

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Направление	27.03.04 «Управление в технических системах»
Профиль	Системы и технические средства автоматизации и управления
Факультет	ФЭА
Кафедра	САУ

К защите допустить

Зав. кафедрой

Шелудько В.Н.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

**Тема: УПРАВЛЕНИЕ ИНВЕРТОРНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ В
СИСТЕМЕ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Студент		_____	Мигранов Р.М.
		<i>подпись</i>	
Руководитель	к.т.н. (Уч. степень, уч. звание)	_____	Доброскок Н.А.
		<i>подпись</i>	
Консультанты	к.т.н., доцент (Уч. степень, уч. звание)	_____	Иванов А.Н.
		<i>подпись</i>	
	(Уч. степень, уч. звание)	_____	Кузьмина Т.О.
		<i>подпись</i>	

Санкт-Петербург

2021

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Утверждаю

Зав. кафедрой САУ

_____ Шелудько В.Н.

«16» марта 2021 г.

Студент: Мигранов Р. М.

Группа 7492

Тема работы: Управление инверторной генерацией энергии в системе малой распределенной энергетики

Место выполнения ВКР: СПбГЭТУ каф. САУ

Исходные данные: система малой распределенной энергетики, состоящая из параллельно работающих синхронного генератора с номинальными параметрами в 85кВА полной мощностью, 400В действительного значения линейного выходного напряжения и трёхфазного мостового автономного инвертора напряжения с постоянным источником питания в 800В на общую активно-индуктивную нагрузку потребляющая 40 кВт и 30 кВАР активной и реактивной мощностей, с применением алгоритма синхронизации, обеспечивающего время синхронизации не более 5 с, при отсутствии перерегулирования в переходных процессах активной и реактивной мощностей после синхронизации.

Содержание ВКР: введение, глава 1 - генерирующие установки малой распределённой энергетики как объекты управления, глава 2 - системы синхронизации синхронного генератора и трехфазного мостового автономного инвертора напряжения, глава 3 - исследование системы синхронизации и распределения нагрузок посредством математического моделирования, заключение, список используемой литературы, приложение А.

Перечень отчетных материалов: пояснительная записка, иллюстративный материал.

Дополнительные разделы: Безопасность жизнедеятельности

Дата выдачи задания

Дата представления ВКР к защите

« ___ » _____ 20__ г.

«7» июня 2021 г.

Студент

Мигранов Р.М

Руководитель К.Т.Н.

Доброскок Н.А.

(Уч. степень, уч. звание)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Утверждаю

Зав. кафедрой САУ

_____ Шелудько В.Н.

«16» марта 2021 г.

Студент Мигранов Р. М.

Группа 7492

Тема работы: Управление инверторной генерацией энергии в системе малой распределенной энергетики

№ п/п	Наименование работ	Срок выполнения
1	Исследование генерирующих установок малой распределенной энергетики как объектов управления	09.01 – 08.02
2	Разработка алгоритмов синхронизации синхронного генератора и трехфазного мостового автономного инвертора напряжения	01.02 – 30.03
3	Исследование системы синхронизации и распределения нагрузок посредством математического моделирования в программе <i>Matlab&Simulink</i>	01.03 – 30.04
4	Безопасность жизнедеятельности	01.04 – 30.04
5	Оформление пояснительной записки	01.04 – 20.05
6	Оформление иллюстративного материала	01.04 – 01.06

Студент

_____ Мигранов Р.М.

Руководитель

К.Т.Н.
(Уч. степень, уч. звание)

_____ Доброскок Н.А.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 79 с., 45 рис., 1 табл., 46 источников, 1 прил.

СИНХРОНИЗАЦИЯ, СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, ТРЕХФАЗНЫЙ МОСТОВОЙ АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ, ВИРТУАЛЬНЫЙ СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ.

Объектом исследования является система малой распределенной энергетики, состоящая из параллельно работающих синхронного генератора и трехфазного мостового автономного инвертора напряжений.

Цель работы - разработка системы регулирования амплитудой и фазой выходного напряжения инвертора для его последующей синхронизации и распределения мощности с синхронным генератором на общую активно-индуктивную нагрузку.

