформатор. Первичная обмотка трансформатора соединяется в звезду, а вторичная – в треугольник. Питание тягового электропривода осуществляется от одной из сторон вторичного треугольника по схеме однофазной нагрузки [39]. Таким образом, системы электроснабжения переменного тока отличаются существенной несимметрией нагрузки. Это, в свою очередь, приводит к появлению в системе реактивной мощности.

Для частичного ослабления несимметрии используют схемы так называемого винта, когда на нескольких подстанциях переменного тока изменяются точки подключения и фазировка тяговой нагрузки. Но эти мероприятия не решают проблему несимметрии тяговой нагрузки и появления реактивной мощности полностью, поскольку увеличиваются потери и снижается коэффициент полезного действия.

В последние годы резко возрос интерес к вопросам симметрирования и компенсации реактивной мощности в сетях электроснабжения железных

дорог [40; 41], однако в указанных работах нет детального анализа режимов оборудования, в том числе трансформаторного, а также точного определения параметров симметрирующих и компенсирующих элементов. В связи с этим необходимо разработать методы снижения несимметрии и компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения железнодорожной тяги. Для этого нужно проанализировать режимы и электромагнитные процессы в системе питания тяговой нагрузки переменного тока, определить параметры симметро-компенсирующего устройства (СКУ) на реактивных элементах, которые позволяют минимизировать реактивную мощность и несимметрию в системе, а также убедиться в том, что оптимизированный режим действительно имеет более высокие показатели по условиям работы оборудования системы электроснабжения.

Рассмотрим систему электроснабжения железнодорожной тяги на переменном токе с однофазной нагрузкой на примере одного состава на линии. Этот вариант соответствует случаю наиболее резко выраженной несимметрии в системе электроснабжения. Расчетная схема изображена на рисунке 5.11.

Источники синусоидального напряжения имитируют питающую сеть неограниченной мощности, каковой в целом можно считать энергосистему, от которой питается тяговая подстанция. Элементы L_0 и r_0 составляют сопротивления линий электропередачи, подводящей энергию к тяговому трансформатору. Первичные обмотки этого трансформатора соединены в звезду, а вторичные – в треугольник (по схеме 11 группы соединения). Выводы вторичной обмотки a , b , c используются для питания тяговых нагрузок.

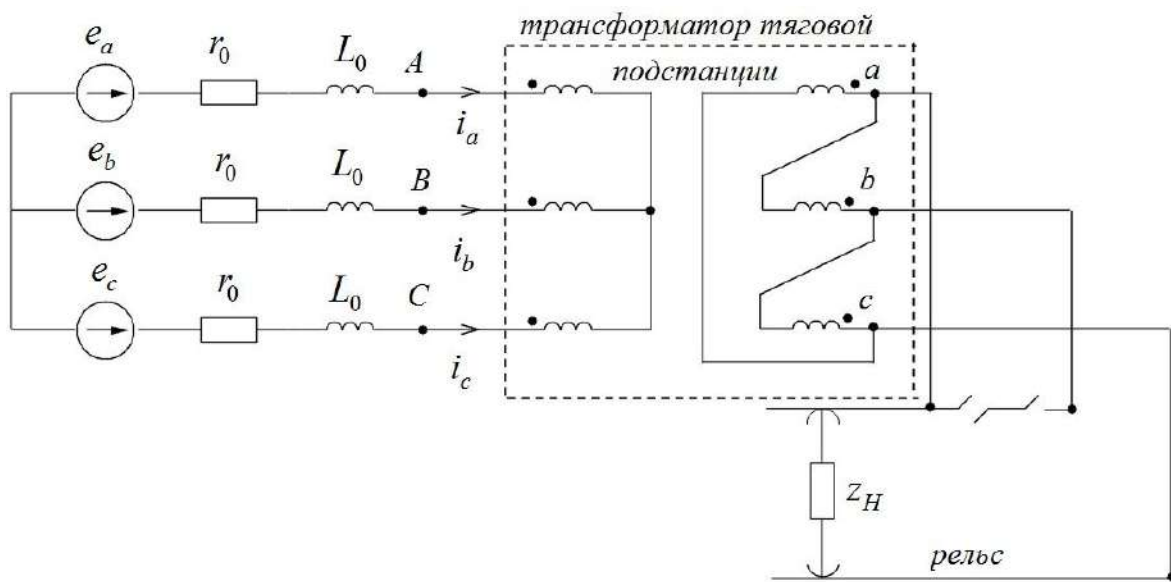


Рисунок 5.11 – Схема питания переменным током железнодорожной тяговой нагрузки

Фаза С заведена на рельс, а фаза А – на контактный провод.

Сопротивление Z_H отображает тяговую нагрузку, для которой будем полагать общепринятое значение $\cos \varphi = 0,8$.

Рассмотрим случай питания тяговой нагрузки от тягового трансформатора типа ТДНЖ–25000/110, параметры которого (паспортные данные) следующие:

номинальная мощность - 25 мВА, напряжение первичной стороны - 110 кВ, напряжение вторичной стороны - 27,5 кВ, частота питающего напряжения - 50 Гц, напряжение короткого замыкания - 10,5%, потери короткого замыкания - 120 кВт, ток холостого хода - 0,7%, потери холостого хода - 30 кВт.

Расчет параметров эквивалентной схемы замещения для визуальной модели привел к следующим результатам:

активное сопротивление первичной обмотки - 1,1616 Ом;

индуктивность рассеивания первичной обмотки - 0,080798 Гн;

активное сопротивление вторичной обмотки - 0,0726 Ом;

индуктивность рассеивания вторичной обмотки - 0,00505 Гн;

индуктивность намагничивания - 223,316 Гн;

сопротивление, отражающее потери на перемагничивание, включенное параллельно индуктивности намагничивания - 403078,81 Ом.

Эти параметры в дальнейшем используются в окне свойств визуальной модели трехфазного трансформатора, питающего тяговую нагрузку. Для определенности рассмотрим токовую нагрузку порядка 180 А, соответствующую средней степени нагрузки, обеспечивающей движение одного состава. При необходимости можно рассчитать любой другой вариант тяговой нагрузки.

Моделирование процессов осуществляем с помощью визуальной Simulink-модели (рис. 5.12).

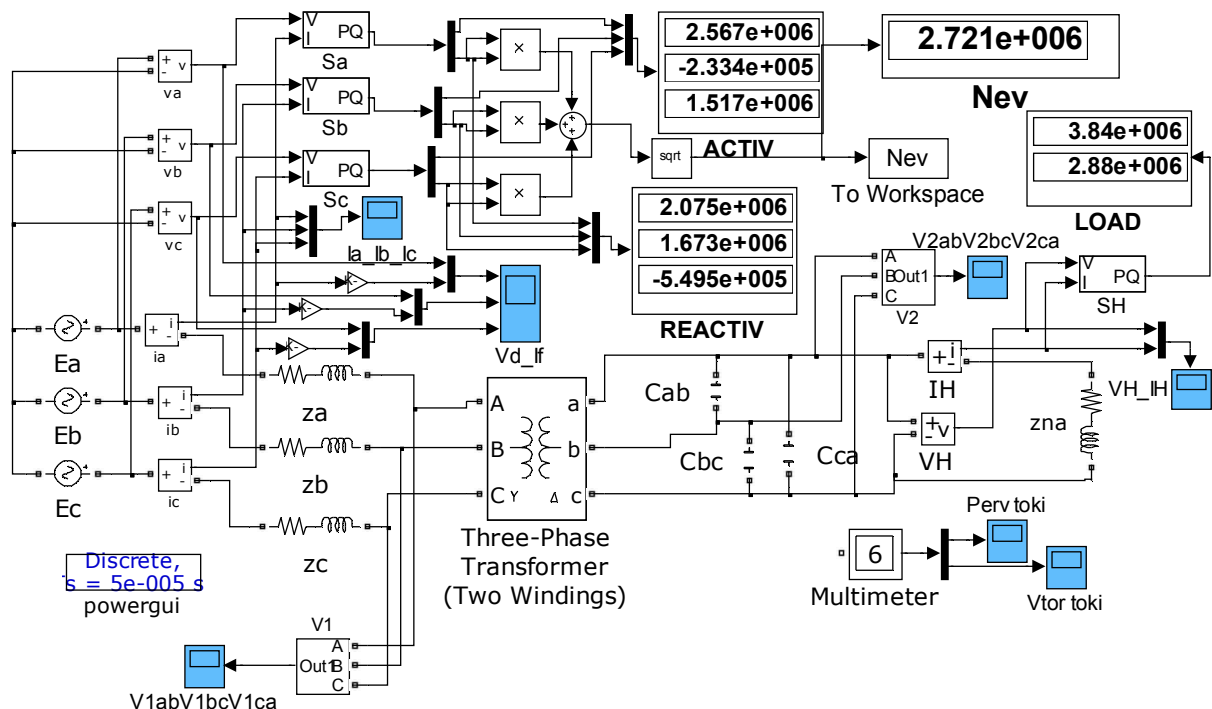


Рисунок 5.12 – Модель системы электроснабжения переменным током (несимметричная нагрузка системы)

Параметры линии электропередачи и нагрузки следующие: $r_0 = 1 \text{ Ом}$; $L_0 = 0,01 \text{ Гн}$; $R_n = (121 + 90,75j) \text{ Ом}$. При работе модели используется метод дискретных моделей элементов, обеспечивающий преодоление явления жесткости системы дифференциальных уравнений. Шаг интегрирования модели принят равным $0,00005 \text{ с}$.

При моделировании на виртуальные осциллографы выводятся токи в линиях электропередачи (они же являются токами в источниках электроэнергии и первичных обмотках трансформатора), напряжения на зажимах трансформатора, а также токи и напряжения нагрузки. С помощью виртуальных измерительных приборов фиксируются активные и реактивные мощности, отдаваемые каждым источником электроэнергии, и передача этих значений на цифровые измерители.

Результаты моделирования установившегося процесса при несимметричной нагрузке представлены на рисунке 5.13.

Диаграммы свидетельствуют о неблагоприятных условиях работы электрооборудования при несимметричной нагрузке на вторичных обмотках тягового трансформатора. На рисунке 5.13,а приведены напряжения каждого источника совместно с током этого источника (масштаб по токам увеличен в 1000 раз для улучшения наглядности).

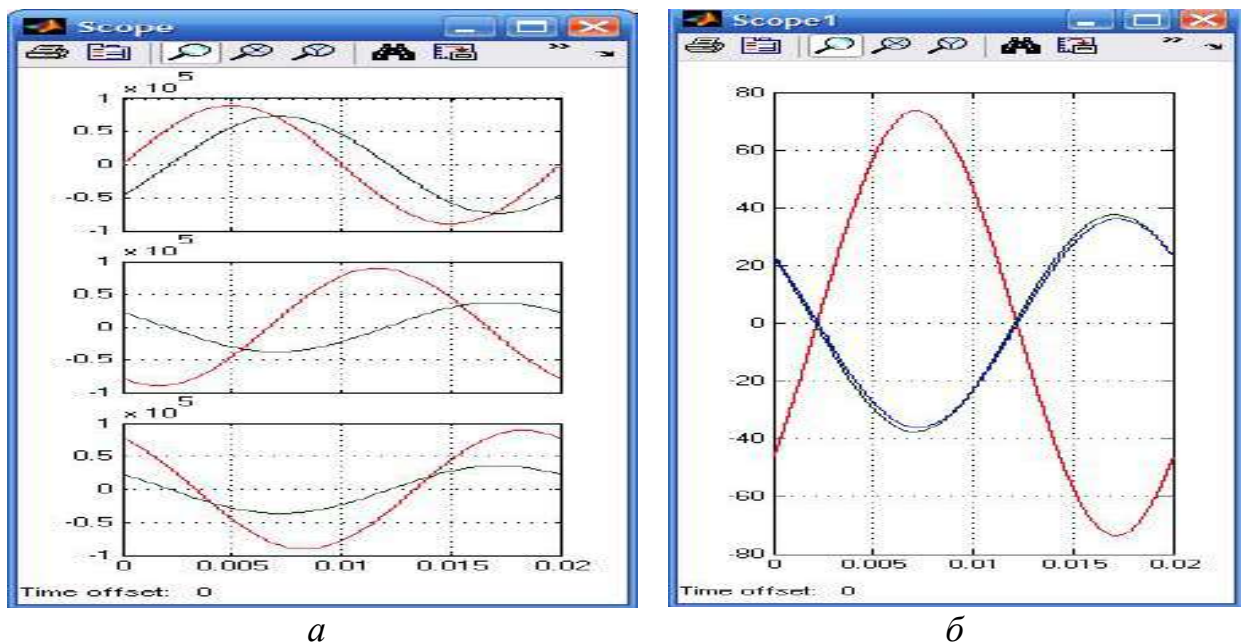


Рисунок 5.13 – Диаграммы для несимметричного режима: *а* – токи и напряжения источников; *б* – токи в линиях электропередачи

Видно, что от фазы А отбирается отстающий ток, соответствующий индуктивному характеру нагрузки на эту фазу. Виртуальный измеритель мощностей показывает, что полная мощность, отдаваемая фазой А, имеет такое значение: $S_A = 2.567\text{E}6 + j2.075\text{E}6$. Для фазы В значение полной мощности $S_B = -2.334\text{E}5 + j1.673\text{E}6$, а диаграммы напряжения и тока (рис. 5.13, а – средняя) свидетельствуют о том, что источник фазы В работает в режиме потребления мощности. В фазе С (рис. 5.13, а – нижняя диаграмма)

ток несколько опережает напряжение, что свидетельствует о емкостном характере отдаваемой мощности, а значение полной мощности $S_c = 1.517E6 - j5.495E5$. Из значений реактивных мощностей составлен среднеквадратичный функционал, значение которого для несимметричного режима $N_{ev} = 2.72 \text{ 1E6 ВАр}$. В дальнейшем этот функционал будет приниматься как целевая функция при проведении поисковой оптимизации.

На диаграмме рисунка 5.13, б изображены токи в линиях электропередачи (они же токи в первичных обмотках трансформатора). Амплитуда тока фазы А составляет величину 73,492 А, а токи в фазах В и С почти совпадают – их амплитуды равны 35,89 А и 37,614 А соответственно. Такую же пропорцию составляют и амплитуды токов вторичных обмоток трансформатора – 167,94 А, 83,97 А. и 83,97 А. Это показывает, что обмотки стержня фазы А перегружены, а остальные недогружены, и трансформатор работает с большим перекосом токов обмоток. Это, в свою очередь, обуславливает и несимметрию напряжений между выводами трансформатора: на первичной стороне трансформатора амплитуды напряжений равны 15520, 15556 и 15540 В; на вторичной стороне трансформатора – 38305, 39057 и 38102 В. Полная мощность на тяговой нагрузке $S_H = 3.84E6 + j2.88E6$. Можно сделать вывод, что каждый элемент электрооборудования системы электроснабжения работает при резкой несимметрии в нерациональном режиме.

Поиск параметров компенсатора реактивной мощности осуществляется с помощью поисковой оптимизации на основе алгоритма метода деформируемого многогранника [42], реализуемого в системе MATLAB совместно с Simulink-моделью. Методика организации такого поиска рассмотрена ранее применительно к обобщенной трёхфазной системе электроснабжения.

В исследуемом случае как параметры оптимизации приняты величины параметров элементов, подключаемых в рассматриваемой системе электроснабжения для симметрирования режима и компенсации реактивной мощности. В качестве СКУ выбрана схема из трёх реактивных элементов, подключаемых по схеме треугольника к выводам вторичной обмотки тягового трансформатора. Поскольку заранее неизвестно, какой именно элемент должен быть подключен в схеме СКУ, включаем в каждую сторону треугольника СКУ конденсаторы, что реализуется путем установления соответствующего варианта с помощью раскрывающегося списка в окне свойств каждого элемента. Такой выбор вполне обоснован, поскольку нагрузка имеет индуктивный характер, и, как показал опыт исследования подобной схемы, три конденсатора в СКУ способны симметризовать линейные токи и полностью компенсировать реактивную мощность в системе электроснабжения переменного тока. Однако в данном случае решение не привело к ожидаемому эффекту. В действительности в процессе проведения поисковой оптимизации целевая функция после некоторого количества циклов перестала уменьшаться, а величина емкости конденсатора C_{bc} стала уменьшаться и стремилась достичь бесконечно малой величины.

Этот элемент, таким образом, вытесняется процессом поисковой оптимизации. Это послужило сигналом для изменения соответствующего конденсатора СКУ на дуальный элемент – индуктивность. После этого целевая функция свелась к величине, близкой к нулю. Это означает, что реактивная мощность в системе полностью скомпенсировалась, при этом линейные токи образовали совершенно симметричную систему.

На рисунке 5.14 представлена модель системы электроснабжения после окончания процесса поисковой оптимизации. Этот режим достигнут при следующих параметрах СКУ: $C_{ab} = 1.0031113E-05$ Ф; $L_{bc} = 1.0767185$ Гн; $C_{ca} = 1.2937435E-05$ Ф. При этом значение целевой функции чрезвычайно мало – $N_{ev} = 4.226E-6$. Приборы показывают отсутствие в системе реактивной мощности, а каждый из источников отдает лишь активную мощность $1.332E6$ Вт. Полная мощность в нагрузке определяется значением $S_H = 3.996E6 + j2.996E6$, что означает увеличение активной мощности на тяговой нагрузке по сравнению с несимметричным режимом при отсутствии СКУ.

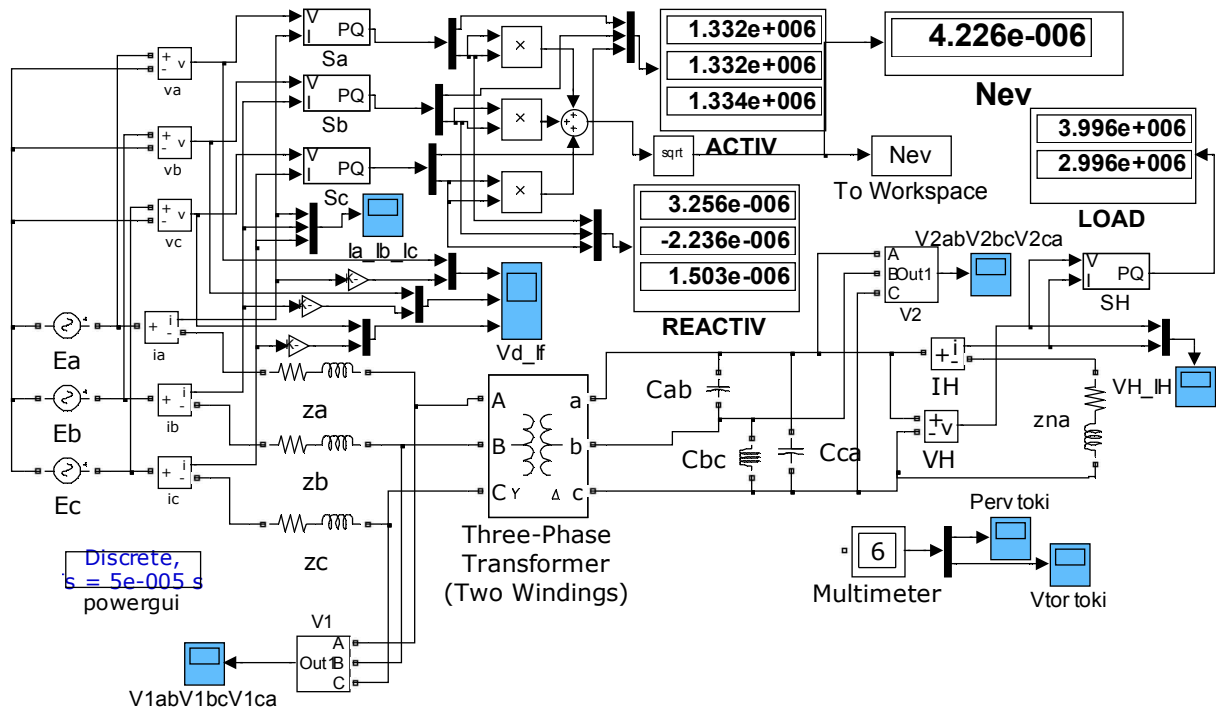


Рисунок 5.14 – Модель системы после нахождения параметров СКУ

На рисунке 5.15 представлены диаграммы токов и напряжений, которые идентичны рисунку 5.13, но соответствуют симметричному режиму с полной компенсацией реактивной мощности. Из рисунка 5.15,а видно, что токи в источниках питания совершенно совпадают по фазе с их задающими напряжениями. Из рисунка 5.15,б понятно, что и линия, и трансформатор нагружаются токами совершенно равномерно. Линейные напряжения на первичной и вторичной стороне уравнились и их амплитуды соответственно составили 155 510 и 38 865 В. Аналогично уравнились и токи

трансформатора и линии электроснабжения, амплитуды которых соответственно равны 29,68 и 68,63 А. Эти значения намного меньше тех, что соответствуют несимметричному исходному режиму.

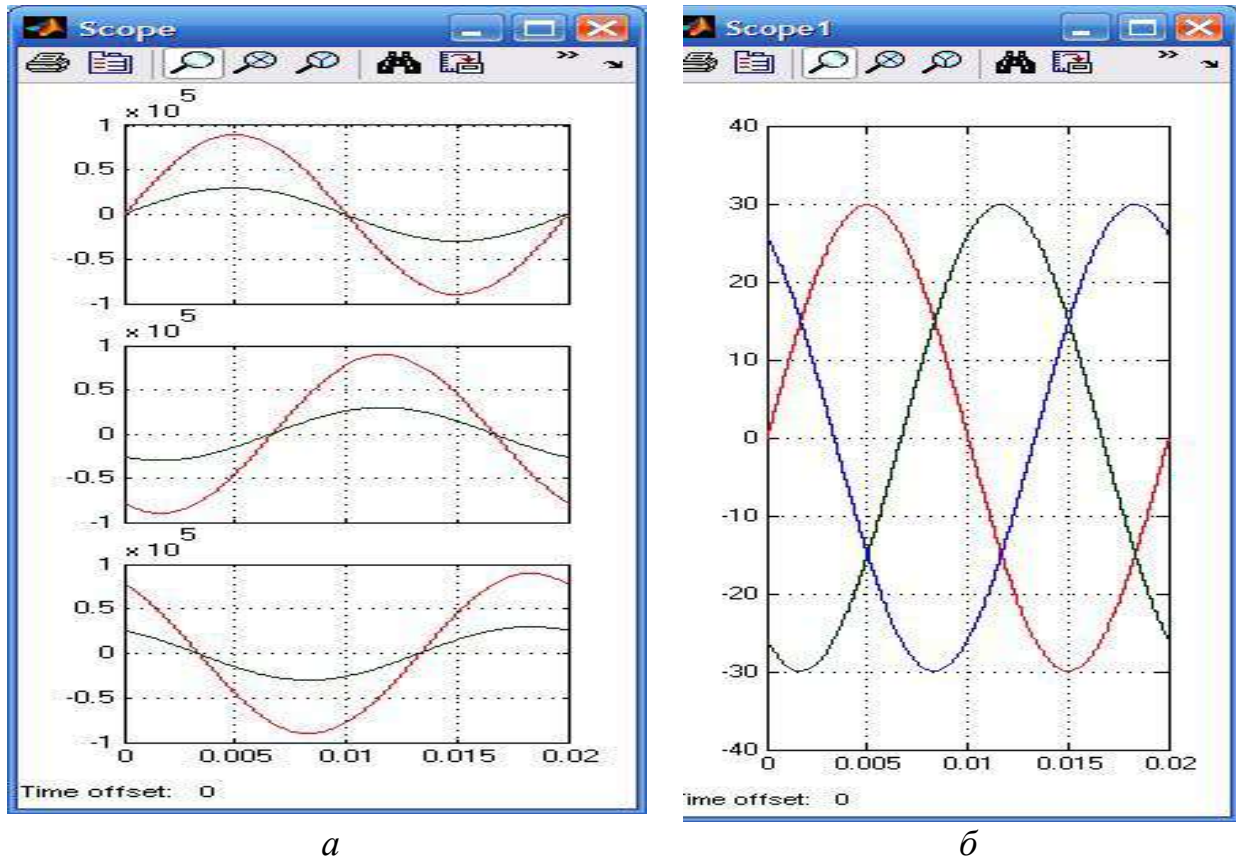


Рисунок 5.15 – Диаграммы для симметричного режима с полной компенсацией реактивной мощности: *а* – токи и напряжения источников; *б* – токи в линиях электропередачи

Уменьшение токов линии электропередачи по фазам А, В, С означает уменьшение потерь в линиях электропередачи, которое соответствует квадратичной зависимости от токов. Это обеспечивает экономию электроэнергии, а кроме того, тяговый трансформатор при этом работает в совершенно симметричном режиме. Это свидетельствует о возможности достичь энергосбережения на железной дороге путем оптимизации режимов тяговых подстанций переменного тока с помощью относительно простого дополнительного электрооборудования СКУ.

Таким образом, исследование показало, что возникающий в традиционной системе электроснабжения железных дорог на переменном токе несимметричный режим характеризуется значительными уровнями реактивной мощности в системе и несимметрией как токов, так и напряжений. Использование разработанной визуальной модели и предложенного метода поисковой оптимизации позволяет определить параметры симметро-компенсирующего устройства для реального случая. В процессе поисковой оптимизации представилась возможность выявить тип каждого реактивного элемента, который должен включаться в состав

симметро-компенсирующего устройства для полной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения. Подключение симметро-компенсирующего устройства с определенными в процессе исследования параметрами обеспечивает полное симметрирование системы и компенсацию в ней реактивной мощности. Это существенно улучшает условия работы основного оборудования тяговой подстанции переменного тока и повышает коэффициент полезного действия системы в целом. Перспективным для дальнейшего исследования представляется расчет параметров СКУ для ряда значений тяговых нагрузок, в том числе и рассмотрение вариантов нагрузок системы электроснабжения от нескольких потребителей, подключаемых на обе рабочие фазы вторичных обмоток силового трансформатора.

6 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ НЕЛИНЕЙНЫЕ И ВРАЩАЮЩИЕСЯ ЭЛЕМЕНТЫ

6.1 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ

Нелинейные нагрузки с дуговым разрядом являются достаточно распространенными. В технологических установках дуговой разряд используется в металлургических печах, в сварочном производстве и т. п. Необходимо заметить, что наличие приборов с нелинейными характеристиками в системе электропотребления приводит к искажению синусоидальной формы токов в системе, что с математической точки зрения может трактоваться как появление в токах высших гармоник. Кроме того, для возникновения дуги необходимо, чтобы напряжение на дуговом приборе нарастало до некоторого порогового значения напряжения, называемого напряжением зажигания дуги. До момента достижения напряжения зажигания ток через дуговой прибор не протекает. Вследствие указанного обстоятельства происходит естественный сдвиг кривой тока относительно питающего фазового напряжения в сторону отставания. Аналогичный сдвиг происходит в управляемом выпрямителе вследствие сдвига импульсов управления тиристорами. Таким образом, происходит индуктивный сдвиг фазы тока, что приводит к возникновению реактивной мощности. Проблемы с компенсацией реактивной мощности, с одной стороны, требуют осмысления механизма появления реактивной мощности, связанной с высшими гармониками. Это привело к обсуждению характера реактивной мощности высших гармоник в ряде работ [23; 24] и поискам способов компенсации этой мощности, называемой мощностью искажений. Не вдаваясь в обсуждение этого вопроса и связанной с ним возможной полемики, заметим, что высшие гармоники принципиально возможно подавить, используя пассивные и активные фильтры [38]. Рассмотрим компенсацию реактивной мощности сдвига тока в приборе с дуговым разрядом. Для анализа исследуем процессы возникновения и подавления реактивной мощности сдвига по основной (первой) гармонике. Такую компенсацию можно осуществить, используя симметрично-компенсирующие устройства, состоящие из реактивных элементов.

Учитывая оговоренные условия, необходимо решить следующие задания:

1. Разработать модели нагрузок с дуговым разрядом в системе визуального моделирования.
2. Адаптировать эти модели для использования их в системе моделирования силовых электрических систем.
3. Разработать модели систем электроснабжения с нагрузками, основанными на применении дугового разряда.

4. Разработать критерии оптимизации для расчета режима компенсации реактивной мощности.
5. Получить результаты оптимизации и проверить на правильность.

Трудности при анализе электрических систем с дуговым разрядом возникают в связи с существенной нелинейностью вольт-амперных характеристик самого дугового разряда. Основным аппаратом для теоретического исследования нелинейных электрических систем на сегодняшний день является математическое моделирование с помощью компьютерных средств и современных числовых математических методов.

Сложность процессов в самом дуговой разряде обусловила разработку моделей, рассматривающих и учитывающих термодинамические и электродинамические особенности носителей электрического заряда в теле самой дуги [46]. Такие модели применяются, например, для анализа химических процессов при сварке металлов [44], при анализе спектров электроосветительных приборов, излучаемых вследствие дугового разряда [45]. Однако с точки зрения расчета электрических цепей для проектирования и выбора коммутирующих устройств такие подробные расчеты не имеют смысла. В электроэнергетических системах, где учитывается соотношение напряжение дуги и самой системы, например, вообще пренебрегают процессами, происходящими в дуге и считают короткое замыкание металлическим [43; 47]. Такая крайняя оценка не может считаться приемлемой, поскольку надо учитывать и задержку токов в цепях с дуговым разрядом, что существенно влияет на энергетические показатели электроснабжения систем электросварки и электроосвещения.

В основу модели положены нелинейные уравнения, описывающие вольт-амперную характеристику дугового разряда в форме обыкновенных дифференциальных уравнений [48]:

$$k_1 r^n + k_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{r^{m+2}} i^2, \quad (6.1)$$

где r – радиус дуги;

i – ток через дугу;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, определяющие параметры вольтамперной характеристики дугового разряда.

Параметры m и n рекомендуется принять соответственно 0 и 2. В указанном уравнении правая часть представляет энергию, выделяющуюся в дуге. Тогда проводимость g столба дуги определяется величиной, обратной коэффициенту при квадрате тока в правой части уравнения:

$$g = \frac{r^{m+2}}{k_3}. \quad (6.2)$$

Это уравнение необходимо дополнить зависимость напряжения на дуге от тока, которую можно выразить через проводимость дуги в форме обычного компонентного уравнения:

$$v = \frac{i}{g}. \quad (6.3)$$

Для построения визуальной модели дугового разряда примем указанные рекомендованные величины m и n и приведем уравнение (6.1) к нормальной форме, отделив первую производную от переменной в левой части дифференциального уравнения:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{k_2 r} (k_3 i^2 - k_1 r^2) \quad (6.4)$$

Построенная по этому уравнению визуальная модель представлена на рисунке 6.1.

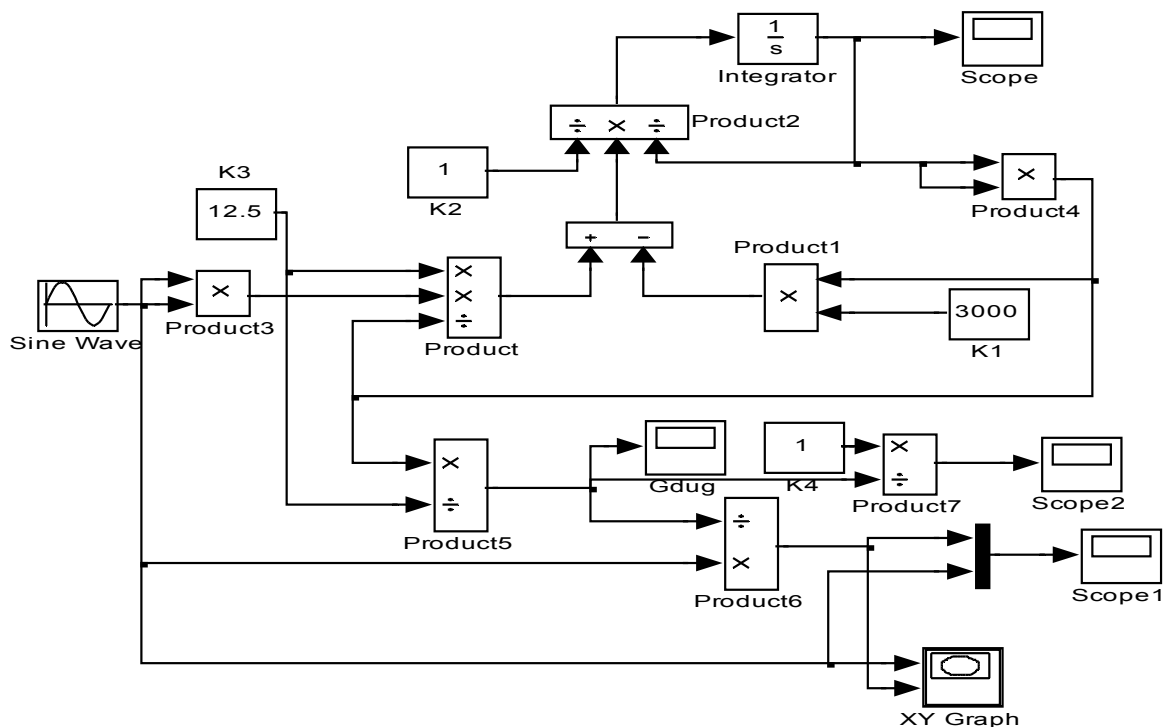


Рисунок 6.1 – Визуальная модель для изучения вольт-амперной характеристики дуги

Для представленной модели используются следующие значения коэффициентов:

$$k_1=3000; \quad k_2=1; \quad k_3=12,5.$$

На рисунке 6.2 изображена вольт-амперная характеристика дугового разряда, полученной с помощью виртуального прибора XY Graph, на входы которого направлены ток и напряжение на дуге. Как видно из полученного графика, характеристика имеет все характерные признаки реальной вольт-амперной характеристики дугового разряда, такие как наличие гистерезиса и напряжения возгорания дуги.

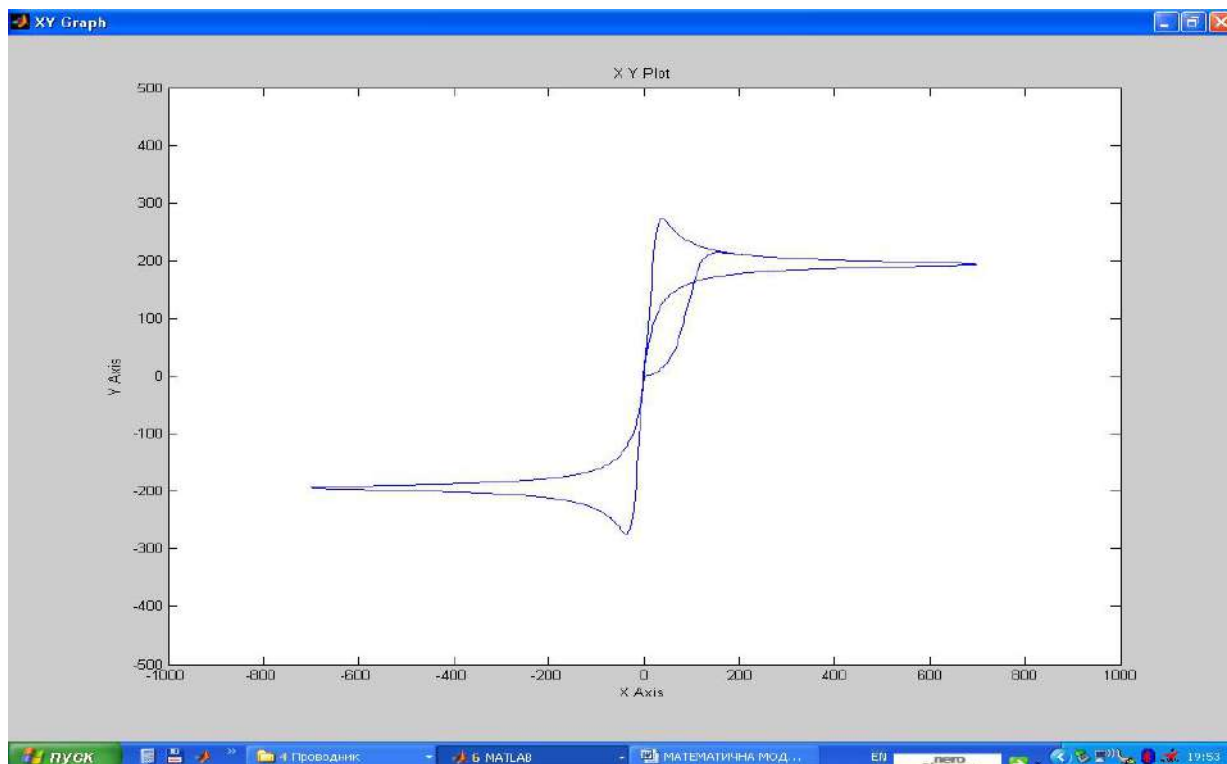


Рисунок 6.2 – Вольт-амперная характеристика дуги

Для изучения поведения модели дуги в системе электропитания рассмотрим случай питания дуги через резистор. Соответствующая визуальная модель изображена на рисунке 6.3. В этой модели добавлены элементы, реализующие уравнение по закону Кирхгофа для напряжений, а также компонентное уравнение резистора, который включен последовательно с источником питания и устройством с дуговым разрядом.

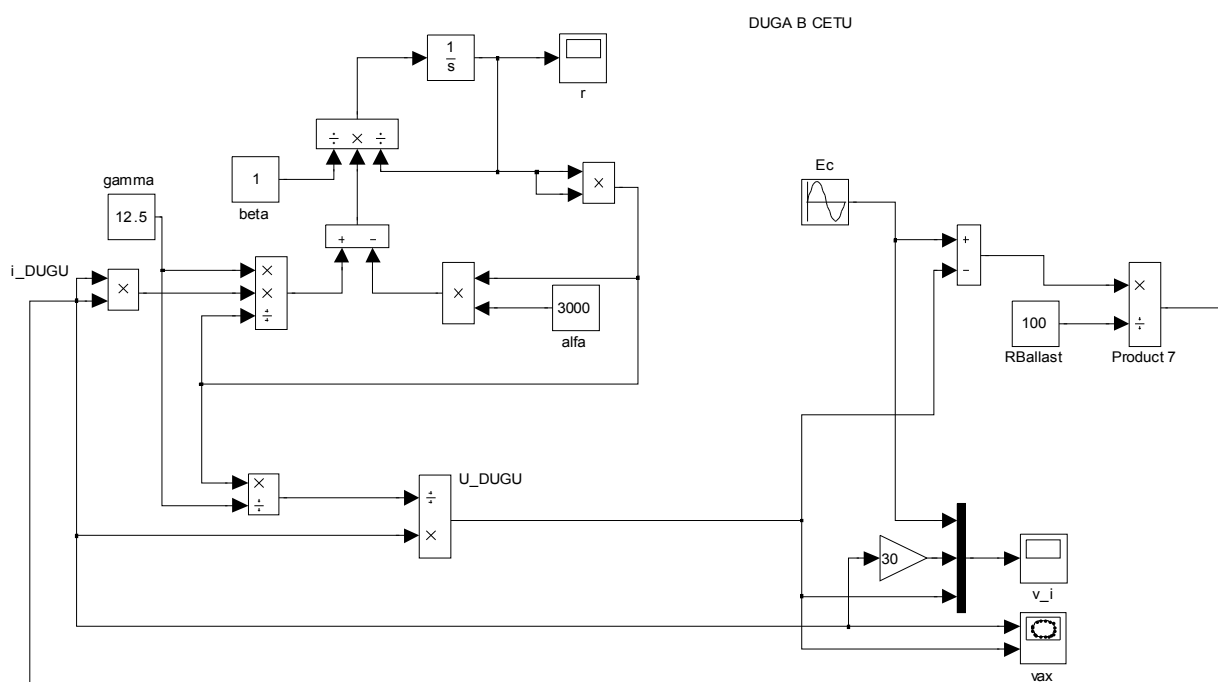


Рисунок 6.3 – Модель системы электропитания с дугой

Для запуска модели использован численный метод интегрирования дифференциальных уравнений с переменным шагом и возможностью интегрирования жестких систем ode23s (stiff/Mod.Rosenbrock), а для обеспечения устойчивости процесса интегрирования выбрано достаточно малое значение максимально допустимого шага 0,00001 с. Временные диаграммы, полученные путем моделирования, представлены на рисунке 6.4.

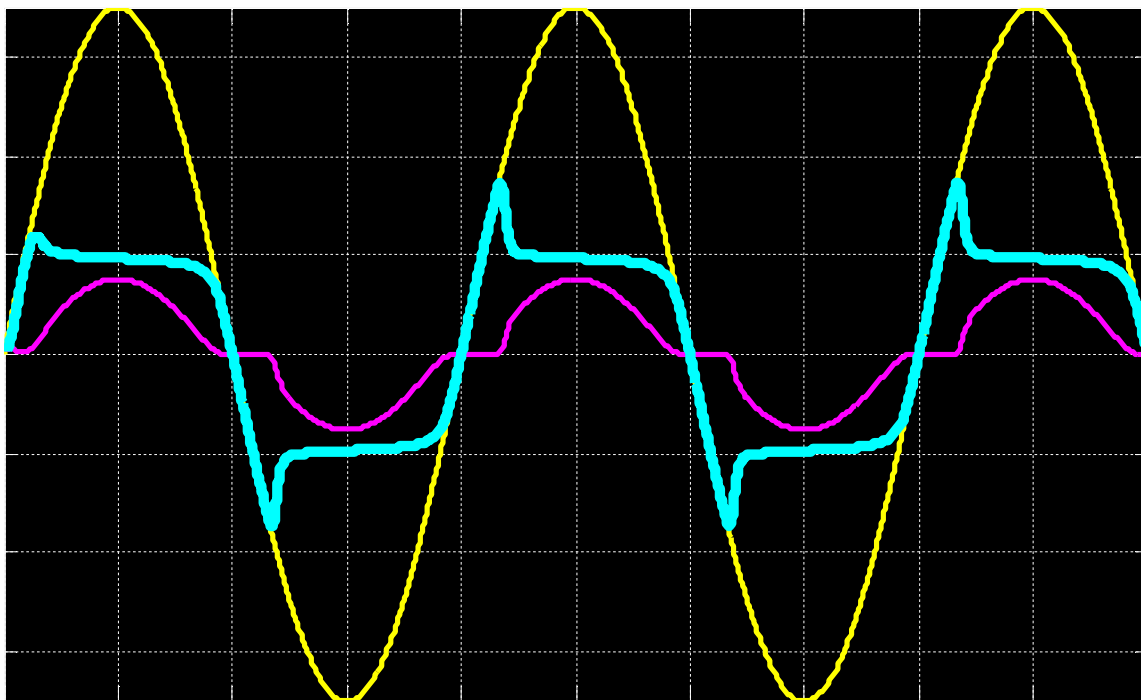


Рисунок 6.4 – Временные диаграммы моделирования

На диаграммах изображены питающее синусоидальное напряжение, напряжение и ток дуги. На последней диаграмме имеется характерный сдвиг в сторону отставания, что с точки зрения качества электроснабжения ухудшает энергетические показатели системы в целом.

Как правило, в системах питания элемент с дуговым разрядом подключается к сети через токоограничивающий элемент. Таким элементом обычно является дроссель. Такой токоограничивающий элемент практически не потребляет активной мощности. В то же время наличие индуктивного ограничителя приводит к появлению в системе реактивной мощности. Реактивную мощность создаёт и сам элемент с дуговым разрядом, так как ток в нем появляется в каждом полупериоде лишь тогда, когда напряжение на элементе достигнет напряжения зажигания дуги. Это обуславливает сдвиг основной гармоники тока относительно питающего напряжения и приводит к появлению в системе электроснабжения дополнительной реактивной мощности. Потери от указанных явлений могут быть значительными. Установки плавки и очистки металлов потребляют значительные мощности от сети. В случае питания электроосветительных приборов их количество может быть достаточно велико, и тогда суммарная мощность потребления

становится существенной, и уровни потребляемой реактивной мощности целесообразно снижать с целью уменьшения потерь. Рассмотрим расчет скомпенсированного по основной гармонике оптимального режима электропитания элемента с дуговым разрядом при помощи оптимизационных алгоритмов в системе MATLAB.

Создадим визуальную модель элемента с дуговым разрядом в виде элемента, совместимого с SPS-библиотекой системы Simulink. Это позволит использовать этот элемент в моделях электрических системах наряду со всеми другими элементами SPS-библиотеки. С этой целью Simulink-модель дополнена зависимым источником напряжения, который подсоединен к узлам для соединения с другими элементами SPS-библиотеки (рис. 6.5).