Предметом работы являются алгоритмы синхронизации синхронного генератора и трехфазного мостового автономного инвертора напряжений

В процессе работы проводились экспериментальные исследования в программе *Matlab&Simulink* процесса синхронизации и распределения нагрузки на основе базового и модифицированного базового метода синхронизации, имитирующего инерционные свойства синхронного генератора.

Результаты показали преимущества модифицированного базового метода и процесса распределения мощности при обоих методах.

SUMMARY

In this work, the basic method of synchronization and power distribution of a synchronous generator and a three-phase bridge autonomous voltage inverter operating in parallel to a common active-inductive load is studied, and a comparative analysis of the modifications of this algorithm and their effect on the value of equalizing currents and speed is carried out. synchronization. The algorithm under study is based on the inverter's imitation of the inertial properties of a synchronous generator, which will make it possible to use the well-known methods of synchronizing two generators. As a result, the regulators of the amplitude of the output voltage and the phase of the autonomous inverter were tuned, ensuring the absence of overshoot in the transient processes of active and reactive power after synchronization and a fast synchronization speed of no more than 5 s.

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	7
1 Генерирующие установки малой распределённой энергетики как объекты управления	11
1.1 Системы с параллельной работой источников электрической энергии.....	11
1.2 Математическое описание синхронной машины при работе в генераторном режиме	15
1.3 Описание и строение трехфазного мостового автономного инвертора напряжения с широтно-импульсно модулированным регулированием	21
2 Системы синхронизации синхронного генератора и трехфазного мостового автономного инвертора напряжения.....	30
2.1 Методы синхронизации двух синхронных генераторов и распределение нагрузки между ними.....	30
2.2 Методы синхронизации и распределения мощности между синхронным генератором и трехфазным мостовым автономным инвертором напряжения..	37
2.3 Настройка регуляторов системы синхронизации и распределения нагрузок	43
3 Исследование системы синхронизации и распределения нагрузок посредством математического моделирования.....	47
3.1 Расчёт и моделирование сглаживающего фильтра.....	47
3.2 Моделирование синхронного генератора и трехфазного мостового автономного инвертора напряжения и подсистем измерений и регулирования	52
3.3 Сравнительный анализ базового метода и его модификаций	59
4 Безопасность жизнедеятельности.....	62
Заключение	67
Список использованной литературы.....	69
ПРИЛОЖЕНИЕ А	74

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АИН – автономный инвертор напряжения.

АИЭ – альтернативный источник энергии.

БТИЗ - биполярный транзисторы с изолированным затвором.

ВИЭ – возобновляемый источник энергии.

ВД – векторная диаграмма.

ВКР – выпускная квалификационная работа.

ВСГ – виртуальный синхронный генератора.

КНН - коэффициент несинусоидальности по напряжению.

МРЭ – малая распределённая энергетика.

ПО – программное обеспечение.

РФ – Российская Федерация.

СГ – синхронный генератор.

СМ – синхронная машина.

СФ – синусоидальный фильтр.

ТМАИН – трёхфазный мостовой автономный инвертор напряжения.

ЦСЭ - централизованная система энергоснабжения.

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым днём человечество становится все больше зависимыми от электроэнергии. Современные тенденции ведут к полному замещению генераторов, использующих природные ископаемые, на альтернативные (АИЭ) или возобновляемые источники энергии (ВИЭ). В качестве АИЭ могут служить парогазовые установки, атомные электростанции, биоэнергетические установки, мусороперерабатывающие энергокомплексы и т.д. ВИЭ в основном представляют из себя солнечные, ветровые и гидроэлектростанции [1].

На территории Российской Федерации (РФ) преимущественно развита централизованная система энергоснабжения (ЦСЭ), которая покрывает 2/3 территории страны [2]. ЦСЭ состоит из крупного объекта генерации электроэнергии, к примеру, тепловая, атомная или дизельная электростанции и множества подстанций распределения энергии.