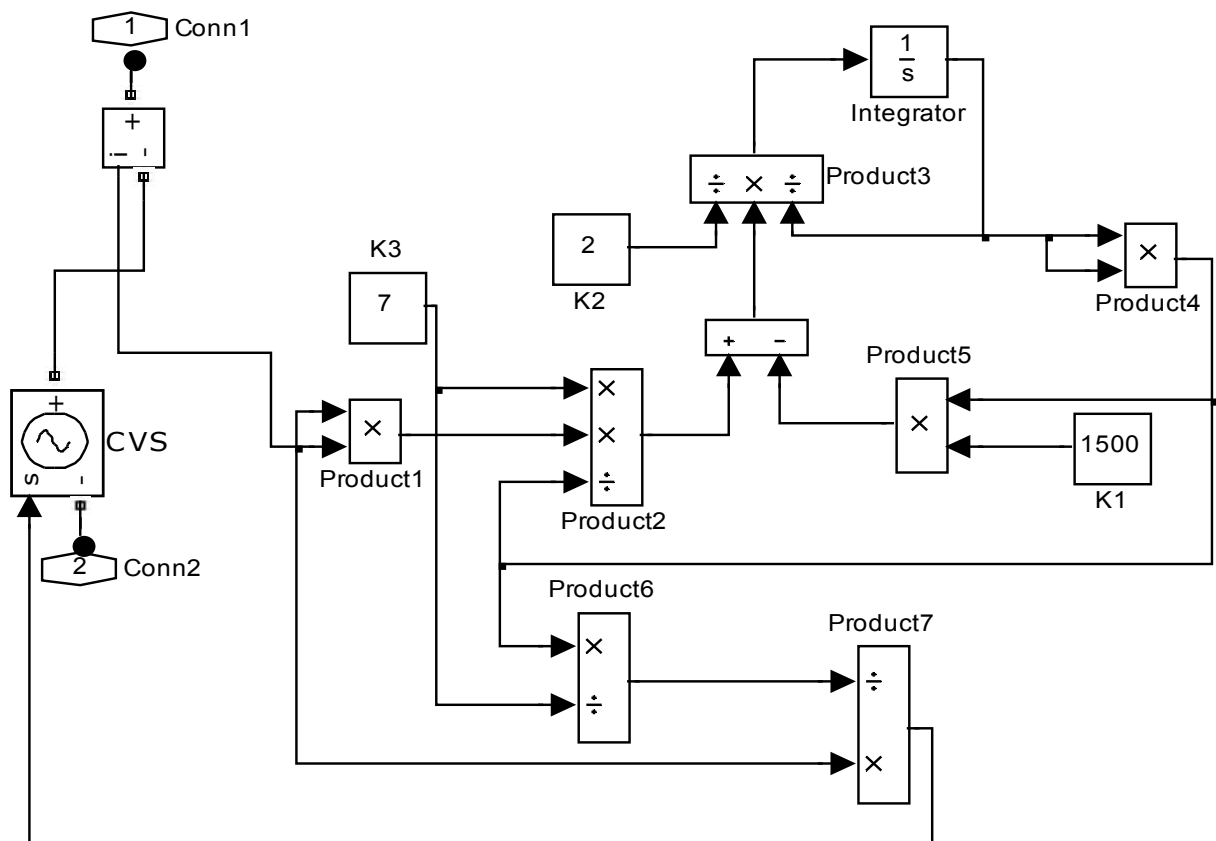


Рисунок 6.5 – Визуальная SPS-модель элемента с дуговым разрядом

Теперь с помощью клемм Conn1 и Conn2 можно присоединить полученную модель к другим элементам из указанной библиотеки элементов SimPowerSystem, образуя систему питания дугового разряда от сети переменного напряжения (рис.6.6)

В приведенной модели активно-индуктивный элемент RL представляет собой ограничительный дроссель, активно-емкостной элемент C_{kopens} моделирует конденсатор, предназначенный для компенсации реактивной мощности по основной гармонике. Параметры модели и схемы следующие:

$$k_1=1500; k_2=2; k_3=7; E_m=310B; f=50Гц; R_L=R_C=0.01Ом; L=0.48Гн;$$

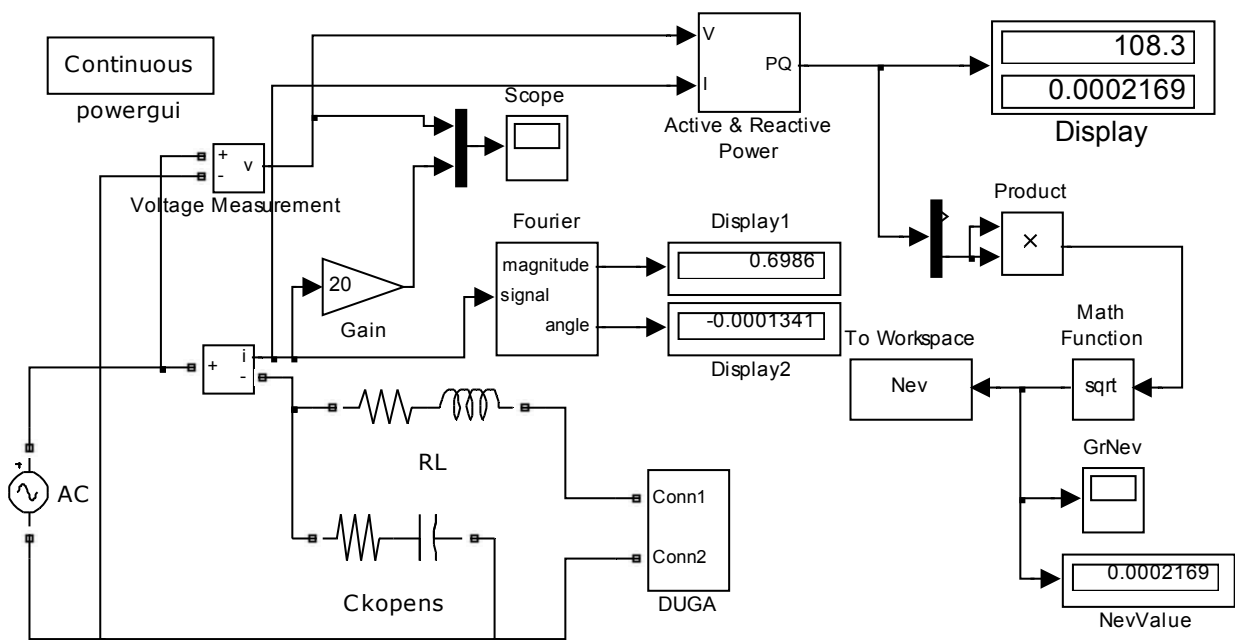


Рисунок 6.6 – Система питания элемента с дуговым разрядом после завершения оптимизации

При отключенном компенсирующем устройстве установившийся режим характеризуется такими параметрами: амплитуда основной гармоники тока, потребляемого от источника - $I_{lm}=1,647\text{A}$; потребляемая от источника активная мощность - $P_E=108,3\text{W}$; реактивная - $Q_E=231,2\text{VA}$; $\cos \varphi=0,424$.

Для поиска режима компенсации реактивной мощности и параметров компенсирующего устройства используем встроенную функцию оптимизации по алгоритму Нелдера-Мида. С этой целью подключим прибор, измеряющий напряжение источника, и выделяющий основную гармонику тока в сети. Это в свою очередь позволяет вычислить активную и реактивную составляющие мощности источника. Для формирования целевой функции, которую необходимо минимизировать, используем модуль реактивной мощности. Значение целевой функции вычисляется в процессе прогона модели в течение восьми периодов, что достаточно для выхода на установившийся режим в системе. Шаг интегрирования - 0.00001 s ; используется метод интегрирования `ode23s`. После вычисления целевой функции ее значение передаем в рабочее пространство, где оно используется функцией `fminsearch()`. В качестве параметра оптимизации используется значение емкости конденсатора компенсирующего устройства.

Текст вызывающей (основной) функции `main` на языке программирования задач Matlab будет таким (рис. 6.7):

```

warning off
global Ckomp Nst
Nst=0
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[1])
Nst

```

Рисунок 6.7 – Текст вызывающей программы

Здесь в качестве глобальных переменных объявлены величина емкости компенсирующего конденсатора и переменная Nst, подсчитывающая число обращений к вычислению целевой функции. Далее идет вызов функции оптимизации, где в качестве двух параметров указаны имя вспомогательной функции, доставляющей значение целевой функции, и начальное значение параметра оптимизации.

Текст вспомогательной функции представлен на рисунке 6.8:

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global Ckomp Nst
Ckomp=abs(x(1))*1E-6)
sim duga_06optim
x
Nev
Nst=Nst+1
```

Рисунок 6.8 – Текст вспомогательной функции

Здесь повторены описания глобальных переменных, как этого требует синтаксис языка программирования задач Matlab. Далее параметр оптимизации используется для пересчета значения емкости конденсатора Ckomp. Это имя используется в окне параметров элементов компенсирующего устройства модели. После этого оператор sim вызывает для исполнения модель, представленную на рисунке 6.2. На указанном рисунке приборы показывают значения, полученные в процессе оптимизации. Емкость конденсатора, при которой обеспечивается полная компенсация реактивной мощности по основной гармонике, составляет 15,4 мкФ. При этом амплитуда основной гармоники тока, потребляемого от источника $I_{Im}=0,6987\text{A}$; потребляемая от источника активная мощность $P_E=108,3\text{Вт}$; реактивная $Q_E=0,0002169\text{ ВА}$; $\cos \varphi=1,0$. Значительное уменьшение тока, потребляемого в этом случае от сети, означает существенное уменьшение потерь электрической энергии.

Таким образом, для решения задачи оптимизации режима в системе электроснабжения с элементом дугового разряда разработана Simulink-модель дугового разряда на основе дифференциального нелинейного уравнения. С помощью зависимого источника напряжения модель дугового разряда представлена в виде, совместимом с элементами SimPowerSystem. Использование модели системы электроснабжения вместе с функцией оптимизации fminsearch() позволяет вычислить параметры компенсирующего элемента, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности по основной гармонике. В оптимальном режиме значительно уменьшается амплитуда первой гармоники потребляемого от сети тока, что уменьшает потери электроэнергии в системе электроснабжения..

6.2 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАЗРЯДНОЙ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЛАМПЫ

Разрядные лампы высокого давления широко применяются для наружного и внутреннего освещения. Являясь относительно мощными потребителями электрической энергии, они представляют собой разновидность нагрузок, существенно влияющих на режимы работы систем электроснабжения. Повысить энергетические показатели систем электроснабжения невозможно без учета энергии, потребляемой осветительными лампами высокого давления. При этом важно исследовать как установившиеся процессы, сопровождающие долговременную работу осветительных установок, так и переходные процессы, возникающие при пуске осветительных установок, при изменении условий электропитания и других нестационарных условиях. Использование различных пускорегулирующих устройств также требует проведения анализа условий работы с учётом особенностей работы лампы высокого давления [49].

Проектирование и исследование осветительных комплексов должно осуществляться на основе системного подхода, когда работа осветительного прибора рассматривается в комплексе с работой питающей системы и пускорегулирующей аппаратуры. Эта аппаратура обеспечивает важные функции надежного пуска лампы, работы в длительном установившемся режиме с минимальными потерями, защиты лампы и полупроводниковой части пускорегулирующей аппаратуры от аварийных ситуаций [50]. В то же время сама лампа высокого давления отличается наличием в ней сложных нелинейных явлений в пространстве, где присутствует газовый разряд [51]. Описывающие поведение лампы математические уравнения в условиях, когда учитывается движение частиц в среде с газовым разрядом, представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных. Именно таким образом можно учесть электрические, газодинамические и тепловые процессы, происходящие в замкнутом пространстве, ограниченном колбой лампы. Решить такие уравнения в аналитическом символьном виде невозможно, а применение численных методов требует больших вычислительных затрат компьютерного времени. Кроме того, затруднено определение различных коэффициентов, осуществляемое эмпирическим путем [52]. При использовании инженерного подхода как системного для системы электропитания важно адекватно представить вольт-амперные характеристики ламп, вследствие чего приходим к нелинейным обыкновенным дифференциальным уравнениям [53]. Получить символьные решения и в этом случае проблематично, однако время для проведения численных расчетов существенно сокращается и соизмеряется с временем, затрачиваемым компьютером на расчет процессов в линейной части системы электропитания лампы.

Развитие вычислительной техники и программного обеспечения обусловило актуальность применения математического моделирования как основного средства исследования и проектирования электротехнического

оборудования, поэтому первоочередным заданием представляется разработка наглядных и удобных для практического использования математических моделей ламп высокого давления. В ряде работ предложены дифференциальные уравнения, а также способы их реализации в вычислительной среде MATLAB с использованием языка программирования и встроенных функций этой среды [52; 53]. Однако для унификации и ускорения процесса разработки моделей и их отлаживания перспективным представляется использование сигнальных графов [70 - 72] и подсистемы Simulink, позволяющей осуществить так называемое визуальное моделирование[67].

Рассмотрим процесс разработки математической модели разрядной лампы высокого давления в подсистеме Simulink с последующим анализом ее работы при питании от промышленной сети переменного тока через ограничительный дроссель.

В работе [52] сформулированы требования к уравнениям дифференциальной модели лампы. В частности, отмечается ограниченность моделей, основанных на алгебраической аппроксимации. Дифференциальные математические модели позволяют учесть начальные условия развития разряда, а также инерционность процесса развития этого разряда. Дифференциальные модели должны быть достаточно точными и простыми. Существенным условием является возможность измерения параметров, определяющих поведение модели. Эти параметры должны легко измеряться или рассчитываться с достаточной для инженерных исследований точностью. Предложенные для использования определяющие параметры связаны с поведением частиц, которые способны запасать энергию в любом виде, соответствующем электрическим, магнитным и тепловым процессам, а также процессам ионизации атомов.

Именно эти процессы оказывают существенное влияние на основной (с точки зрения питающей сети) параметр лампы – ее эквивалентную электрическую проводимость. Основанные на учете этих факторов модели могут успешно использоваться при исследовании переходных и установившихся процессов в цепях с лампами (в том числе и режимов) как с наличием пауз тока, так и режимов без этих пауз.

Для уточнения моделей на основе определяющих параметров предлагается их постепенное усложнение путем наращивания структуры модели на основе теоретических и экспериментальных исследований. В лампах высокого давления в качестве основных учитываемых видов энергии используются энергия ионизированных атомов ртути и энергия движения заряженных и нейтральных частиц. В общем случае такими частицами являются электроны, ионы и нейтральные атомы.

Для ламп высокого давления наиболее приемлемы результаты модели, представленной системой двух нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dg_{\text{л}}}{dt} = A_{\text{л}} U_0^2 \frac{(\frac{i_{\text{л}}}{\beta U_0})^2 - g_{\text{л}}^2}{1 + k_1 (\frac{i_{\text{л}}}{\beta g_{\text{л}} U_0} - 1)}, \end{array} \right. \quad (6.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\beta}{dt} = [k_2 + k_3 (\frac{i_{\text{л}}}{\beta g_{\text{л}} U_0})^{k_4}] \cdot [1 + k_1 (\frac{i_{\text{л}}}{\beta g_{\text{л}} U_0} - 1) - \beta], \end{array} \right. \quad (6.6)$$

где $g_{\text{л}}$ – приведенная проводимость лампы, учитывающая среднее значение концентрации электронов;

β – безразмерный коэффициент, изменяющийся во времени и учитывающий подвижность электронов;

$i_{\text{л}}$ – ток, протекающий через лампу;

U_0 – номинальное напряжение на лампе;

$A_{\text{л}}$ – коэффициент, определяемый конструкцией лампы;

$k_1 - k_4$ – электрические коэффициенты, определяемые для конкретного типа лампы.

В качестве примера рассмотрим лампу ДРЛ–400, для которой $k_1 = 0,6$; $k_2 = 1,5 \cdot 10^4$; $k_3 = 3 \cdot 10^4$; $k_4 = 1,5$; $U_0 = 131$; $A_{\text{л}} = 5,5$.

Проводимость лампы $G_{\text{л}}$ может быть определена по формуле:

$$G_{\text{л}} = \beta g_{\text{л}}. \quad (6.7)$$

Она изменяется во времени, поскольку β и $g_{\text{л}}$ в свою очередь, являются переменными во времени.

Мгновенные значения тока и напряжения лампы можно связать по закону Ома, выразив напряжение на лампе через ток и ее проводимость:.

$$U_{\text{л}} = \frac{i_{\text{л}}}{G_{\text{л}}}. \quad (6.8)$$

При питании лампы через индуктивный ограничитель уравнения лампы (6.5) и (6.6) необходимо дополнить уравнением по закону Кирхгофа для напряжений, учитывая то, что через все элементы, соединенные последовательно, протекает один и тот же ток:

$$e_c(t) = R i_{\text{л}} + L \frac{di_{\text{л}}}{dt} + U_{\text{л}}, \quad (6.9)$$

где $e_c(t) = E_m \sin(\omega t + \alpha)$ – напряжение питающей сети;

L , R – соответственно индуктивность и активное сопротивление ограничительного дросселя.

Чтобы представить это уравнение в форме задачи Коши, выразим производную от тока лампы через переменные состояния и задающие величины источников:

сигнальный функциональный граф, по которому легко можно сформировать визуальную модель системы электропитания лампы, учитывая ее нелинейность (рис. 6.9).

Учитывая особенности моделируемых математических зависимостей, обусловленных наличием переменных в знаменателях математических выражений, для этих переменных в соответствующих интеграторах следует установить ненулевые малые начальные значения. Таким образом исключаются ситуации переполнения при делении на ноль, приводящие к аварийной остановке работы модели на начальном этапе ее функционирования.

Для наблюдения за результатами работы модели используется виртуальный осциллограф *Ec-iL-UL*, на который выводятся графики напряжения сети, тока и напряжения самой лампы.

Диаграммы переходного процесса включения лампы в виде питающего синусоидального напряжения сети, напряжения и тока лампы представлены на рисунке 6.10.

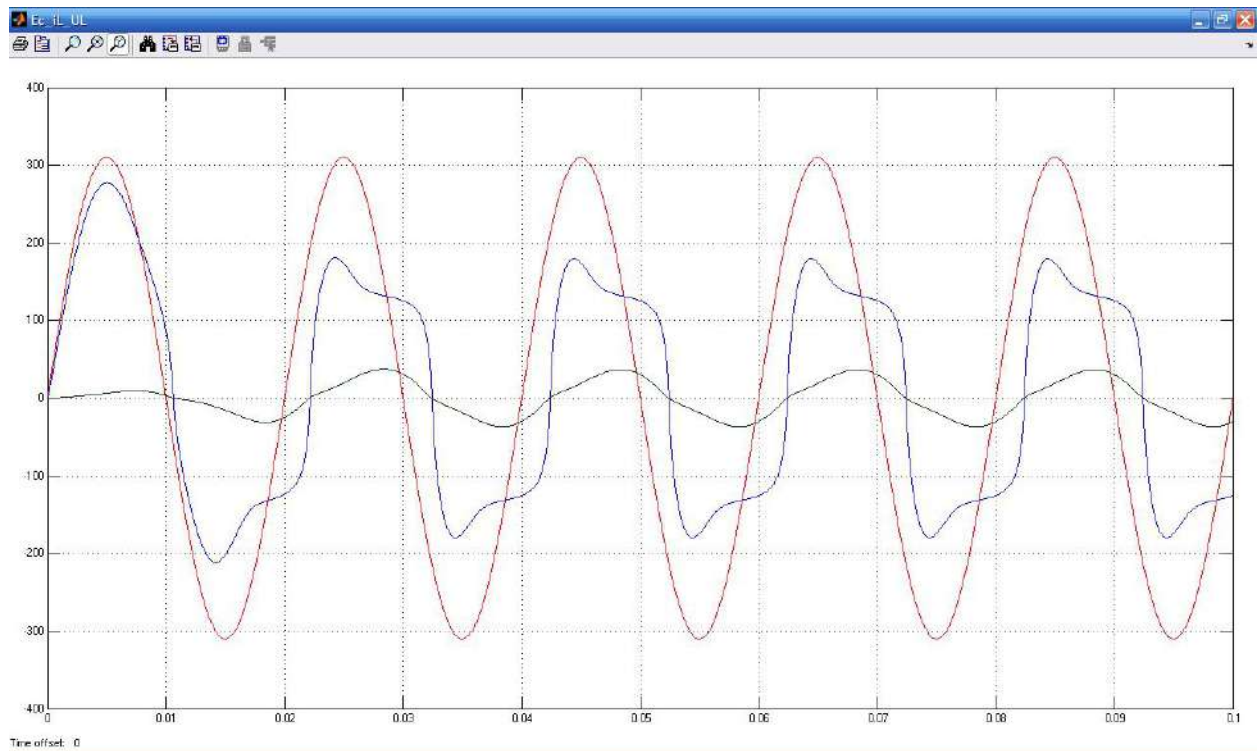


Рисунок 6.10 – Диаграммы процесса пуска системы электропитания лампы

Разработанная визуальная математическая модель лампы высокого давления основана на относительно простых и адекватных дифференциальных уравнениях. Эти уравнения правильно отражают нелинейные и динамические свойства лампы при её питании от сети через ограничительный дроссель. При помощи стандартных вычислительных блоков модель может быть реализована в любой системе визуального динамического моделирования. Параметры модели для определенного типа ламп можно вычислить путем анализа конструктивных особенностей лампы

или обработки серии экспериментов с лампой. Полученные с помощью модели временные диаграммы тока и напряжения в ней адекватно и достаточно точно отображают реальные электромагнитные процессы в системе электропитания лампы. Модель можно использовать для исследования переходных и установившихся процессов в системах электропитания ламп высокого давления, а также для нахождения оптимальных условий работы систем освещения с точки зрения энергетических показателей этой системы.

Оптимизацию режима в системе электропитания лампы осуществим по такому же алгоритму, который использован в предыдущем разделе для системы с дуговым разрядом. На рисунке 6.11 изображена модель системы питания лампы переменным током.

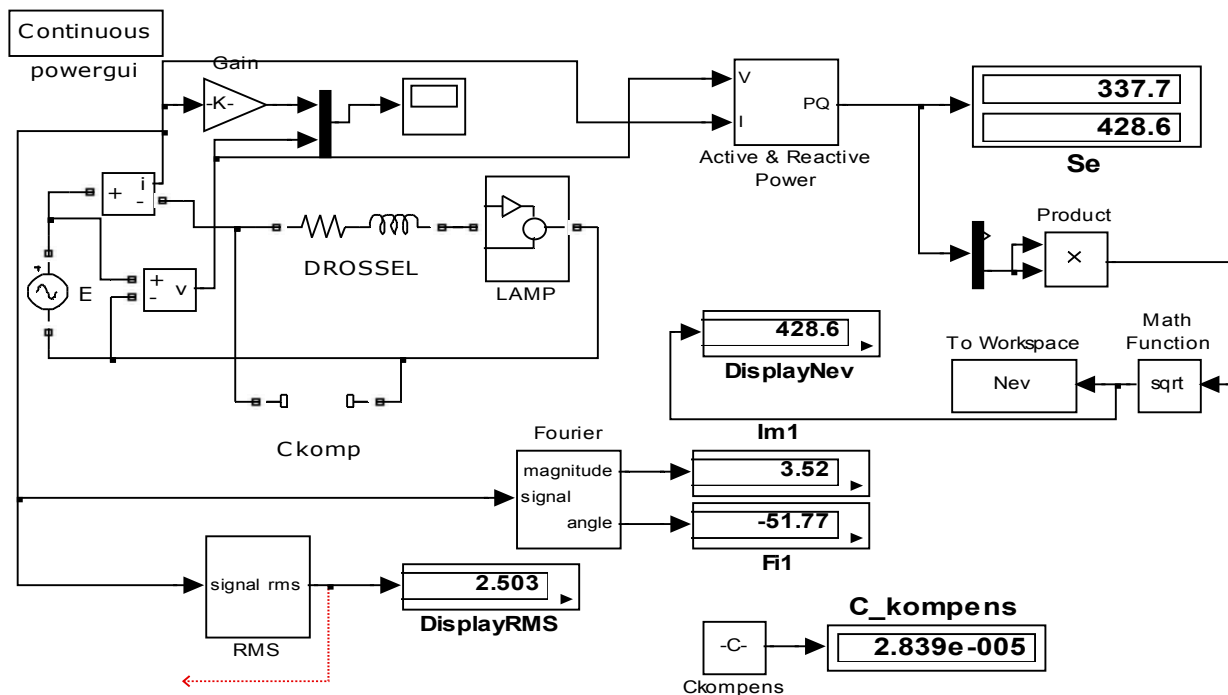


Рисунок 6.11 – Модель системы питания лампы переменным током без устройства компенсации реактивной мощности

Модель лампы (рис. 6.9) представлена в виде подсистемы LAMP. Она питается от источника переменного напряжения E через ограничительный дроссель DROSSEL, модель которого учитывает активное сопротивление. Индуктивность дросселя – 0,175 Гн, активное сопротивление – 5 Ом. При отсутствии компенсирующего конденсатора C_{komp} от источника потребляется мощность $Se=337,7+j428,6$ ВА. Амплитуда первой гармоники тока сети составляет 3,52 А, а ее фазовый сдвиг - -51,77 эл. град., что соответствует отстающему от напряжения току. Это отставание обусловлено особенностями работы лампы из-за необходимости достижения напряжения зажигания дуги, а также наличием в цепи ограничительного дросселя. Действующее значение тока в линии электропередачи, обуславливающее тепловые потери, составляет величину 2,503А. Работа этой системы электроснабжения характеризуется низким коэффициентом сдвига:

$$\cos(51,77^\circ) = 0,6188.$$

Модель системы питания лампы при наличии устройства компенсации реактивной мощности, представлена на рисунке 6.12.

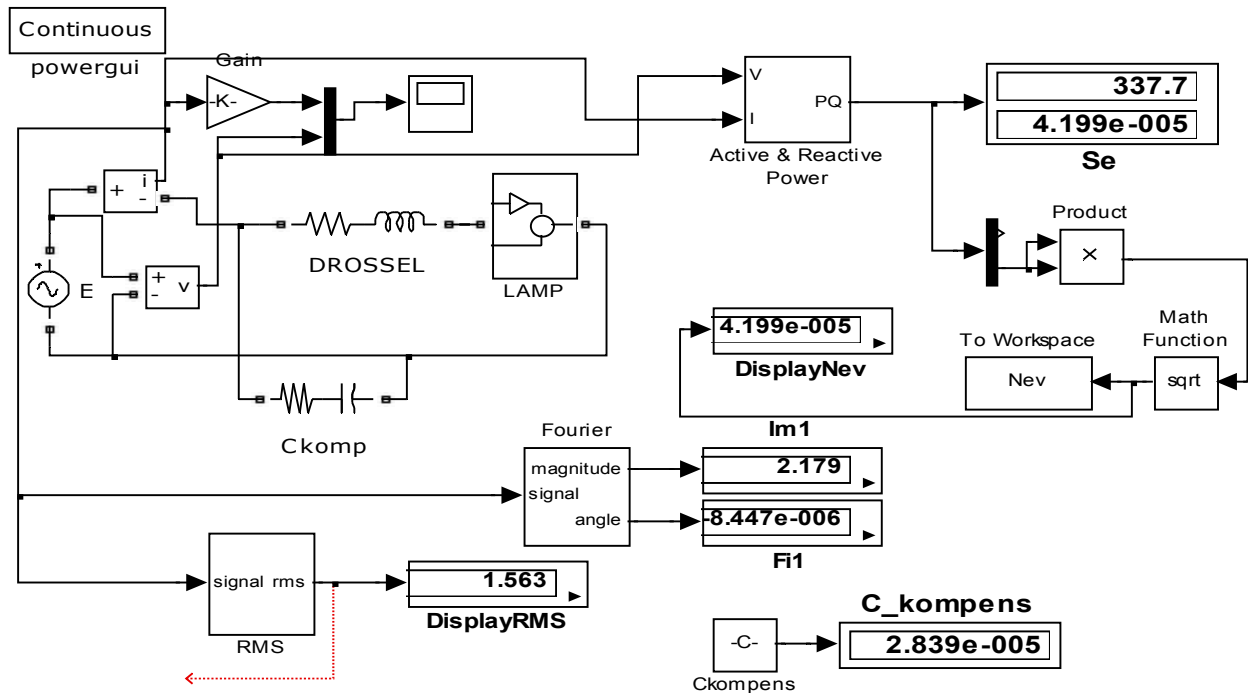


Рисунок 6.12 – Модель системы питания лампы с компенсацией реактивной мощности

Для компенсации реактивной мощности в систему включен конденсатор C_{komp} . Последовательно с ним введен резистор с малым сопротивлением для развязки топологического вырождения, обусловленного образованием контура, который состоит из источника напряжения и идеального конденсатора. В качестве критерия оптимизация используется модуль реактивной составляющей полной мощности, отдаваемой источником. Переменной оптимизации служит величина емкости компенсирующего устройства. Виртуальные измерительные приборы, приведенные на рисунке 6.12, отображают показания, полученные после минимизации реактивной мощности, отдаваемой источником напряжения. При наличии компенсирующего конденсатора C_{komp} емкостью 28,39 мкФ от источника потребляется мощность $S_e = 337,7 + j4,199E-5$ ВА. Амплитуда первой гармоники тока сети составляет 2,179 А, а ее фазовый сдвиг – $-8,447E-6$ эл. град., что соответствует практически полному совпадению тока в фазе с его напряжением. Действующее значение тока в линии электропередачи, обуславливающее тепловые потери, существенно уменьшилось и составляет величину 1,563 А. Теперь работа системы электроснабжения характеризуется единичным коэффициентом сдвига: $\cos(-8,447E-6^\circ) = 1,0$.

На рисунке 6.13,а и 6.13,б изображены соответственно временные диаграммы питающего фазного напряжения, имеющего синусоидальную форму, и тока в питающей фазе (увеличен в 100 раз для наглядности), отличающегося несинусоидальной формой.

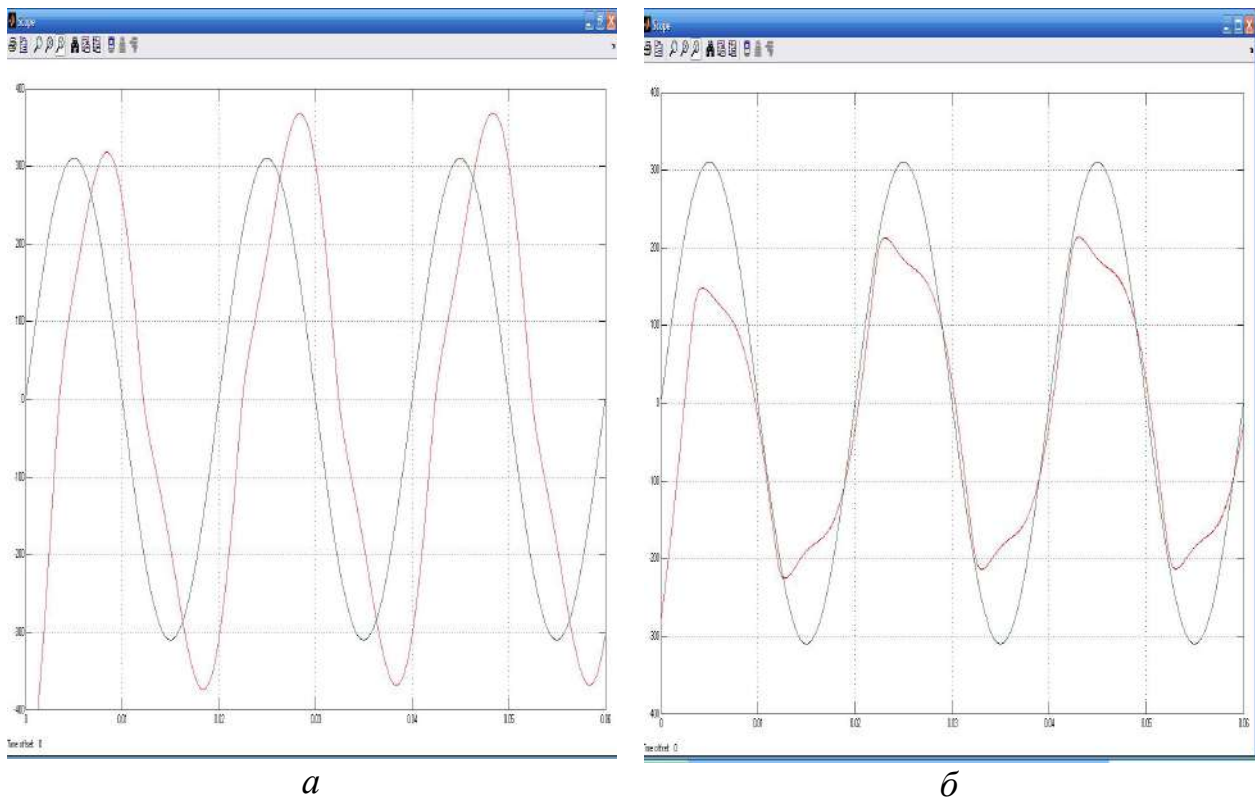


Рисунок 6.13: *а* – напряжение и ток в сети питания лампы без компенсации реактивной мощности; *б* – то же в режиме полной компенсации реактивной мощности

На этих диаграммах хорошо видно, что при введении компенсирующего устройства заметно снижается амплитудное значение тока, а фаза тока стремится приблизиться к фазе питающего фазного напряжения.

6.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Одним из основных источников реактивной мощности являются вращающиеся электрические машины, в частности, на долю асинхронных двигателей приходится до 70-80 % реактивной мощности в системах электроснабжения промпредприятий. В связи с этим вопросы компенсации реактивной мощности в системах питания асинхронных двигателей исключительно актуальны, в том числе для таких сфер использования, как привод станков, сельскохозяйственных механизмов, подъемных устройств.

Рассмотрим систему питания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором непосредственно от трехфазной системы электроснабжения, в которой компенсация реактивной мощности может быть достигнута путем шунтирования статорных обмоток косинусными конденсаторами [37]. Определять оптимальные условия компенсации реактивной мощности будем с помощью метода поисковой оптимизации, используя модель системы электроснабжения, представленную на рисунке 6.14.

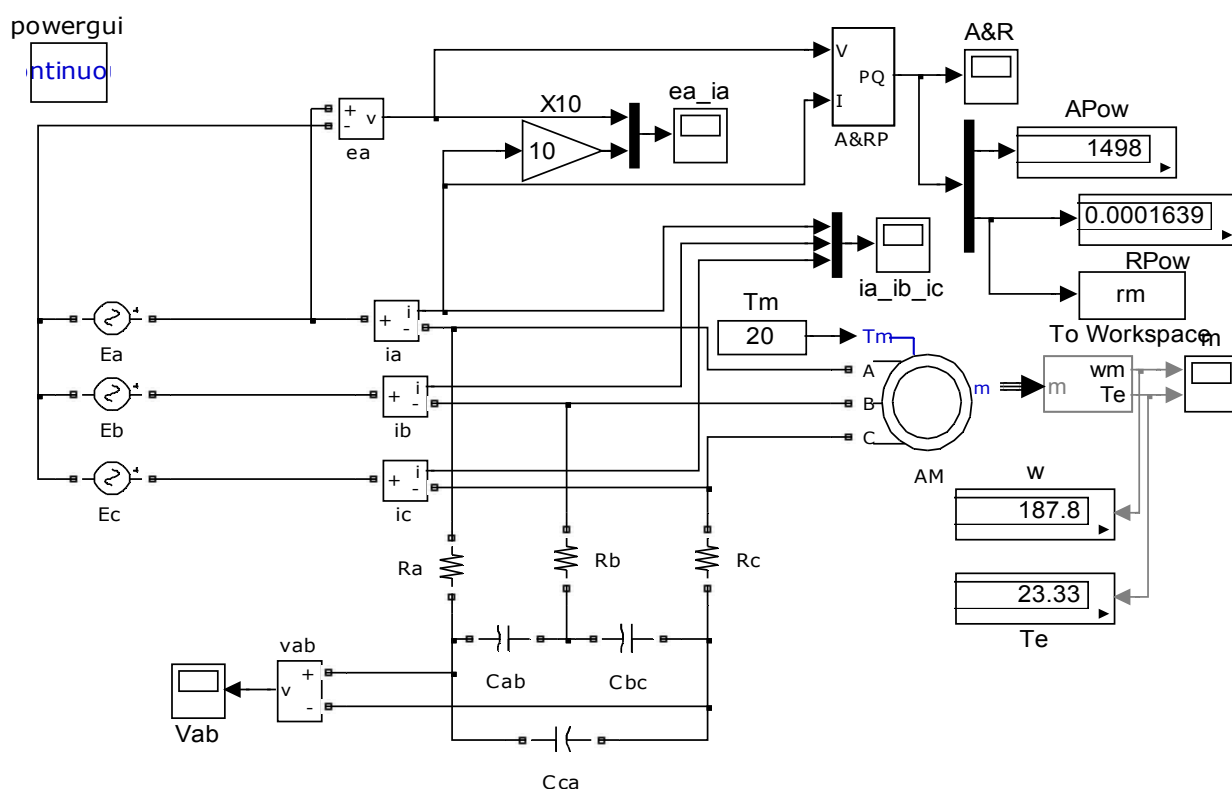


Рисунок 6.14 – SPS-модель электроснабжения асинхронного двигателя

Питание осуществляется непосредственно от симметричной трехфазной системы напряжений E_a , E_b , E_c . Как испытуемый из библиотеки моделей SPS системы выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 20НР. В качестве целевой функции используется модуль реактивной мощности. Функция вычисляется в установившемся процессе при помощи виртуального PQ-измерителя. Поскольку рассматривается симметричная система, достаточно проводить измерения только в одной из фаз системы электроснабжения. Измеренное значение реактивной мощности фазы А передается через виртуальный прибор To Workspace в рабочую область, где используется основной программой как критерий оптимизации. Как процедура оптимизации использована встроенная подпрограмма поиска оптимального решения на основе метода деформируемого многогранника Нелдера-Мида. Параметрами оптимизации являются емкости компенсирующих конденсаторов C , включаемых симметрично по схеме треугольника между фазами линии электропередачи. Переменная C описывается как глобальная, поэтому она доступна как в основной программе, так и в процедуре вычисления целевой функции, а также в самой SPS-модели.

Работа системы поисковой оптимизации на каждом шаге определяется такими этапами:

1. Запуск SPS-модели системы электроснабжения и прогон ее в течение интервала времени, достаточного для установления процесса.
2. Передача значения модуля реактивной мощности из SPS-модели в рабочую область.
3. Вычисление критерия оптимизации в соответствующей процедуре.

4. Осуществление стратегии поиска оптимального решения по методу деформируемого многогранника и корректировка значения компенсирующей емкости.

5. Передача найденного значения скорректированной емкости в рабочее пространство SPS-модели для последующего ее запуска.

При реализации модели были установлены следующие параметры:

Для двигателя: номинальная мощность - 14920 Вт, частота - 60 Гц, линейное напряжение - 460 В, активное сопротивление и индуктивность рассеивания статора - 0.2761 Ом и 0.002191 Гн, для ротора - 0.1645 Ом и 0.002191 Гн, взаимная индуктивность - 0.7614 Гн, момент инерции - 0.1 кгм², коэффициент трения - 0.01771. Выбран нагрузочный момент - 20 кГм. Время моделирования до установления процессов - $t = 7$ сек, шаг интегрирования - $\Delta t = 10^{-4}$, метод интегрирования – ode23t (mod. stiff/Trapezoidal).

Для обеспечения условий работы модели необходимо было ввести резисторы, через которые треугольник компенсирующих конденсаторов присоединяется к линиям электропередачи. При этом устранялись топологические вырождения второго рода. Начальные значения емкостей конденсаторов принимались равными 10⁻⁷ Ф, поскольку нулевые значения приводят к переполнению ячеек при вычислениях правых частей уравнений состояния, в которых емкости конденсаторов находятся в знаменателях. При указанных условиях за 73 итерации было найдено решение, при котором реактивная мощность на одной фазе уменьшилась с начального значения 2414 ВАр до 1,057Е-4 ВАр. При амплитуде питающего фазного напряжения $U_m = 375$ В найденная в результате оптимизации емкость конденсаторов $C = 30,09$ мкФ.

Токи в линиях электропередачи при таких условиях полной компенсации совпадают по фазе с соответствующими напряжениями. Их амплитуды уменьшились от начального значения 15,126 А (при отсутствии компенсации реактивной мощности) до 7,97 А (при полной компенсации реактивной мощности). Это значит, что потери в линии электропередачи уменьшатся примерно в четыре раза.

Необходимо заметить, что количество шагов оптимизационного процесса в реальном случае может быть существенно уменьшено, поскольку при этом не требуется повышенной точности. Полная компенсация реактивной мощности не может быть реализована с такой высокой точностью с помощью комплекта косинусных конденсаторов вследствие дискретности величин емкостей конденсаторов.

Проведенное на SPS-модели исследование с привлечением поисковой оптимизации показало эффективность предложенного подхода. Продемонстрирована также действенность компенсации реактивной мощности на уровне потребителя электроэнергии при работе асинхронного двигателя непосредственно от сети. Кроме того, показана возможность построения на основе предложенного подхода системы управления устройством автоматического выбора режима работы конденсаторного устройств компенсации реактивной мощности в системе электропитания асинхронного двигателя.

6.4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПИТАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ АСИММЕТРИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Асинхронные двигатели являются чрезвычайно распространенными потребителями электрической энергии. Они широко применяются для электропривода механизмов в промышленности и сельском хозяйстве. Работа асинхронных двигателей сопровождается потреблением реактивной мощности, снижает коэффициент мощности в электрических сетях и приводит к росту потерь электрической энергии. По статистическим данным в Украине на долю асинхронных двигателей приходится до 35 % реактивной мощности от ее общего объема. В рамках промышленного предприятия доля реактивной мощности, приходящейся на асинхронные двигатели, вообще достигает 70 %. Неравномерность нагрузки фаз системы электроснабжения приводит к несимметрии питающего напряжения. В этих условиях возникает составляющая обратной последовательности, которая влияет на электромеханические процессы и приводит к увеличению потерь в самом двигателе. Поэтому вопросы оптимизации режимов электроснабжения асинхронных двигателей достаточно актуальны, особенно для электрических систем сельского хозяйства.

Рассмотрим исследование на SPS-модели режимов питания асинхронного двигателя от системы с несимметрией напряжений при включении конденсаторов параллельно двигателю для улучшения условий работы системы электроснабжения в целом.

Исследуемая система представлена на рисунке 6.15. Асинхронный двигатель питается от трехфазной системы, которая моделируется источниками напряжения с последовательно включенными активно-индуктивными сопротивлениями линии электропередачи.

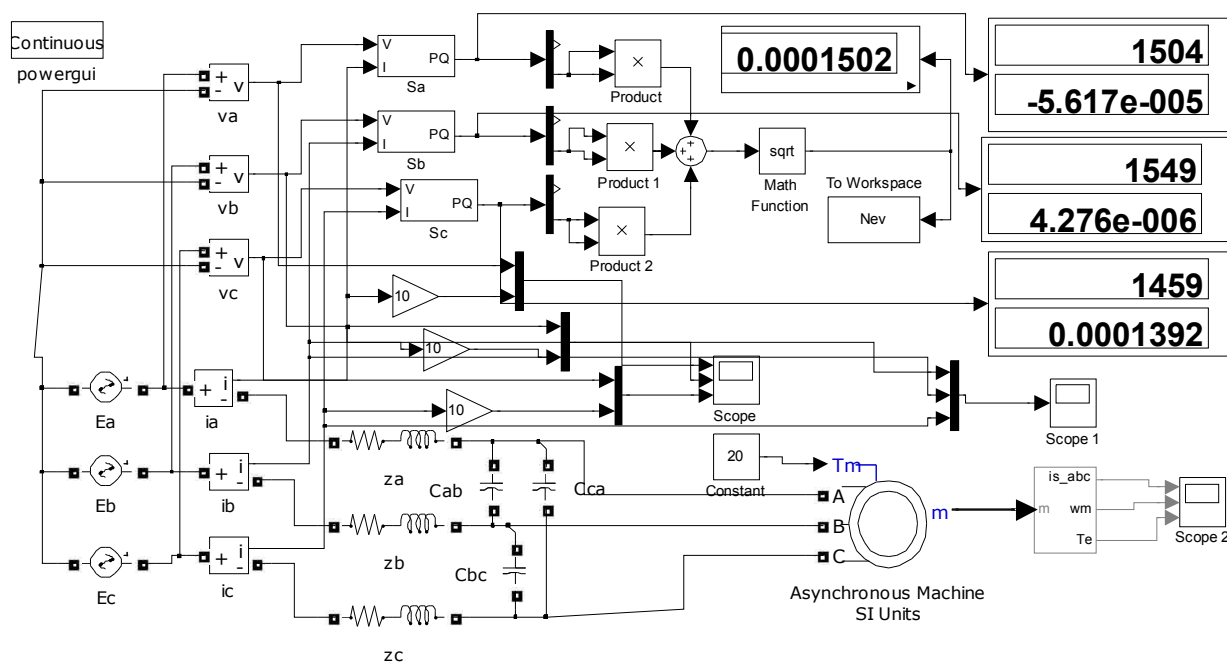


Рисунок 6.15 – SPS-модель питания асинхронного двигателя

Как двигатель используется асинхронный двигатель типа 20НР с напряжением питания 460 В и частотой 60 Гц, который вращается со скоростью 1760 об / мин. Для создания несимметрии напряжения источника фазы В увеличена на 3%, а напряжение фазы С уменьшена на 3%. На двигатель воздействует внешний постоянный механический момент, величина которого равна 20 Нм.

Система электроснабжения исследуется с помощью метода поисковой оптимизации, который эффективен при исследовании системы электроснабжения со статической несимметричной нагрузкой при компенсации в ней реактивной мощности с помощью батареи конденсаторов. В качестве критерия оптимизации используется шаровая метрика, которая состоит из величин реактивной мощности, характеризующих режим работы источников питания. Для определения реактивных мощностей по каждой из фаз системы электроснабжения в модели используются виртуальные приборы - измерители активной и реактивной мощностей. Вычисленная величина целевой функции передается в программу оптимизации по алгоритму Нелдера-Мида, которая входит в состав математического обеспечения системы MATLAB.

При несимметрии системы питания с помощью указанного метода достигнута полная компенсация реактивной мощности в системе питания асинхронного двигателя, что сопровождается также симметризацией питающих токов системы электроснабжения. При этом источники питания отдают только активную мощность, по фазам А, В, С они составляют значения соответственно 1504, 1549, 1459 Вт. Амплитуды токов в линиях электроснабжения уменьшаются и уравниваются. Временные диаграммы линейных токов в установившемся режиме представлены на рисунке 6.16.

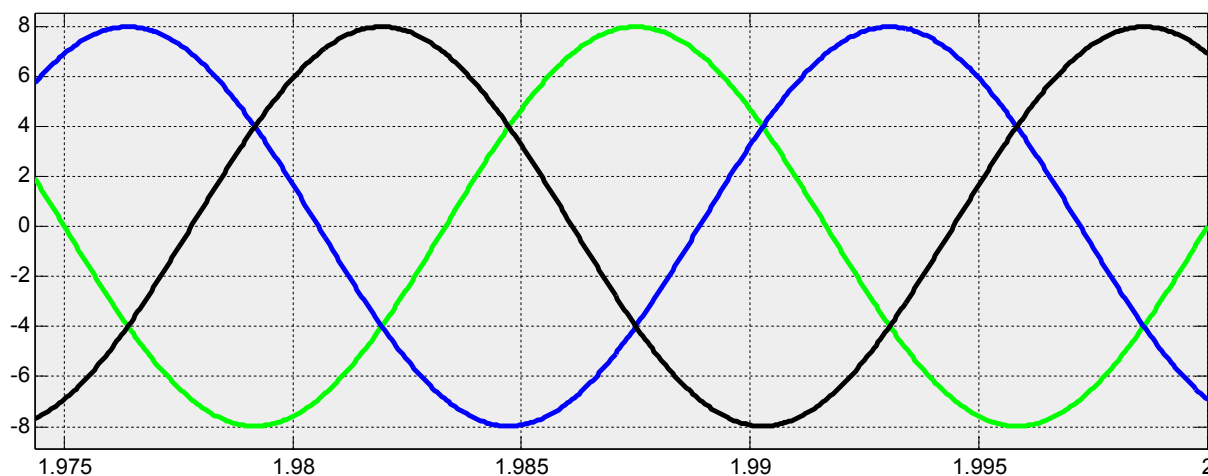


Рисунок 6.16 – Линейные токи при компенсации реактивной мощности

Необходимо отметить, что при такой компенсации симметризируют только линейные токи, однако питающие напряжения при несимметричном питании остаются несимметричными со всеми негативными последствиями в работе асинхронного двигателя.

Таким образом, применение поисковой оптимизации для улучшения условий электроснабжения асинхронного двигателя представляется принципиально возможным. С помощью компенсирующих конденсаторов в системе электроснабжения достигается полная компенсация реактивной мощности. При этом симметрируются и существенно уменьшаются токи в линиях питания, однако сохраняется несимметрия напряжений, питающих асинхронный двигатель.

7 СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СИЛОВЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

7.1 ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В ТИРИСТОРНОМ КОМПЕНСАТОРЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Тиристорные компенсаторы реактивной мощности являются перспективными устройствами, позволяющими существенно улучшить условия потребления электроэнергии [37] за счет плавного регулирования реактивной мощности. Их применение позволяет сократить потери дефицитной электроэнергии и снизить нагрузки на линии электропередач, повысить запасы устойчивости системы и улучшить коэффициент мощности [38]. Применение в компенсирующих устройствах линейных накопителей энергии приводит к существенному увеличению мощности используемых элементов и, кроме того, не позволяет точно скомпенсировать реактивную мощность в системе. Введение управляемых реакторов позволяет добиться точной компенсации реактивной мощности в системе за счет управления углами отпирания и длительностями интервалов проводимости тиристоров.

Модель тиристорного компенсатора реактивной мощности представлена на рисунке 7.1. Рассматривается трехфазная несимметричная система электроснабжения с резко несимметричной активно-индуктивной нагрузкой. Это обуславливает циркуляцию в системе реактивной мощности, в том числе и соответствующей появлению несимметрии и симметричных составляющих обратной последовательности. Указанные обстоятельства существенно осложняют аналитический расчет компенсирующих и симметрирующих устройств. В рассматриваемой схеме таковые включены между фазами в виде батарей конденсаторов, причем их емкости установлены таким образом, чтобы обеспечить некоторую избыточную компенсацию реактивной мощности индуктивного характера. В действительности это соответствует дискретности параметров компенсирующих батарей конденсаторов и в связи с этим невозможно осуществить точную компенсацию реактивной мощности. Чтобы ее обеспечить, используют три управляемых реактора со встречно-параллельно включенными тиристорами.

Управление тиристорами осуществляется от источников периодических импульсов с соответствующими временными сдвигами относительно моментов пересечения линейными напряжениями оси времени. Необходимо подчеркнуть, что настройка системы управления тиристорами осложняется еще и тем обстоятельством, что линейные напряжения на нагрузке сильно искажены за счет несимметрии нагрузки, благодаря чему смещаются и напряжения на тиристорах. Это в свою очередь влияет на возможность отпирания тиристора в рассчитываемый момент времени. При этом отпирательный импульс на тиристор может быть подан в нужный момент времени, однако тиристор может не открыться, поскольку его анодное напряжение будет отрицательным.

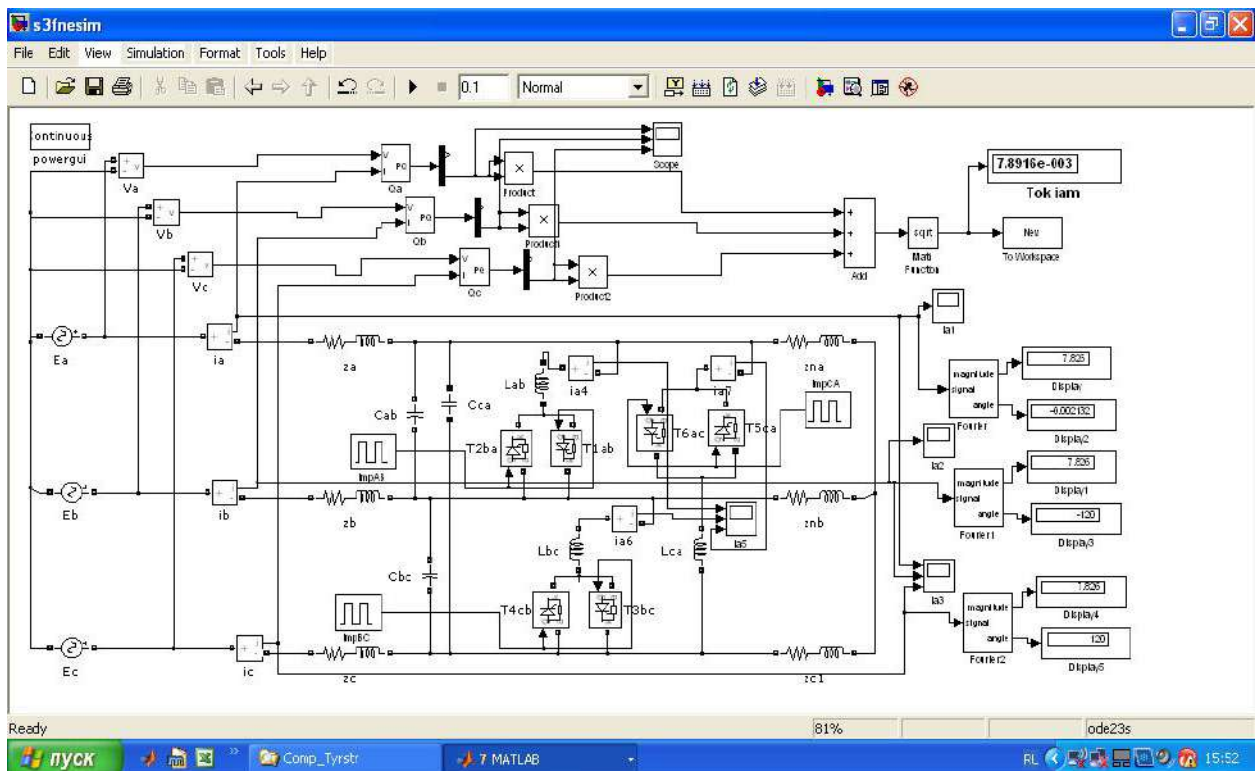


Рисунок 7.1 – Визуальная модель системы электроснабжения с тиристорно-реакторным компенсатором реактивной мощности

Для получения решения с помощью оптимизационных методов в модели введены дополнительные вычислительные блоки, обеспечивающие вычисление необходимых показателей, формирование целевой функции и параметров оптимизации, осуществляемой встроенной функцией MATLAB, с помощью которой реализуется симплекс-метод по алгоритму Нелдера–Мида.

Как видно из структуры модели, в каждую фазу системы электроснабжения включены вычислительные блоки для определения реактивной мощности. Из этих значений формируется критерий оптимизации в виде шаровой метрики, и полученное значение передается в общую память рабочего пространства MATLAB. В роли параметров оптимизации используются временные смещения управляющих импульсов, заведенные в свойства соответствующих блоков генерации импульсов в виде переменных. Значения этих переменных модель получает опять-таки через общую память рабочего пространства MATLAB после соответствующего шага обработки оптимизирующей функцией. Для контроля фазные токи подаются на вычислительные блоки Фурье-анализаторов, настроенных на первую гармонику с частотой питающего напряжения, и с помощью которых можно оценить амплитуды первых гармоник и их фазовые сдвиги.

Модель настраивается на прогон нескольких периодов, достаточных для появления квазиустановившегося режима, при котором все измерительные блоки дают устойчивые показания. Шаг интегрирования и метод установлены такими, чтобы преодолеть проблемы жесткости систем дифференциальных уравнений, присущие преобразовательным схемам.

Программные блоки состоят из основной программы, вызывающей функцию оптимизации MATLAB, и дополнительной функции, вычисляющей невязку. Процесс оптимизации состоит из шагов, внутри каждого из которых последовательно работает модель и функция оптимизации. Процесс оптимизации должен быть закончен по достижении целевой функцией достаточно малого значения. На рисунке 7.2 показаны результаты оптимизации.

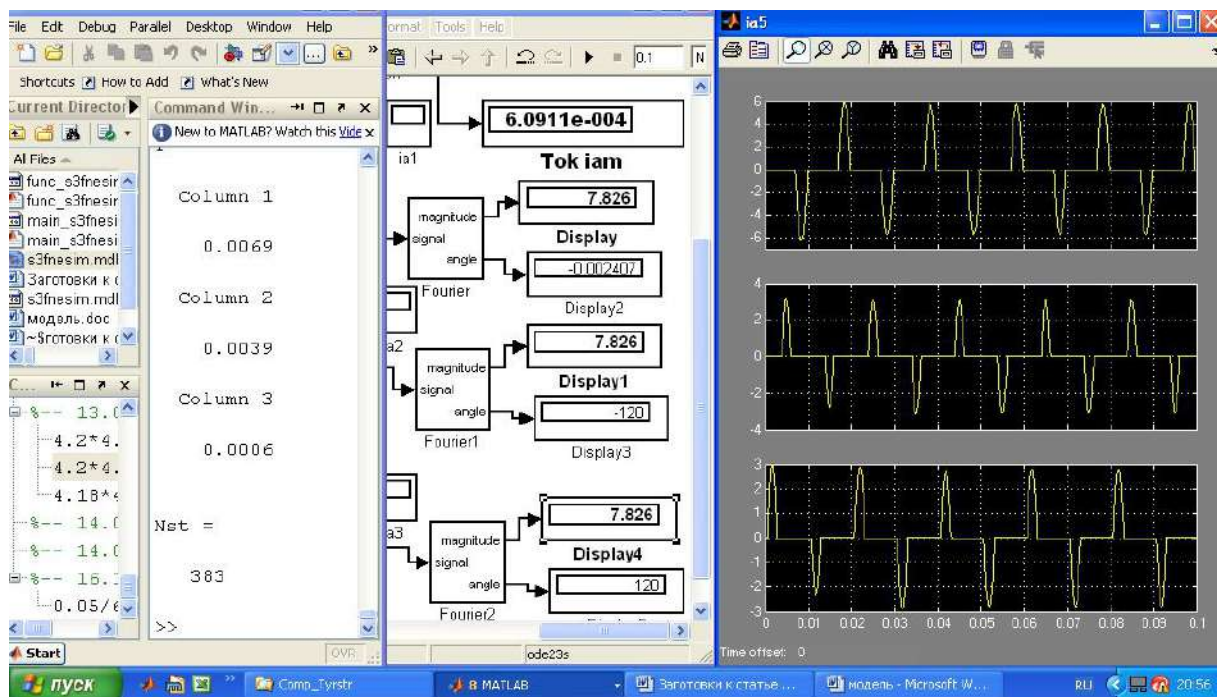


Рисунок 7.2 – Результаты оптимизации системы электроснабжения с тиристорным компенсатором реактивной мощности

Компьютерные эксперименты проводились при следующих параметрах системы. Питающие напряжения задавались 100 В по амплитуде и 50 Гц по частоте. Активное сопротивление линии электропередачи в каждой фазе – 0,1 Ом, а индуктивности по 0,001 Гн. Активные сопротивления нагрузок в фазах А, В и С соответственно составляли 0,7; 1 и 2 Ом, а соответствующие индуктивности нагрузок - 0,005; 0,01 и 0,04 Гн. Компенсирующие конденсаторы между линиями АВ, ВС и СА соответственно задавались 0,008; 0,004 и 0,001 Ф, а все индуктивности реакторов принимались равными по 0,3 Гн.

Как видно из результатов оптимизации, представленных на рисунке 7.2, в информационном окне MATLAB (левой части рис. 7.2) выведены значения смещений управляющих импульсов для реакторов, включенных между линиями АВ, ВС и СА соответственно. Они равны 0,0069; 0,0039 и 0,0006, а извлеченные из рабочей области с более высокой точностью – 0,006864; 0,003937 и 0,000622. При таком управлении целевая функция, отражающая наличие реактивной мощности, циркулирующей в системе, составила очень малое значение - 6.019E-4, практически равное нулю. Показания этих приборов представлены средней частью рисунка 7.2, где также видно, что амплитуды первых гармоник всех фазных токов выровнялись и стали

равными 7,826 А, а их фазовые сдвиги достигли значений 0, –120 и 120 эл. град., что свидетельствует о полном симметрировании этих гармоник и совпадении их по фазе с питающими фазными напряжениями. В правой части рисунка 7.2 представлены диаграммы токов через управляемые компенсирующие реакторы (они представлены в разных масштабах по осям токов).

7.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ, УПРАВЛЯЕМЫМ ПО ОПТИМИЗАЦИОННОМУ АЛГОРИТМУ

Использование силовых активных фильтров на управляемых ключах позволяет эффективно компенсировать реактивную мощность и свести сдвиг фаз практически к нулевому значению. В [33;] приведен детальный сравнительный анализ использования традиционных пассивных и современных активных фильтров. В [29] рассматривается возможность применения гибридных фильтров для улучшения качества электрической энергии и гармонического состава тока. В настоящее время в качестве активных силовых фильтров применяются инверторы, управление ключами которых может представлять собой достаточно сложные алгоритмы [29], например алгоритм, основанный на теории мгновенной мощности с преобразованием сигналов трехфазной системы в двухфазную.

Рациональным методом управления ключами инвертора является использование широтно-импульсной модуляции (далее – ШИМ), для формирования которой используется метод гистерезисной модуляции тока [29].

Однако в [29] не рассмотрена возможность применения алгоритмов оптимизации для управления силовыми активными фильтрами.

Для упрощения алгоритма управления фильтром в системе электроснабжения целесообразно применить алгоритм оптимизации. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задания:

- разработка визуальной модели однофазной сети электроснабжения и силового активного фильтра с управлением по оптимизационному алгоритму;
- определение параметров оптимизации и формирование алгоритмов вычисления целевой функции в процессе моделирования;
- применение поисковой оптимизации для определения оптимального режима работы сети электроснабжения.

Исследуемая система электроснабжения представлена на рисунку 7.3.

Рассматриваемая система состоит из трех основных модулей: СЭ – однофазная система электроснабжения с активно-индуктивной нагрузкой R_H, L_H и активно-индуктивным сопротивлением линии электропередач R_C, L_C ; САФ – силовой активный фильтр, представляющий собой полумостовой инвертор; СУ – система управления фильтром, которая построена на основе ШИМ с релейным принципом. Принятые параметры: амплитудное значение источника напряжения $E_m=100В$, частота – $f=50 Гц$. Параметры линии электропередачи: $R_c=0,1 Ом$, $L_c=0,001 Гн$, активное и

индуктивное сопротивление нагрузки – $R_H=4\text{ Ом}$, $L_H=3/100/\pi\text{ Гн}$.

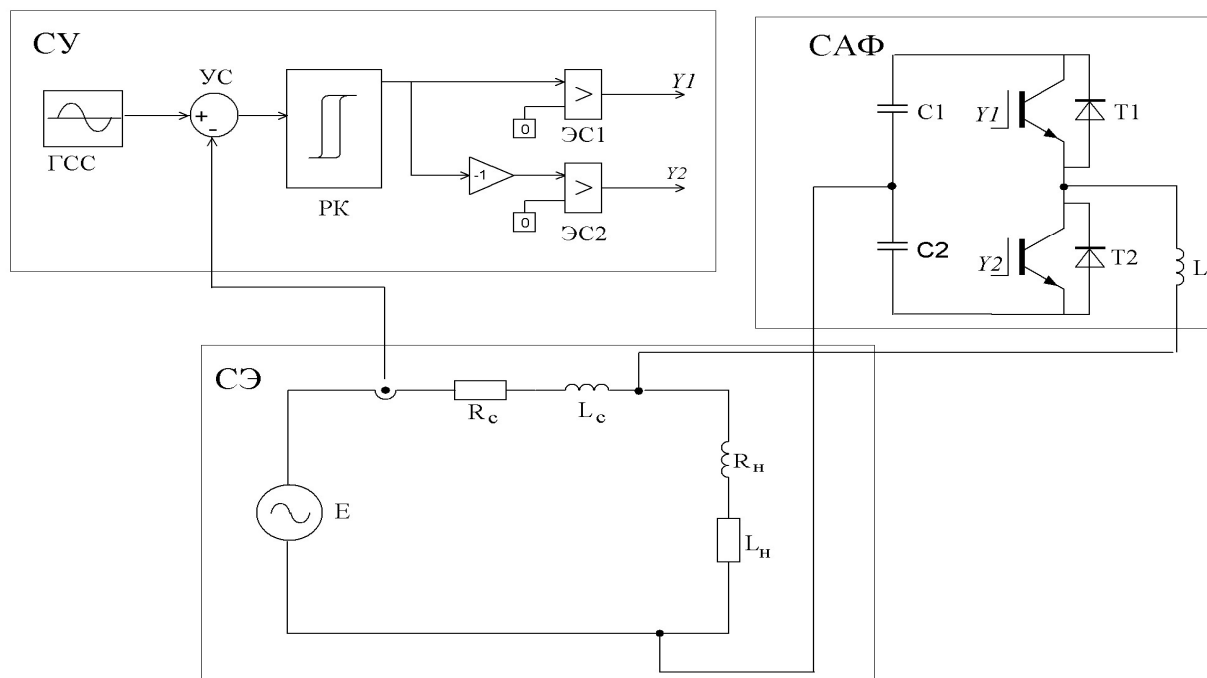


Рисунок 7.3 – Схема однофазной системы электроснабжения с активным фильтром, управляемым с релейным принципом

Инвертор состоит из двух конденсаторов и двух ключей, представляющих собой IGBT-транзисторы. Емкости конденсаторов $C_1=C_2=500\text{ мФ}$, индуктивность дросселя – $L=0,5/100/\pi\text{ Гн}$. Управление ключами осуществляется ШИМ с обратной связью по току с применением релейного принципа, так называемой гистерезисной или Δ -модуляцией.

В структурной схеме СУ амплитуда генератора синусоидального сигнала (далее - ГСС) определяется в процессе оптимизации. Узел сравнения (далее - УС) осуществляет сравнение эталонного тока с реальным значением тока в линии электроснабжения. В релейном компараторе (далее - РК) ширина гистерезисной петли задает ширину полосы отклонения тока сети, путем формирования импульсов, которые управляют ключами. Элементы сравнения ЭС1 и ЭС2 сравнивают поступающий сигнал с нулем и далее формируют и распределяют управляющие импульсы таким образом, чтобы они находились в противофазе.

Рассмотренная выше структурная схема однофазной системы электроснабжения с указанными параметрами реализована в виде модели в среде MATLAB и ее расширений Simulink и SimPowerSystems [65 - 67].

На рисунке 7.4 представлена модель однофазной системы электроснабжения без подключения активного фильтра.

Блоки Power of Net, Power Internal, Power of Load вычисляют активную и реактивную мощности сети линии электропередачи. Время прогона модели составляет 0,1 с, что достаточно для установления режима модели.

Диаграммы виртуального осциллографа (рис. 7.5) демонстрируют значительный сдвиг фаз сетевого тока относительно питающего напряжения.

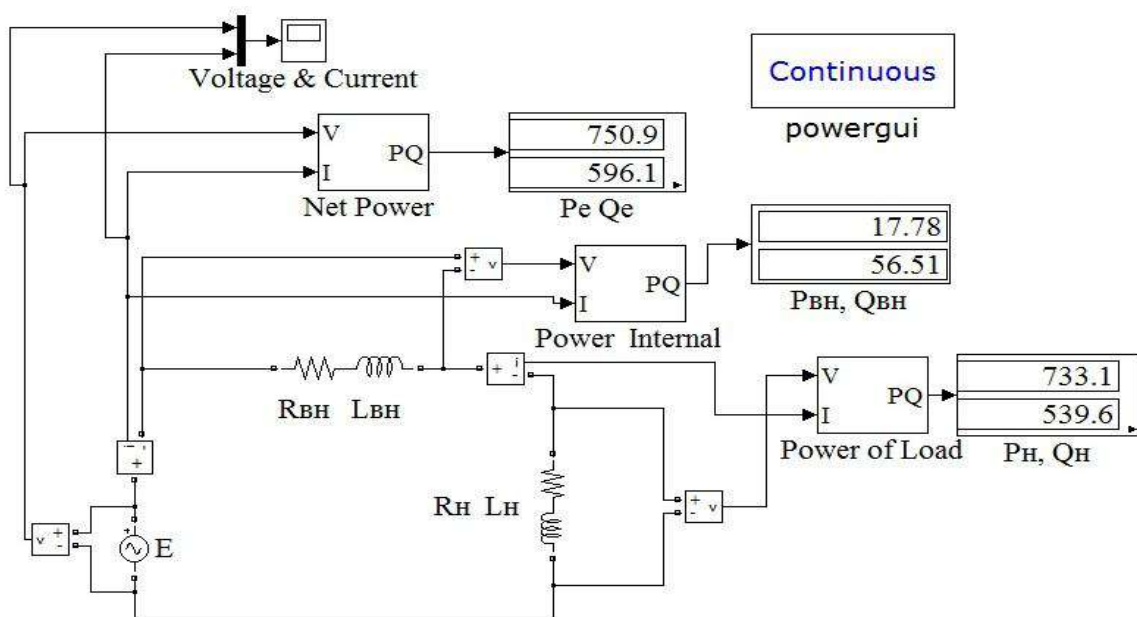


Рисунок 7.4 – Компьютерная модель однофазной системы электроснабжения

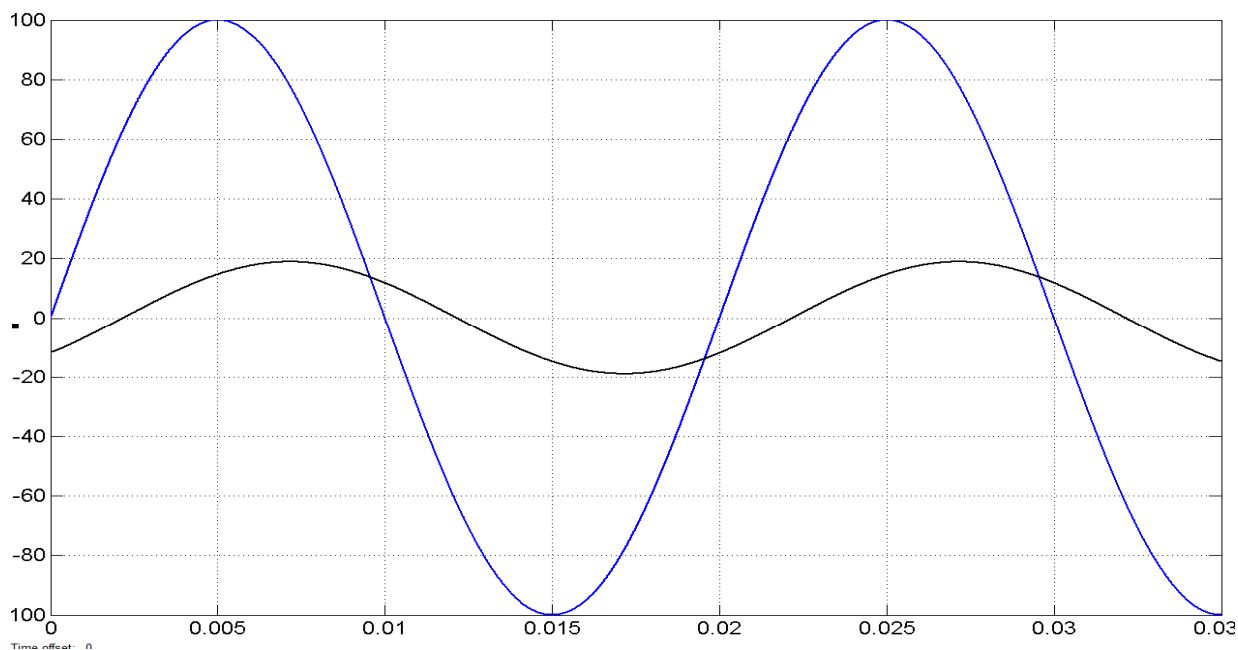


Рисунок 7.5 – Временные диаграммы сетевого тока и питающего напряжения однофазной сети до подключения активного фильтра (I – сетевой ток, V – питающее напряжение)

На рисунке 7.6 представлена компьютерная модель системы электроснабжения при подключении активного фильтра.

В компьютерной модели система управления реализована с помощью блоков модуля Simulink. Блок Sine Wave реализует эталонный синусоидальный сигнал, который по фазе совпадает с напряжением питания, блок Relay задает границы отклонений тока, блоки сравнения с нулем формируют импульсы управления ключами и распределяют их таким образом, чтобы IGBT-транзисторы работали в противофазе. Полумостовой

инвертор состоит из конденсаторов C1 и C2 и IGBT-транзисторов T1 и T2. Начальные напряжения на конденсаторах равняются 150В.

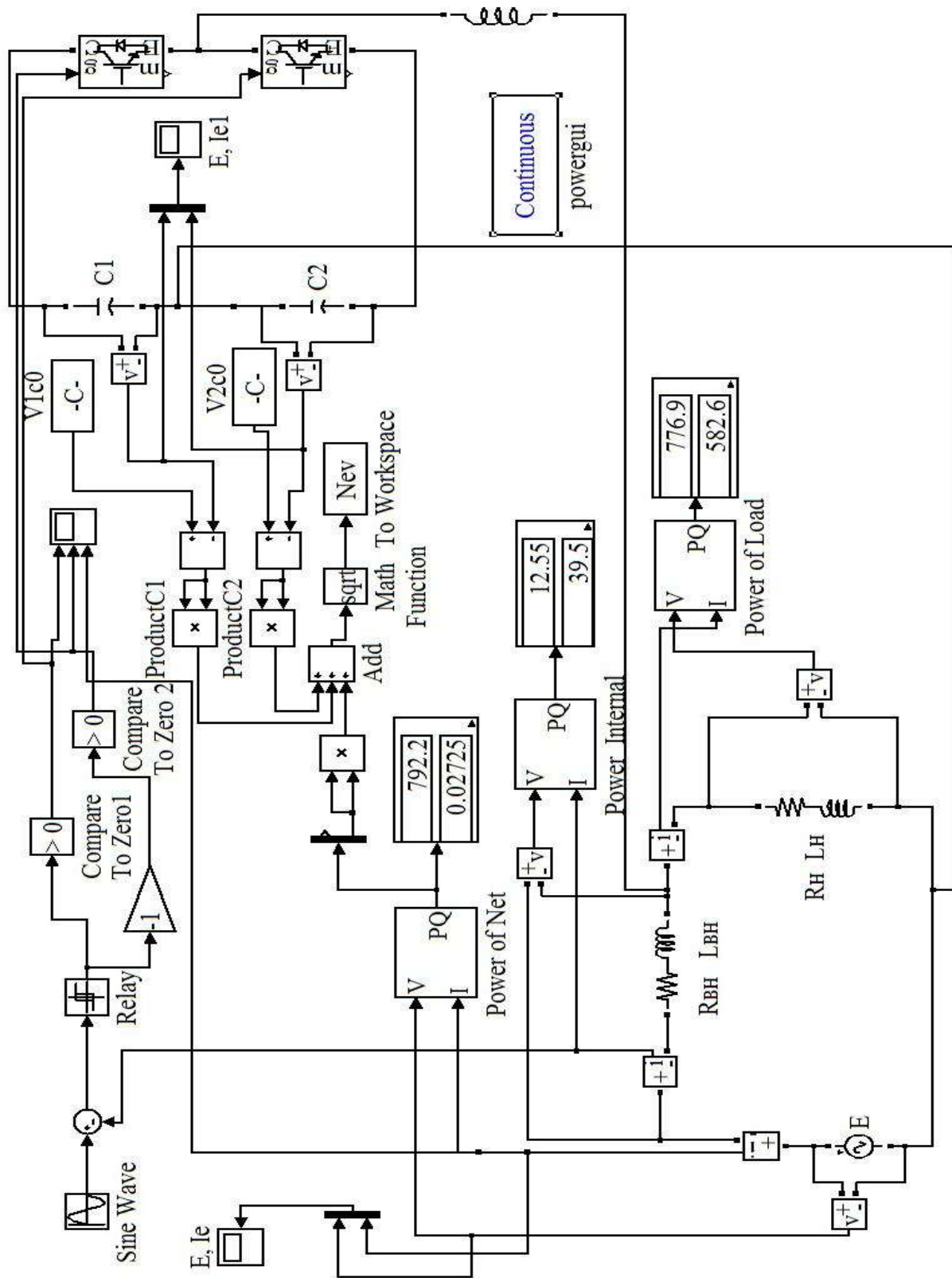


Рисунок 7.6 – Компьютерная модель системы электроснабжения с подключением силового фильтра после выполнения поисковой оптимизации

Как воздействует работа релейного регулятора тока на форму тока в сети показано на рисунке 7.7, где изображены временные диаграммы импульсов, управляющих транзисторами, и тока сети с учетом влияния тока активного фильтра.

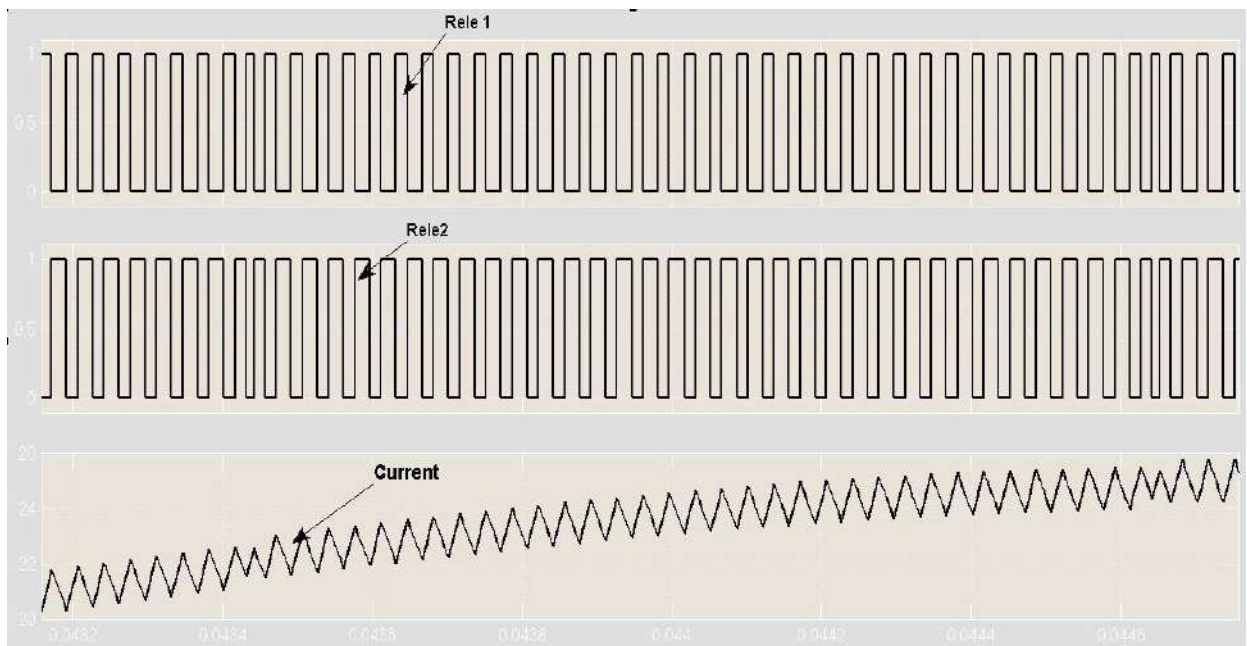


Рисунок 7.7 – Временные диаграммы тока сети и импульсов управления транзисторами

В переходном режиме системы наблюдается неустойчивость напряжений на конденсаторах: на рисунках 7.8 и 7.9 напряжения на конденсаторах возрастают в течение нескольких периодов при начальных значениях напряжений конденсаторов $V_{C01} = V_{C02} = 150 \text{ В}$ и начального значения амплитуды тока сети $I = 25 \text{ А}$.

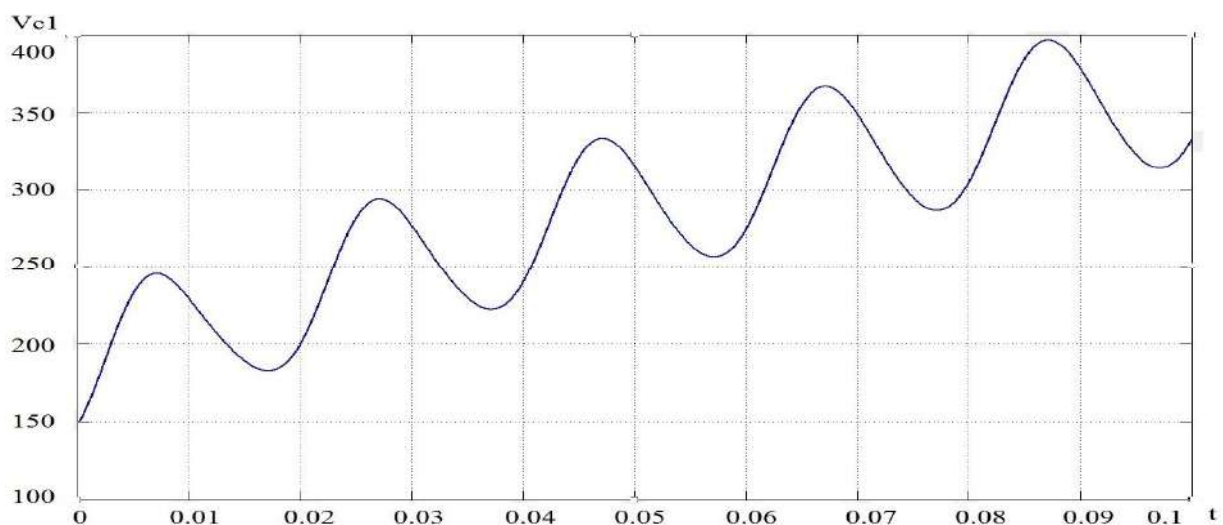


Рисунок 7.8 – Временная диаграмма напряжения на конденсаторе С1 при заданных напряжениях $V_{C01} = V_{C02} = 150 \text{ В}$ перед выполнением оптимизации

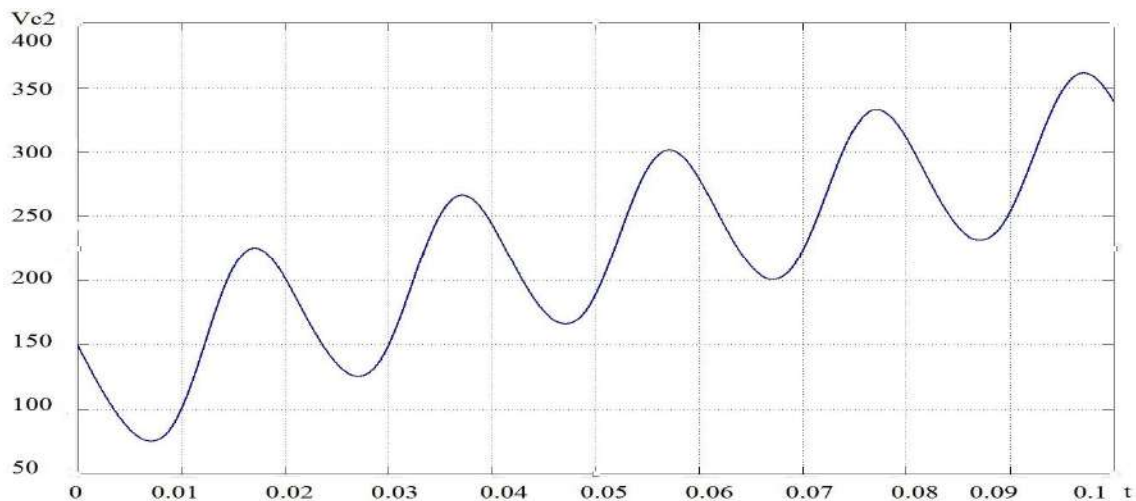


Рисунок 7.9 – Временная диаграмма напряжения на конденсаторе C2 при заданных напряжениях $V_{C01} = V_{C02} = 150 \text{ В}$ перед выполнением оптимизации

Таким образом, целью оптимизации является поиск оптимальных значений напряжений конденсаторов и эталонного значения амплитуды тока источника электроэнергии при условии стабилизации напряжения на конденсаторах.

Целевую функцию целесообразно вычислять как среднеквадратичный функционал, сконструированный по формуле:

$$N = \sqrt{(V_{Ck1} - V_{C01})^2 + (V_{Ck2} - V_{C02})^2 + Q_E^2}, \quad (7.1)$$

где $V_{Ck1}, V_{Ck2}, V_{C01}, V_{C02}$ – напряжения на конденсаторах в начале и в конце моделирования;

Q_E – реактивная мощность электрической сети, измеряемая на источнике напряжения.

Значение целевой функции вычисляется в среде MATLAB с использованием блока вычисления суммы квадратов произведений Add, значения на который поступают с умножителей ProductC1 и ProductC2 и измерителя активной и реактивной мощностей Power of Net. На элементы ProductC1 и ProductC2 поступают сигналы, равные разности значений напряжений на конденсаторах в начальный и конечный моменты интервала работы модели. Значение целевой функции передается в рабочее пространство MATLAB, где минимизируется встроенной в MATLAB файл-функцией оптимизации fminsearch() путем поиска значений параметров оптимизации.

Текст программы, осуществляющей поисковую оптимизацию, приведен на рисунке 7.10.

```
warning off
global Im Vc01 Vc02 Nst V1 V2
Nst=0
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[25 150 150])
Nst
```

Рисунок 7.10 – Текст основной программы, осуществляющей оптимизацию

В основной программе во второй строке входные параметры оптимизации задаются в качестве глобальных переменных. Эти же переменные передаются в соответствующие блоки. В четвертой строке осуществляется вызов встроенной файл-функции оптимизации с указанием дополнительной функции, осуществляющей вызов целевой функции, и начальных значений параметров оптимизации.

На рисунке 7.11 приведен текст вызываемой дополнительной функции:

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global Im Vc01 Vc02 Nst
Im=abs(x(1)*1E-0)
Vc01=abs(x(2)*1E-0)
Vc02=abs(x(3)*1E-0)
sim model
x
Nst=Nst+1
```

Рисунок 7.11 – Текст вызываемой дополнительной функции

В первой строке текста файл-функции - присвоено имя файла. Во второй строке задаются входные параметры оптимизации и номер итерации Nst. Строки 3–5 присваивают глобальным переменным абсолютные значения. Эти значения используются как начальные значения на конденсаторах и задающего тока для модели. Далее, в строке 7, программа осуществляет вызов модели, в строке 8 печатаются вычисленные значения входных параметров, а в строка 9 увеличивает номер итерации. На рисунке 7.12 изображены временные диаграммы сетевого тока и питающего напряжения после завершения процесса оптимизации, демонстрирующие отсутствие сдвига фаз тока сети относительно питающего напряжения. При этом амплитудное значение тока сети соответствует найденному значению генератора синусоидального сигнала, равному 15,79А, а напряжения на конденсаторах стабилизируются, что представлено на временных диаграммах на рисунках 7.13 и 7.14.

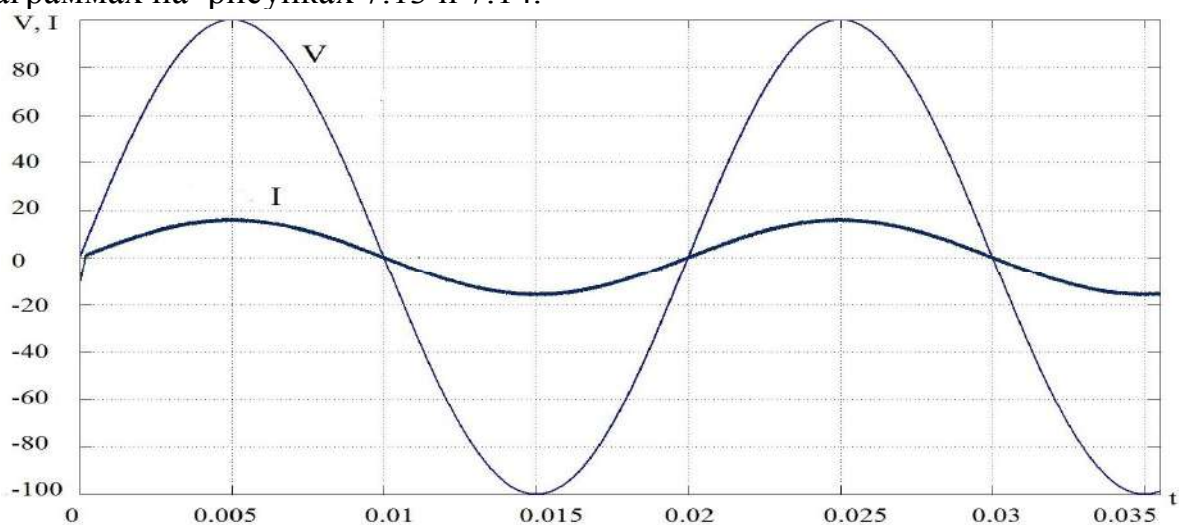


Рисунок 7.12 – Временные диаграммы сетевого тока и питающего напряжения после проведения оптимизации. I - сетевой ток; V– питающее напряжение

Начальные значения напряжений, определенные путем оптимизации, составляют величины $V_{C01}=183,3749\text{В}$; $V_{C02}=165,5182\text{В}$.

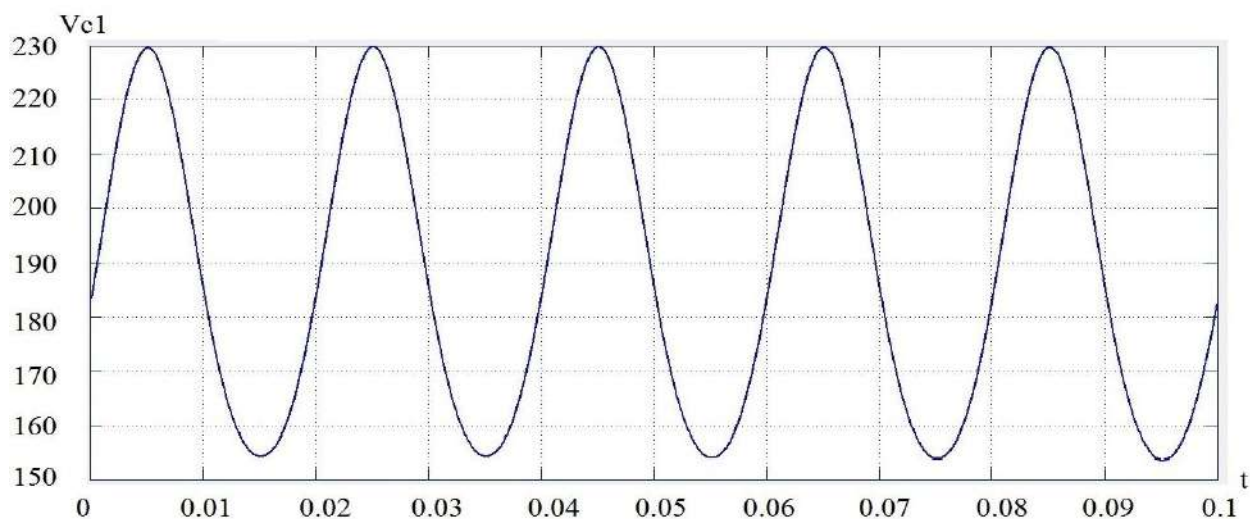


Рисунок 7.13 – Временная диаграмма напряжения на конденсаторе C1 полумостового инвертора после выполнения оптимизации

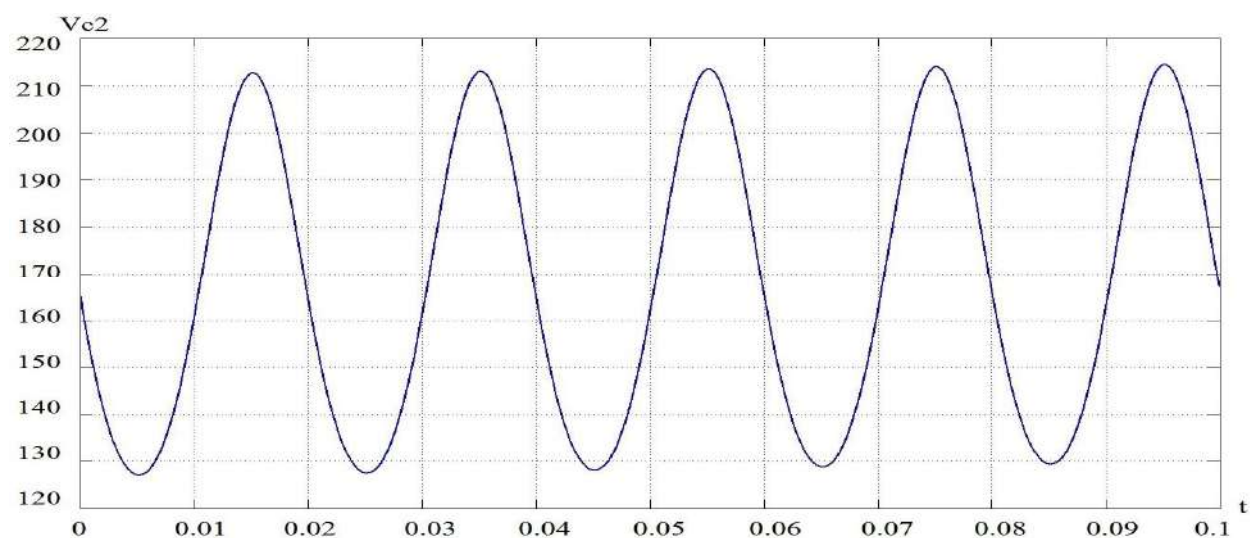


Рисунок 7.14 - Временная диаграмма напряжения на конденсаторе C2 полумостового инвертора после выполнения оптимизации

Таким образом, вследствие выполнения поисковой оптимизации были найдены такие значения амплитудного значения напряжения ГСС и начальных напряжений на конденсаторах, которые уменьшили сдвиг сетевого тока относительно питающего напряжения до нуля и максимально уменьшили величину сетевого тока.

Преимуществами рассмотренного метода является простота его реализации и точность работы. Подключение полумостового активного фильтра автоматически компенсирует реактивную мощность в сети, а оптимизация снижает сетевой ток

Результаты проведенного исследования могут применяться для повышения качества электрической энергии в сетях общего назначения, в

системах электроснабжения железных дорог и сетях технологических объектов. Таким образом, разработана и исследована компьютерная модель системы электроснабжения, в которой потребление реактивной мощности от сети снижается практически до нуля благодаря подключению силового активного фильтра. В исследуемой модели фильтр представляет собой полумостовой инвертор, управление которым осуществляется ШИМ по оптимизационному алгоритму. Исследование показало, что для управления активным фильтром можно применить поисковую оптимизацию. Обоснован способ формирования целевой функции, не требующий сложных вычислений и обработки информации. Параметрами оптимизации являются значение амплитуды сетевого тока и начальные напряжения на конденсаторах. В процессе проведения поисковой оптимизации автоматически определяется рациональный режим работы системы электроснабжения, характеризующийся повышением коэффициента мощности, уменьшением амплитуды потребляемого от сети тока и существенным снижением потерь в системе электроснабжения. При этом реактивная мощность полностью скомпенсирована, а амплитудное значение тока сети существенно снижено.

7.3 АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ И УПРАВЛЕНИЕМ ПО ОПТИМИЗАЦИОННОМУ АЛГОРИТМУ

Силовые структуры активных фильтров построены по относительно несложным схемам мостовых инверторов с широтно-импульсной модуляцией [54], питающим напряжением которых является напряжение на накопительном конденсаторе. Заряд этого конденсатора обеспечивается через цепи обратных диодов управляемых вентилях инвертора. Однако система управления силовым активным фильтром представляет собою достаточно сложное интеллектуальное устройство, реализуемое на микроконтроллерах по специальным алгоритмам. Последние осуществляют ряд промежуточных преобразований измеряемых электрических величин в системе электроснабжения. Системы управления должны отслеживать изменения токов в линии электропередачи. С помощью преобразований токов и напряжений по формулам Кларка и Парка на основе теории мгновенной мощности вычисляются необходимые параметры управления инвертором напряжения. При таком управлении по релейному принципу формируются токи инвертора, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности и симметрирование токов в линиях электропередачи.

Между тем, использование оптимизационных алгоритмов положительно зарекомендовало себя при расчетах параметров пассивных симметрирующих устройств [71; 73]. При этом оптимизация режима системы электроснабжения осуществлялась на модели с помощью алгоритмов поисковой оптимизации методом деформируемого многогранника и обеспечивала высокую точность и общность решения задачи. Поэтому

вполне обоснованной представляется попытка применить эти алгоритмы к системам электроснабжения с силовыми активными фильтрами.

Схема исследуемой системы электроснабжения в виде визуальной модели представлена на рисунке 7.15. Здесь несимметричная нагрузка питается от трехфазной системы питающих напряжений через симметричную линию электропередачи. Параметры системы приняты такими же, как в [8], что даёт возможность сравнить результаты исследования с точными значениями. Сопротивления линии электропередачи равны $j\omega 0.001$ Ом, сопротивления нагрузок по фазам А, В и С соответственно принимаются равными $0.7 + j\omega 0.005$, $1.0 + j\omega 0.01$, $2.0 + j\omega 0.04$ Ом. Амплитуды питающих напряжений приняты 100 В, а частота - 50 Гц. Система питающих напряжений симметрична, несимметрия режима обуславливается лишь нагрузкой. Предварительно рассчитан и смоделирован несимметричный режим рассматриваемой системы. Временные диаграммы токов в линиях электропередачи, являющихся одновременно и токами питающих источников напряжения, в несимметричном режиме приведены на рис.1. Исходный несимметричный режим обуславливает большую разницу амплитуд токов в линиях электропередачи, когда токи в фазах А и В в три раза превосходят токи в фазе С. Их амплитуды соответственно равны 31,494; 30,995 и 10,342 А, а значения коэффициентов мощности составляют соответственно 0,608, 0,061 и 0,337. Симметричные составляющие токов равны $I_1=22,96$ и $I_2=12,63$ А, а сдвиг величины напряжения общей точки соединения нагрузки относительно нулевой точки источников напряжения составляет величину около 40В. Все это свидетельствует о том, что система подвержена существенной несимметрии.

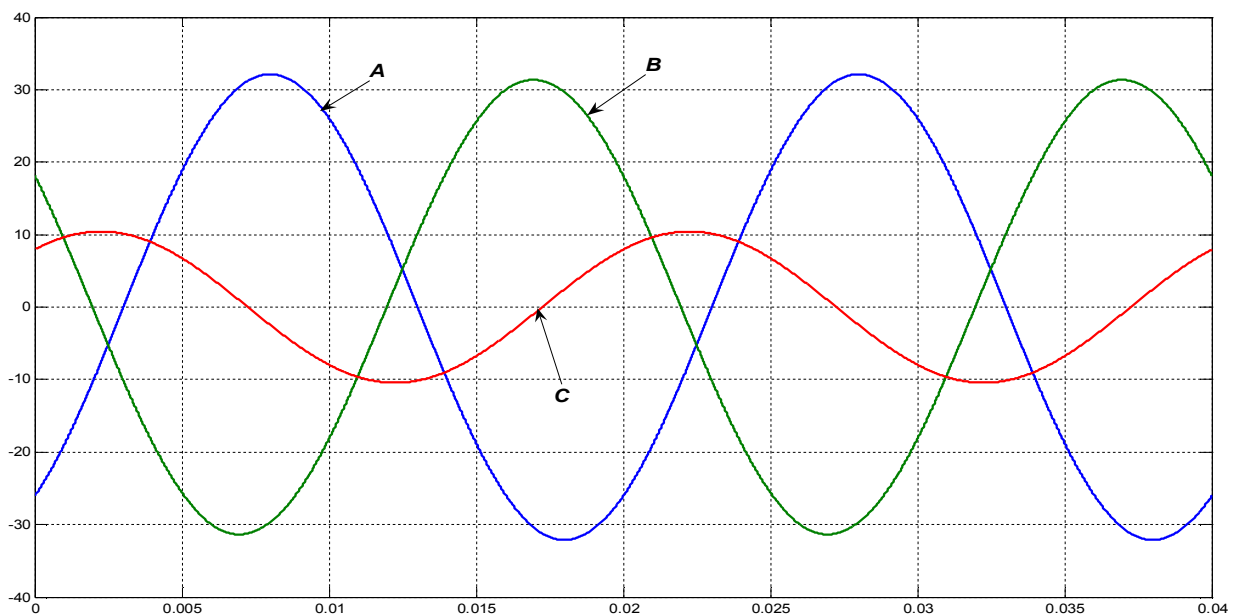


Рисунок 7.15 – Токи в линиях электропередачи системы в несимметричном режиме

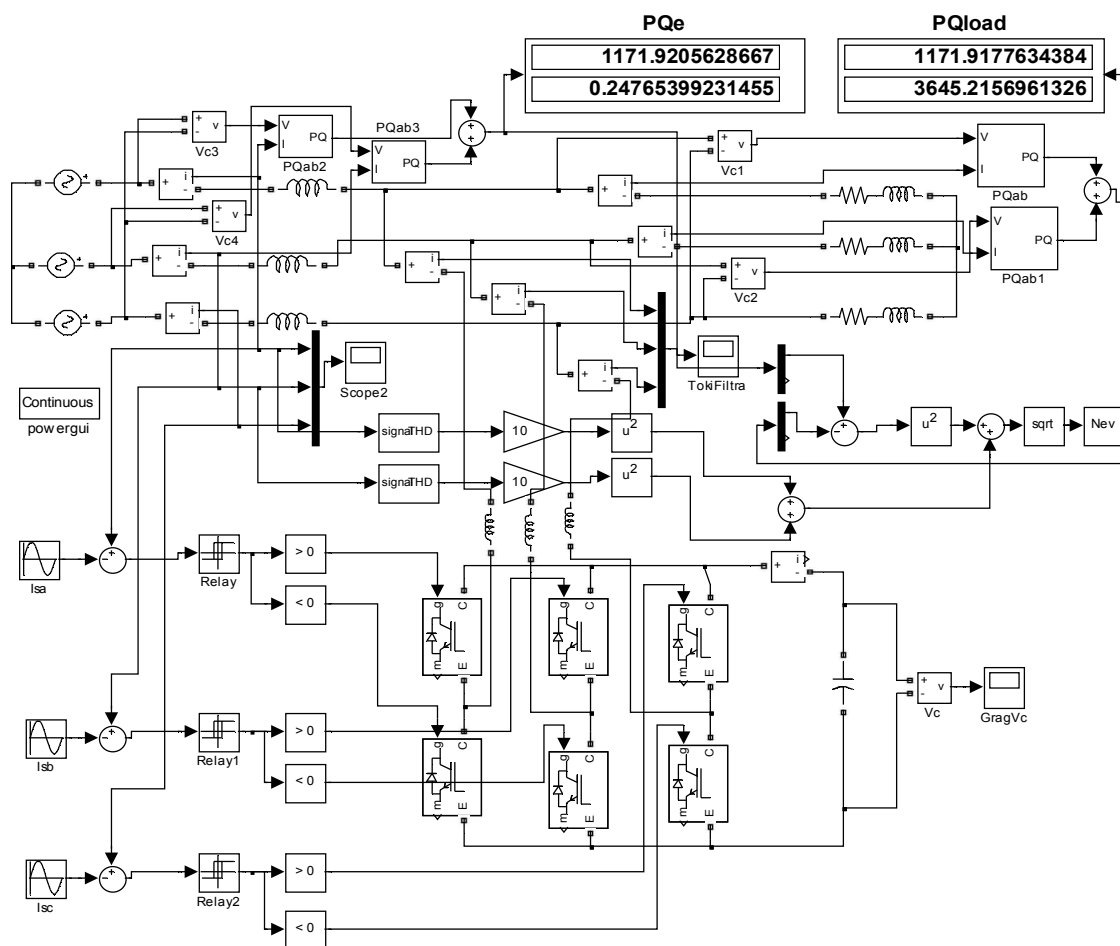


Рисунок 7.16 – SPS-модель системы электроснабжения с параллельным силовым активным фильтром

Параллельно нагрузке подключен силовой активный фильтр на IGBT транзисторах с шунтирующими обратными диодами. Ток в систему инжектируется от силового активного фильтра через дроссели. Транзисторы должны управляться таким образом, чтобы активный фильтр сформировал корректирующие токи, обеспечивающие в рассматриваемой системе минимизацию реактивной мощности, отдаваемой источниками питания. При этом должны быть скомпенсированы составляющие реактивной мощности, обусловленные как реактивностью нагрузок, так и их несимметрией. Вследствие полной компенсации реактивной мощности, токи в линиях передачи и источниках должны уравниваться по амплитудам и по фазам полностью совпасть с соответствующими питающими напряжениями. В этом режиме источники генерируют только активную мощность, которая потребляется активными составляющими сопротивлений нагрузки и линии электропередачи.

Как видно из схемы, для получения управляющих импульсов, подаваемых на силовые транзисторы, используется три идентичных канала управления. Ко входу каждого канала подается сигнал, равный току источника питания соответствующей фазы. Из этого тока вычитается сигнал,

генерируемый источником эталонного тока. Задающий ток последнего должен совпадать по фазе и частоте с задающим напряжением источника питания соответствующей фазы. В связи с этим фазы эталонных токов должны быть сдвинуты друг относительно друга на 120 эл. град., подобно тому, как сдвинуты друг относительно друга питающие напряжения силовой системы. Амплитуды токов эталонных источников должны быть одинаковыми, поэтому везде они принимаются равными некоторому параметру, который необходимо определить в процессе оптимизации.

Определяемая разность величины тока фазы питающего источника и эталонного тока фазы подается на гистерезисный элемент [67]. Он настраивается таким образом, чтобы значения его выходного сигнала составили +1 и -1, а ширина зоны гистерезиса по входному сигналу была достаточно малой, чтобы точно воспроизвести эталонный сигнал. В данном случае принимались значения (+0,1) и (-0,1) А.

Сигнал с выхода гистерезисного элемента подается на элементы сравнения с нулем, которые фактически выделяют положительную и отрицательную части сигнала, получаемого на выходе гистерезисного элемента. Первая часть подается на верхний транзистор плеча соответствующей фазы, а вторая – на нижний транзистор этого же плеча этой же фазы. Можно отметить, что предлагаемая модель системы управления широтно-импульсной модуляции является самой простой и надежной из всех известных авторам, к тому же она обеспечивается минимумом вычислительных блоков, поэтому экономична по вычислительным затратам и проста для реализации.

Предлагаемый принцип управления использует указанные особенности режима, поэтому задание выхода на режим компенсации реактивной мощности может рассматриваться как обеспечение корректирующими токами минимизации разности между активными мощностями источников и нагрузки. Для вычисления мощностей, отдаваемых питающими источниками, с помощью виртуальных приборов измеряются их токи и напряжения. Результаты этих измерений передаются на виртуальные RQ-вычислители активной и реактивной составляющих полной мощности. Суммарная реактивная мощность источников фиксируется цифровым виртуальным прибором RMist, что позволяет оценить эффективность полученного решения. Аналогичные измерения полной мощности предусмотрены и для нагрузки. Разность сумм активных мощностей источников и нагрузки образуют составляющую по мощности для целевой функции. Параметром оптимизации является амплитуда токов источников, фазы которых привязаны к фазам напряжений симметричной системы питания. Для рассматриваемого случая линейной нагрузки необходимо обеспечить также минимизацию в кривых токов источников и корректирующих токов высших гармоник, что достигается включением соответствующих показателей в целевую функцию. С этой целью токи активного фильтра подвергаются гармоническому анализу с помощью виртуального анализатора гармоник Fourier block. Для выделения каждой

гармоники анализатор должен быть настроен на ее частоту. Полученные в результате анализа амплитуды высших гармоник образуют составляющие целевой функции по гармоникам. Для уравнивания значимости этих составляющих предусмотрен усиливающий коэффициент. Его величина определенным образом может влиять на скорость сходимости к решению, поэтому предусмотрена возможность его изменения в процессе оптимизации. Комплексная целевая функция вычисляется как шаровая метрика от указанных составляющих.

Запуск процесса оптимизации может осуществляться от некоторого начального значения напряжения на накопительном конденсаторе инвертора. При нулевом значении начального напряжения на конденсаторе протекает переходный процесс. Длительность этого процесса может быть относительно большой, что замедляет процесс оптимизации. Поэтому целесообразно задавать значение начального напряжения на конденсаторе близким к установившемуся значению. Ориентировочно это значение определяется как выходное напряжение эквивалентного мостового выпрямителя, заряжающего накопительный конденсатор инвертора. Это значение также может быть включено как составляющая целевой функции, и в этом случае решение будет найдено в том числе и для установившегося значения этого напряжения.

На рисунке 7.17 изображены токи в линиях электропередачи после достижения оптимального режима. Найденное значение амплитуд этих токов составляет 7,771117 А, что приближается к точному решению - 7,8142244 А.

Суммарная реактивная мощность источников при несимметрии 3283 ВАр свелась к значению 0,248 ВАр. На рисунке 7.18 представлены графики корректирующих токов, генерируемых силовым активным фильтром. Эти токи практически совпадают и по амплитудам, и по фазам с токами симметро-компенсирующих конденсаторов, емкости которых были точно вычислены для рассматриваемого случая в [73].

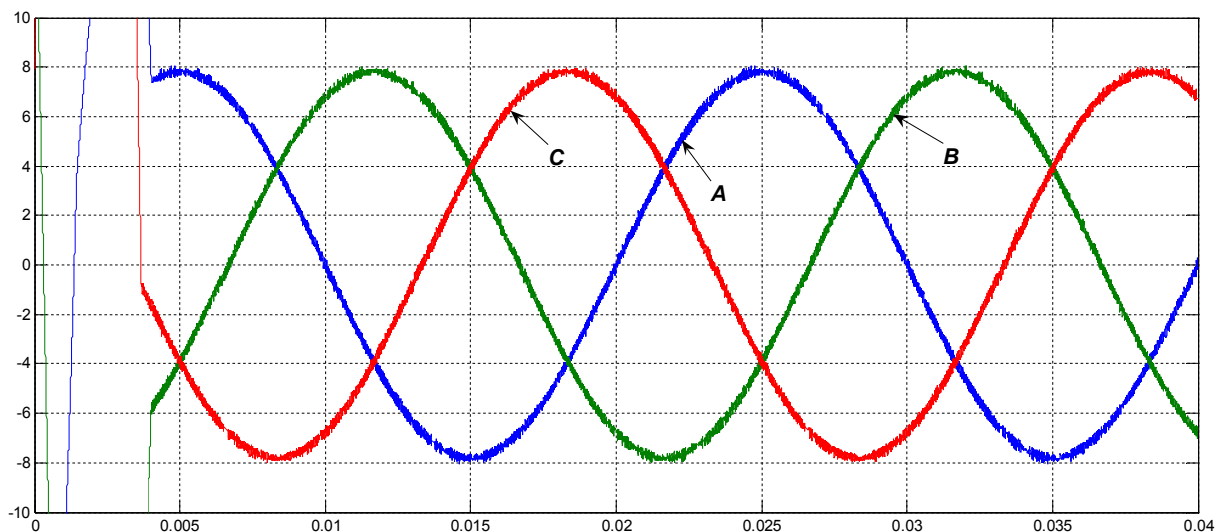


Рисунок 7.17 – Токи в линиях электропередачи после завершения оптимизации режима

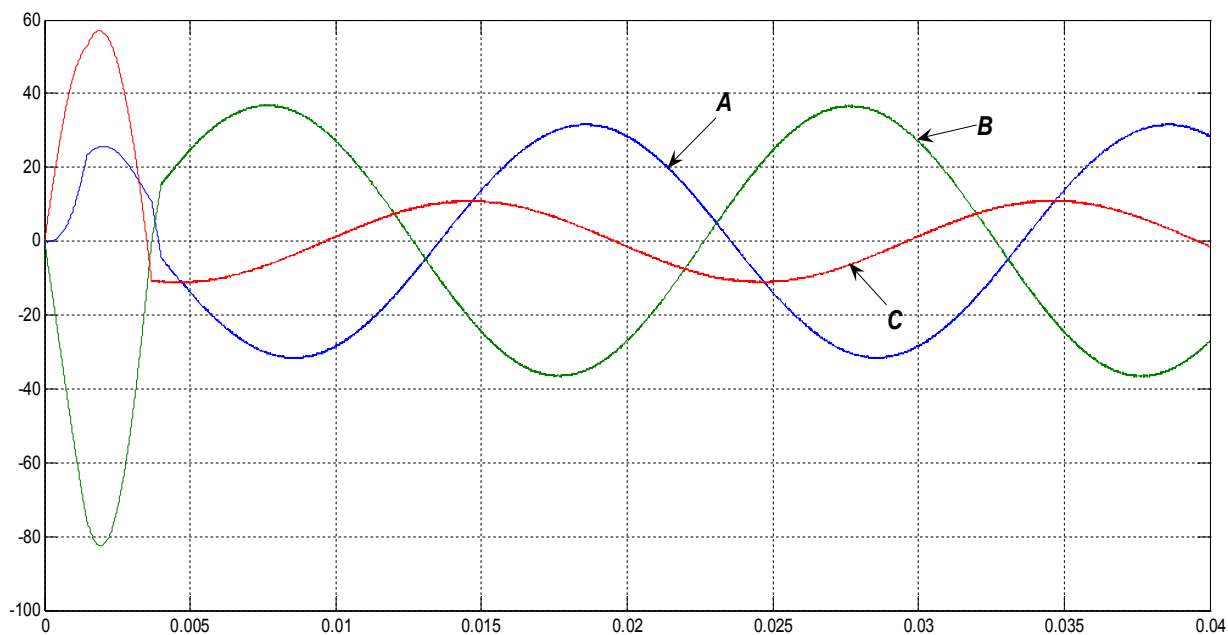


Рисунок 7.18 – Корректирующие токи, генерируемые силовым активным фильтром

На рисунке 7.19 представлена временная диаграмма напряжения на накопительном конденсаторе силового активного фильтра. Начальное значение этого напряжения принималось нулевым, поэтому в первую четверть периода, как видно из диаграммы, протекает переходный процесс заряда конденсатора через обратные диоды, шунтирующие силовые транзисторы активного фильтра.

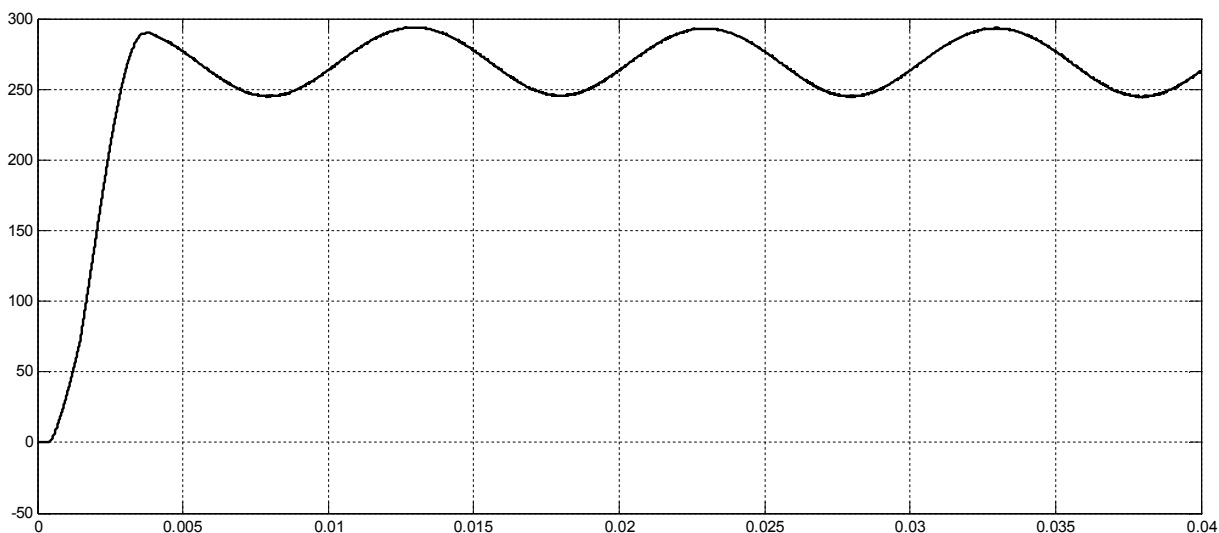


Рисунок 7.19 – Напряжение на накопительном конденсаторе силового активного фильтра

На интервале этого переходного процесса транзисторы заперты и на управляющие сигналы не реагируют. Накопительный конденсатор забирает на себя энергию, запасённую в дросселях активного фильтра, поэтому

напряжение на конденсаторе может существенно превышать амплитуду питающего напряжения питающих источников энергии.

При выходе на решение в процессе оптимизации после заряда конденсатора напряжение на конденсаторе изменяется по периодическому закону. В остальных случаях напряжение на конденсаторе или нарастает (если конденсатор получает от источников питающего напряжения избыточную энергию), или убывает (если энергия от источников недостаточна для поддержания работы активного фильтра).

Таким образом, предложенный принцип управления силовым активным фильтром на основе оптимизационного алгоритма позволяет не использовать промежуточные преобразования электрических величин в системе электроснабжения. Критерием оптимизации принимается разность активных мощностей источников и нагрузки. При этом критерий оптимизации должен учитывать также фактор высших гармоник, что обеспечивает правильную работу активного фильтра. Применение предложенного метода на модели показало его работоспособность и достаточно высокую точность.

7.4 ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ С СИЛОВЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ, УПРАВЛЯЕМЫМ ПО ОПТИМИЗАЦИОННОМУ АЛГОРИТМУ

Асинхронные двигатели являются наиболее массовыми электропотребителями, генерирующими реактивную мощность. Считается, что они потребляют до 70% всей реактивной энергии в системах электроснабжения. По этой причине актуальным является рассмотрение вопроса компенсации реактивной мощности, обусловленной работой асинхронного двигателя. Конденсаторная компенсация реактивной мощности представляет собой наиболее простой метод борьбы с нежелательными неактивными составляющими мощности. В последнее десятилетие проводятся интенсивные исследования относительно разработки и внедрения силовых активных фильтров [54]. Эти устройства реализуются на силовых полупроводниковых приборах и оснащены интеллектуальной системой управления, обеспечивающей компенсацию реактивной мощности, мощности несимметрии и паразитных высших гармонических составляющих токов и напряжений в системе электроснабжения. Алгоритмы работы систем управления достаточно сложны и основываются на измерении токов и напряжений в системе с их последующими математическими преобразованиями для получения необходимой информации, на основе которой формируются токи, инжектируемые силовым активным фильтром собственно в систему электроснабжения.

Модель системы электроснабжения асинхронного двигателя в укрупненном структурном виде представлена на рисунке 7.20. Элементы системы представлены блоками, соединенными друг с другом через внешние выводы. Блок SES представляет собой систему электроснабжения, блок SAF

– силовую часть активного фильтра, блок CONTROL system – систему управления активным фильтром.

На рисунке 7.21 представлена модель системы электроснабжения асинхронного двигателя SES. В качестве модели двигателя используется библиотечная модель SimPowerSystem типа 10HP 460 V 60 Hz 1760 RPM. В качестве входа по механическому воздействию из раскрывающегося списка выбран вариант Torque, а в качестве нагружающего момента подан постоянный момент 20 Нм. Тип ротора - Squirrel-cage, что соответствует варианту короткозамкнутого ротора. Номинальная мощность составляет 7460 ВА, линейное питающее напряжение - 460 В, частота питающей сети – 60 Гц. Активное сопротивление статорной обмотки – 0,6837 Ом, её индуктивность – 0,004162 Гн. Для ротора соответствующие величины составляют 0,451 Ом и 0,004152 Гн. Взаимная индуктивность между статором и ротором задана величиной 0,1486 Гн. Момент инерции двигателя составляет 0,05 кгм, коэффициент вязкого трения – 0,008141 Нмс, число пар полюсов $p=2$. Асинхронный двигатель зашунтирован резистивной звездой с большими значениями сопротивлений резисторов (10^5 Ом) для того, чтобы произвести развязывание некорректных топологических ситуаций. Они обусловлены наличием индуктивных сечений, образуемых катушками индуктивностей линий электропередачи, силового активного фильтра и статорными индуктивностями асинхронного двигателя. Подмодель подачи внешнего механического момента позволяет производить его наброс на 20 Нм в момент 0,7 с при помощи единичной ступеньки и блока умножения, а также подсоединять начальный момент 10 Нм при пуске двигателя.

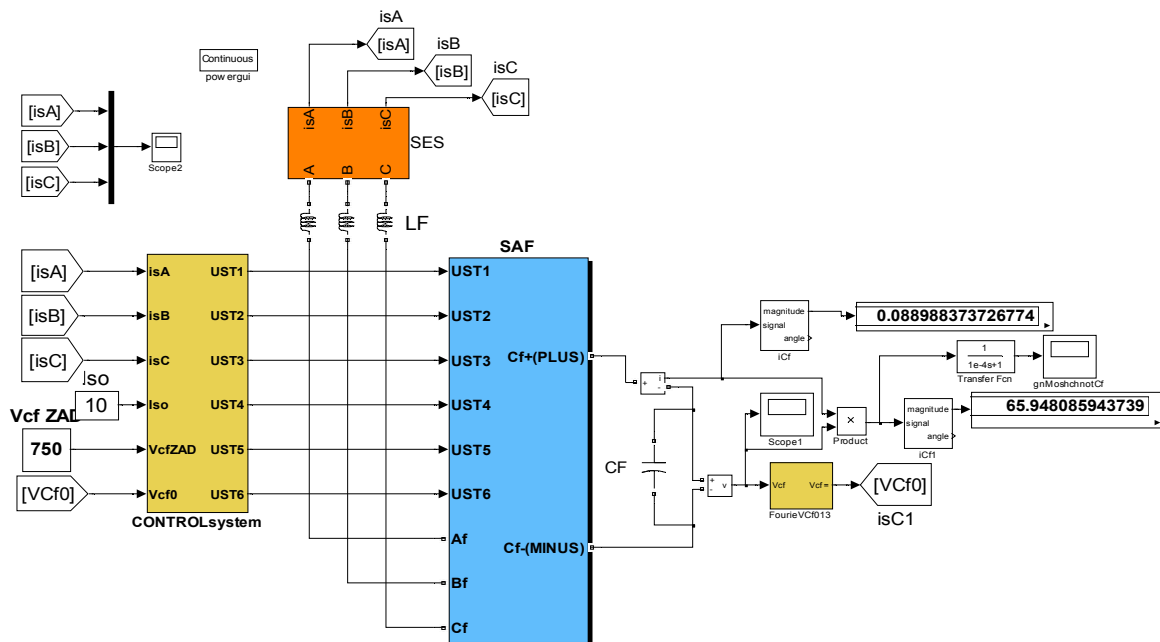


Рисунок 7.20 – Структурная схема исследуемой системы электроснабжения асинхронного двигателя с силовым активным фильтром

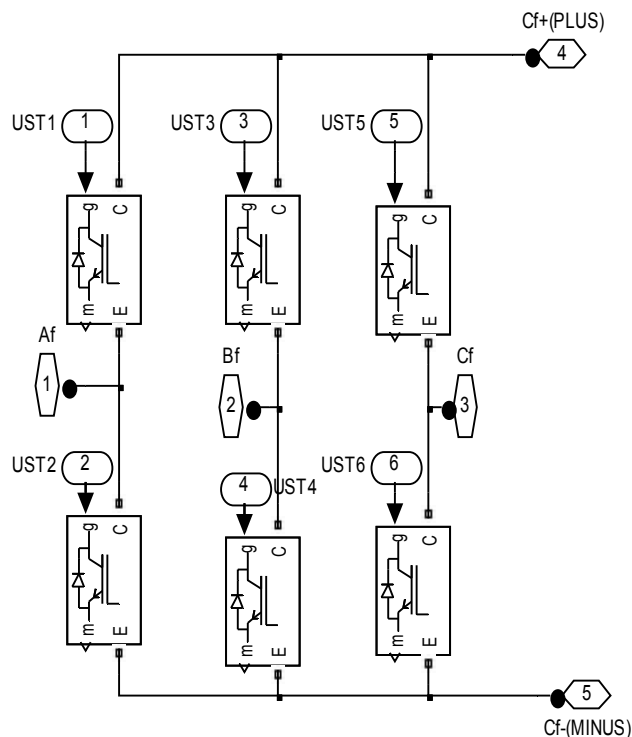


Рисунок 7.22 – Силовая схема активного фильтра

Модель системы управления силовым активным фильтром (рис. 7.23) содержит три канала управления – по одному на каждое плечо инвертора.

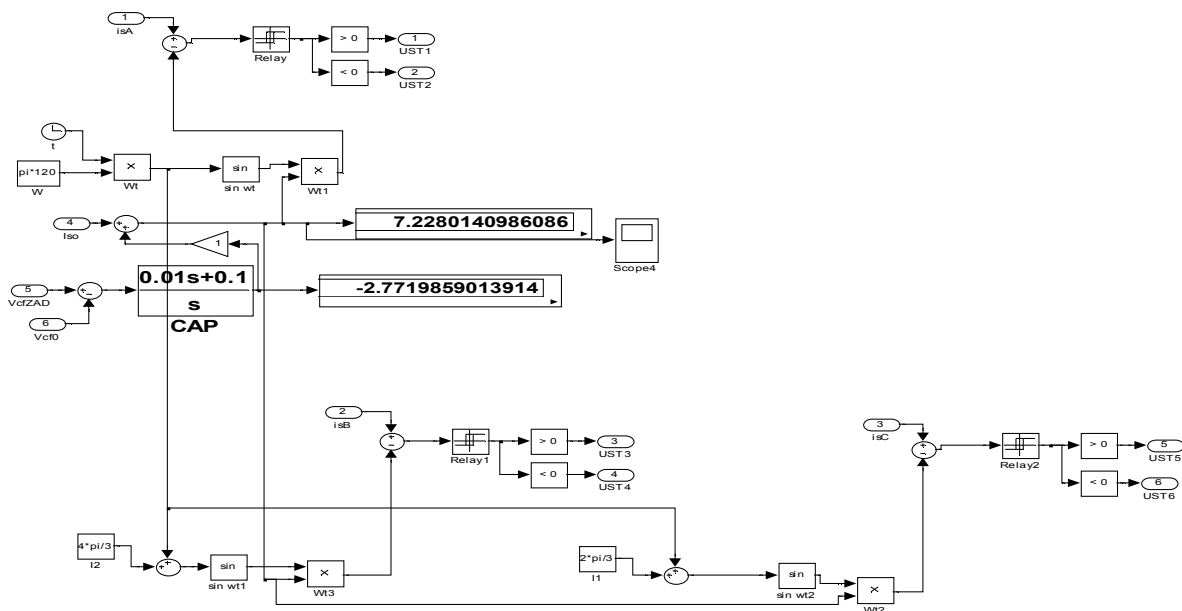


Рисунок 7.23 – Модель системы управления силовым активным фильтром

Широтно-импульсная модуляция обеспечивается релейными элементами с достаточно малой величиной гистерезисной зоны (0,25 А). Для каждого канала отслеживаются токи фаз источников электрической энергии, которые сравниваются с задающими токами, причем каждый из задающих

токов совпадает по фазе с напряжением соответствующего источника напряжения, отображающего источник питания в этой фазе. Поскольку амплитуды всех фазных токов должны быть равными, задачей оптимизации является определение оптимального значения этой амплитуды. Ранее используемый алгоритм построения процесса оптимизации с использованием вычисления значения целевой функции путем прогона модели системы электроснабжения в данном случае не рационален, хотя и принципиально возможен. Для достижения установившегося режима в данной системе требуется рассчитать большое количество периодов питающего напряжения. С одной стороны, модели нужно пройти интервал времени, необходимый для установления механического режима. Это связано с инерционными механизмами, и время затухания механических процессов на один-два порядка превышает время установления электромагнитных процессов. С другой стороны, наличие полупроводниковых приборов, управляемых релейно-гистерезисной системой управления, принуждает модель двигаться в процессе моделирования достаточно медленно из-за необходимости отрабатывать переключения полупроводниковых приборов в пределах узкой зоны гистерезиса. С учетом этих обстоятельств в систему управления добавлены элементы автоматического управления, которые, в сущности, и берут на себя функцию оптимизации режима. Ключевым свойством является то обстоятельство, что при минимизации разностей активных мощностей, потребляемых системой и отдаваемых источниками, напряжение на накопительном конденсаторе стабилизируется на постоянном уровне. При отклонении от оптимального режима напряжение конденсатора будет или нарастать (накачка конденсатора при завышенной мощности, отбираемой от источников), или убывать (истощение заряда конденсатора при недостатке мощности, отбираемой от источников). В данной системе управления напряжение задания (750 В) сравнивается с постоянной составляющей напряжения на конденсаторе, определяемой в процессе движения модели с помощью виртуального прибора разложения в ряд Фурье напряжения на конденсаторе. Разность подается на пропорционально-интегральный регулятор, получаемый сигнал управления добавляется к амплитудам всех задающих токов силового фильтра.

Результаты моделирования системы с фильтром подтверждают ее работоспособность. На рисунке 7.24 представлены диаграммы выходных величин модели асинхронно двигателя. До момента времени 0,2 с протекает характерный процесс прямого пуска асинхронного двигателя на холостом ходу.

При установлении холостого хода развиваемый электромагнитный момент преодолевает момент вязкого трения (около 1,5 Нм). При набросе момента в запрограммированный момент времени 0,7 с переходный процесс приводит к увеличению электромагнитного момента двигателя до 21,5 Нм. При этом скорость вращения несколько снижается, а фазные токи увеличиваются. При этом двигатель работает с недогрузом и потребляет

существенную реактивную мощность, соизмеримую с активной мощностью, идущей на выполнение полезной работы.

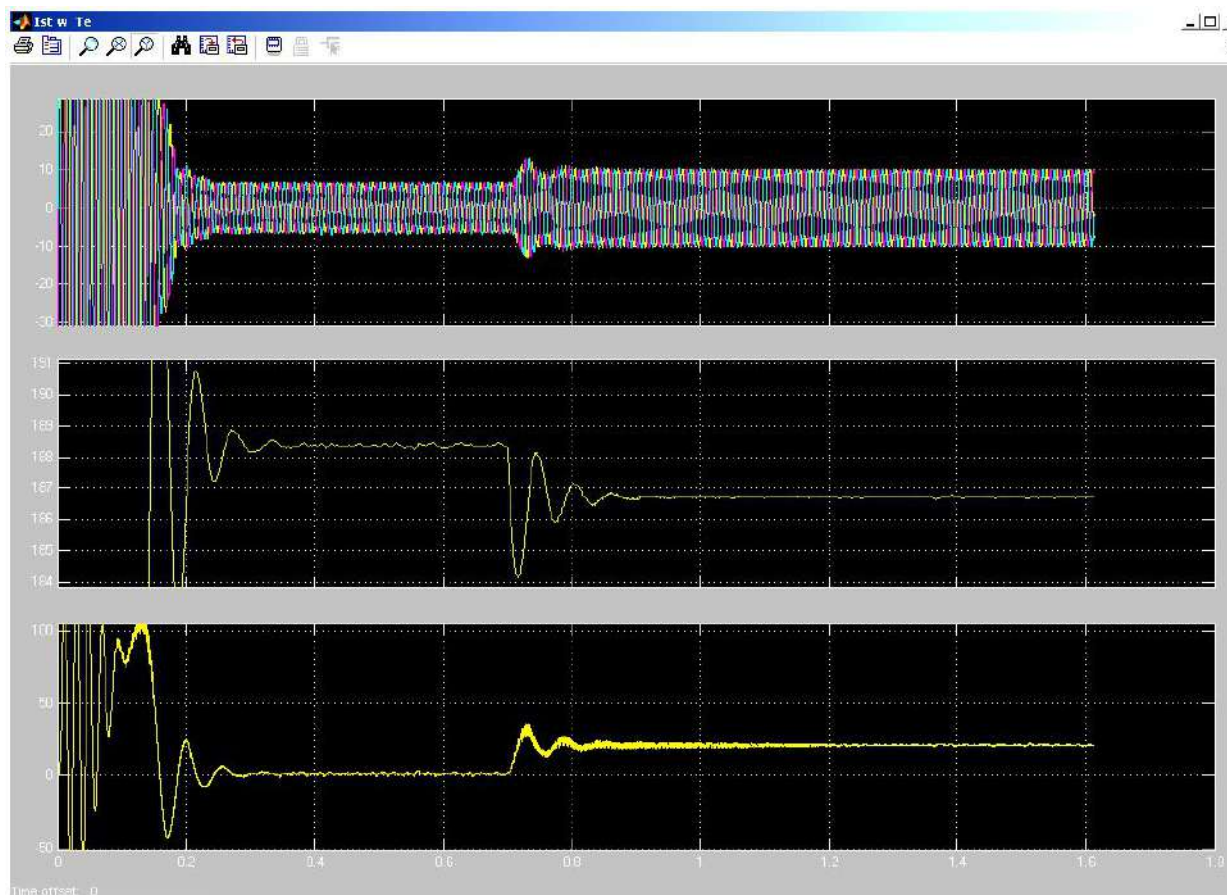


Рисунок 7.24 – Временные диаграммы токов статора, скорости вращения и электромагнитного момента асинхронного двигателя

Амплитуды токов в статорных обмотках двигателя немного превышают 10 А. В то же время благодаря компенсирующему действию активного фильтра, амплитуды фазных токов в источниках и линиях электропередачи составляют 7,23 А (это видно на временных диаграммах, и по показаниям приборов в системе управления), что существенно меньше по сравнению с токами в статорных обмотках асинхронного двигателя. Ток уставки принимался равным 10 А по амплитуде, во всех случаях постоянная составляющая напряжения на накопительном конденсаторе в установившемся режиме при любой механической нагрузке очень близка к напряжению задания 750 В. Это свидетельствует о правильной работе оптимизирующего узла системы управления силовым активным фильтром.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск : ИПК «Изд-во стандартов», 1998. – 31 с.
2. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2013. – 13 с.
3. ГОСТ Р 32145-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2013. – 27 с.
4. European Standard EN 50160, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", European Committee for Electrotechnical Standardization, November 1994. – 11 с.
5. Arrillaga J, Watson N. R., Chen S., (2000) Power system quality assessment. - John Wiley. – 461 p.
6. Steinmetz C. P. Theory and calculation of electric circuits. – New York, 1917. – 361 p.
7. Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems. Przegląd Elektrot., no 7, 1931, p.p. 193-203 (In Polish).
8. Miller J. E. Reactive power control in electric systems / J. E. Miller. – John Willey & sons. – 1982. – 416 p.
9. Kundur. P. Power System Stability and Control / P. Kundur // EPRI, 1993. – 1175 p.
10. Hector J. Altuve Ferrer. Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems / Hector J., Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer III. 2010. – 359 p.
11. Мадьяр Леон. Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) / Леон Мадьяр. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 376 с.
12. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский. – М. : Энергия, 1975. – 320 с.

13. Милях А. Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов – Киев : Наукова думка, 1973. – 219 с.
14. Шидловский А. К. Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок / А. К. Шидловский, Б. П. Борисов. – Киев : Наукова думка, 1977. – 160 с.
15. Шидловский А. К. Анализ и синтез фазопреобразовательных цепей / А. К. Шидловский, И. В. Мостовяк, В. Г. Кузнецов. – Киев : Наукова думка, 1979. – 299 с.
16. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев : Наукова думка, 1985. – 324 с.
17. Шидловский А. К. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях / А. К. Шидловский, В. А. Новский, Н. Н. Каплычный. – Киев : Наукова думка, 1989. – 312 с.
18. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – Киев : Наукова думка, 1992. – 240 с.
19. Гриб О. Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения / О. Г. Гриб. – Харьков: ХНАГХ, 2004. – 180 с.
20. Сиротин Ю. А. Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей / Сиротин Ю. А. // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2013. – № 6. – С. 57 – 65.
21. Домнин И. Ф. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов // Технічна електродинаміка. Темат. вип., ч. I, 2004. С. 80-91.
22. Кизилев В. У. К вопросу о физическом смысле "реактивного тока" и "реактивной мощности" / В. У. Кизилев // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тем. Выпуск "Энергетика и преобразовательная техника". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002, №9, т. 3. – С. 44-50.
23. Крогерис А. Ф. Мощность переменного тока / А. Ф. Крогерис, К. К. Ракшевиц, Э. П. Трейманис и др. – Рига : Физ. энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.
24. Тонкаль В. Е. Баланс энергий в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др. – Киев : Наукова думка, 1992. – 312 с.

25. Dugan Roger C. Electrical Power Systems Quality, Third Edition / Roger C. Dugan McGraw-HillCompanies, Inc. – 2012. – 555p.
26. Benysek G., Pasko M., Power Theories for Improved Power quality. – Springer-Verlag London. – 2012. – 213 p.
27. Strzelecki R., Benysek G., Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks. – Springer - Verlag London Limited. – 2008. – 414 p.
28. Czarnecki L. S. Power theories of periodic nonsinusoidal systems / L. S. Czarnecki // Rozprawy Electrotechniczne. – 1985. – 31, N 3, 4. – S. 659-685.
29. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. / H. Akagi , E. H. Watanabe , M. Aredes – IEEE Press, 2007. – 379 p.
30. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
31. Маркушевич Н. С. Качество напряжения в городских электрических сетях / Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина. – М. : Энергия, 1975. – 256 с.
32. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. – М. : Энергия, 1977. – 128 с.
33. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
34. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
35. Константинов Б. А. Компенсация реактивной мощности / Б. А. Константинов, Г. З. Зайцев. – Л. : Энергия, 1976. – 104 с.
36. Веников В. А. Электрические сети / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др. – М. : Высшая школа, 1971. – 438 с.
37. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / под ред. Р. М. Матура. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.
38. Кочкин В. И., Нечаев О. П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий / В. И. Кочкин, О. П. Нечаев. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 248 с.

39. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
40. Закарюкин В. П. Анализ схем симметрирования на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Е. С. Иванова // Електрифікація транспорту. – 2013. – № 6. – С. 26–33.
41. Бардушко В. Д. Параметрический синтез систем параллельных емкостных компенсирующих устройств в тяговой сети в современных условиях / В. Д. Бардушко. – Електрифікація транспорту, 2013. – № 6. – С. 8–13.
42. Nelder, J. A. A Simplex Method for Function Minimization / J. A. Nelder, R. Mead // Computer J., 1965. – Vol. 7, Issue 4. – P. 308–313.
43. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутациях электрических цепей / Г. В. Буткевич. – М. : Высшая школа, 1967. – 195 с
44. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 215 с.
45. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы / Д. Уэймаус. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
46. Финкельнбург В. Электрическая дуга и термическая плазма / Финкельнбург В., Меккер Г. – М. : Иностранная литература, 1961. – 436 с.
47. ГОСТ 28249-93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М. : Издательство стандартов, 1994. – 63 с.
48. Acha E. A Harmonic domain Computational Package for Nonlinear problems and Its Application to Electric Arcs / E. Acha, A. Semlyen, N. Rajakovic // IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, July. 1990. – P. 1390-1397.
49. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Айзенберга. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 648 с.
50. Краснопольский А. Е. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп / А. Е. Краснопольский, В. Б. Соколов, А. М. Троицкий. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 207 с.
51. Грановский В. Л. Электрический ток в газе / В. Л. Грановский. – М. : Гостехиздат, 1952. – 472 с.
52. Краснопольский А. Е. О дифференциальном уравнении газоразрядной лампы // Светотехника, 1977, № 12. – С. 13-15.

53. Харченко В. Ф., Якунин А. А. Модифицированная модель нестационарных режимов разрядной лампы высокого давления с индуктивным балластом // В. Ф. Харченко, А. А. Якунин. – Світлотехніка та електроенергетика, 2012, № 2(30). – С.4-12.
54. Akagi. H. Modern active filters and traditional passive filters / H. Akagi. // Bulletin of the Polish Academy of sciences, Technical sciences, 2006. – V. 54. – P. 255 – 269.
55. Agrawal A. Comparison of Various Configurations of Hybrid Active Filter With Three Different Control Strategies / A. Agrawal // International Journal of Engineering Research & Technology. - 2014. – V. 3. – Issue 5. – P. 1672 –1678.
56. Rajashekar1 B. Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with a New Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes Under Non-Equal Dc Link Voltages with Power Quality Enhancement. [Text] / B. Rajashekar1, T. Praveen Kumar, R. Ramesh. // IJIRSET Vol. 3, Issue 9, September 2014. – P. 15857 – 15863.
57. Rashid Muhammad H. Power Electronics Handbook / Muhammad H. Rashid. – London : Academic Press , 2001. – 895 p.
58. Дэннис Дж. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений / Дж. Дэннис, Р. Шнабель. – М. : Мир, 1988. – 440 с.
59. Батищев Д. И. Поисковые методы оптимального проектирования / Д. И. Батищев. – М. : Сов. Радио, 1975. – 216 с.
60. Наумов И. В. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения. Иркутск : Изд - во «На Чехова», 2001. – 217 с.
61. Пентегов И. В., Связь между параметрами электромагнитных, принципиальных схем и схем замещения двухобмоточных трансформаторов / И. В. Пентегов, С. В. Рымар, И. В. Волков // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2006, №3. – С. 67-79.
62. Хайнеманн Р. Визуальное моделирование электронных схем в PSPICE / Р. Хайнеманн. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 336 с.
63. Гаврилов Л. П. Нелинейные цепи в программах схемотехнического моделирования / Л. П. Гаврилов. – М. : СОЛОН-Р, 2002. – 368 с.
64. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2004. – 607 с.
65. Герман-Галкин С. Г. Электрические машины / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов// С-Пб. : КОРОНА пресс, 2003. – 256 с.

66. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
67. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.
68. Гурский Д. А. Вычисления в MathCAD / Д. А. Гурский. – Минск, 2003. – 814 с.
69. Орвис В. Дж. Excel для ученых, инженеров и студентов / В. Дж. Орвис. – Киев: Юниор, 1999. – 528 с.
70. Ягуп В. Г. Автоматизированный расчет тиристорных схем: монография / В. Г. Ягуп. – Харьков: Вища школа, 1986. – 160 с.
71. Ягуп В. Г. Компьютерное моделирование переходных и установившихся процессов в преобразователях электрической энергии: монография / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп. – Харьков: ХНАГХ, 2013. – 131 с.
72. Долбня В. Т. Топологический анализ и синтез электрических и электромеханических систем : Монография / В. Т. Долбня. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2005. – 356 с.
73. Ягуп В. Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации // В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. Донецьк: ДНТУ, 2011, вип. 11(186). – С.449-454.
74. Ягуп В. Г. К аналитическому определению емкостей симметрирующих конденсаторов / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. Донецьк: ДНТУ – 2013, №2 (15). – С. 293-296.
75. Ягуп В. Г. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 2016. – №1. – С. 60-66.

Наукове видання

**ЯГУП Валерій Григорович,
ЯГУП Катерина Валеріївна**

***ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МЕТОДІВ
ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ПОКРАЩАННЯ ПОКАЗНИКІВ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ***

МОНОГРАФІЯ

(Рос. мовою)

Відповідальний за випуск *Д. М. Калюжний*
Редактор *О. А. Норик*
Комп'ютерне верстання *Є. Г. Панова*
Дизайн обкладинки *Г. А. Коровкіна*

Підп. до друку 29.08.2016 р.
Друк на ризографі
Зам. №

Формат 60x84 1/16
Ум.-друк. арк. 7,7
Тираж 500 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rektorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК №4705 від 28.03.2014 р.