Для генерации электрической энергии наиболее широко применяются синхронные машины (СМ) представляющие из себя синхронные генераторы (СГ) приводимый во вращение двигателем внутреннего сгорания, например, дизельным двигателем. Внедрение в систему энергоснабжения дополнительного генератора энергии вызывает трудности и приводит к увеличению стоимости электричества, также вызывает проблемы расширение ЦСЭ в труднодоступные регионы страны, где работа электростанций базируется на привозном топливе, что значительно увеличивает на него цену [2]. От этих недостатков избавлена малая распределённая энергетика (МРЭ), в сторону которой все чаще делают выбор промышленные предприятия и жители отдалённых регионов. Под термином МРЭ в основном подразумевают генерацию электроэнергии установками менее 25 МВт вблизи потребления [3; 4]. Кроме питания промышленных установок, МРЭ нашла широкое применение в судовых, передвижных электроустановках, в

управляемых электромеханических системах, такие как, малые гидроэлектростанции, транспортные и ветроэнергетические установки, и в системах бесперебойного питания [4, 5].

Для интеграции в МРЭ ветреных турбин, солнечных или аккумуляторных батарей необходимо использовать преобразовательные устройства из постоянного тока в переменный. Наиболее широко применяются трёхфазные мостовые автономные инверторы напряжения (ТМАИН) отличающиеся своей долговечностью, простотой управления и конструкцией, а использование управляемых ключей позволяет повысить качество преобразуемых параметров посредством применения широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) выходных напряжений или токов инвертора. [6]

Для совместной работы СМ с ТМАИН следует провести их синхронизацию, чтобы не возникли толчки тока, электромагнитного момента и напряжения в момент переключения между устройствами. В идеальном случае синхронизация достигается при одинаковом значении амплитуды, фазы, порядка чередования фаз и частоты выходных напряжений СМ и ТМАИН. Сложность синхронизации заключается в поддержании равенства параметров выходных напряжений если этого не достигается, то возникшее неверное распределение нагрузки может привести к выходу из строя системы в целом.

Целью выпускной квалификационной работы (ВКР) является рассмотрение алгоритма предварительной синхронизации ТМАИН с СМ и обеспечения условий дальнейшей параллельной работы.

Задачи ВКР:

1. Составление математического описания СМ, работающей в генераторном режиме, и ТМАИН.
2. Исследование принципов и методов синхронизации СМ и ТМАИН, и распределения между ними нагрузки при параллельной работе.
3. Осуществить моделирование алгоритма синхронизации СМ и ТМАИН в программе *Matlab&Simulink*.

1 ГЕНЕРИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ КАК ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ

1.1 Системы с параллельной работой источников электрической энергии.

В МРЭ преимущественно используются гибридные системы, что позволяет применять данную концепцию в электроэнергетических системах судов, в системах резервного питания промышленных и социальных объектов, в автономных электроэнергетических системах удалённых объектов и много другое [7]. Гибридные системы могут включать в себя различное сочетание генерирующих установок. Широко распространены ветрено-дизельные и солнечно-дизельные электроустановки с накопителями энергии или без них. В качестве пары к СМ могут быть использованы различные виды ВИЭ и АИЭ, аккумуляторные батареи или ещё один СГ для увеличения мощности или в качестве резервного источника электрической энергии.

Подключение источников энергии к шине постоянного тока позволяет довольно просто согласовать между собой режимы их работы, такая система легко масштабируема, не возникают трудности при электромагнитной совместимости устройств, а общий автономный инвертор позволяет получить на выходе высокое качество электрической энергии.

На рисунке 1.1 представлена структурная схема соединения СГ параллельно к ветровому генератору и солнечной панели к общей шине постоянного тока, где Д – двигатель, 1 – ветрогенератор, 2 – фотоэлектрическая установка, 3 – дизельный СГ, 4 – шина постоянного тока, 5 – шина переменного тока, 6 – аккумуляторная батарея, 7 – управляемый выпрямитель, 8 – конвертор напряжения, 9 – инвертор напряжения, 10 – двунаправленный импульсный преобразователь.

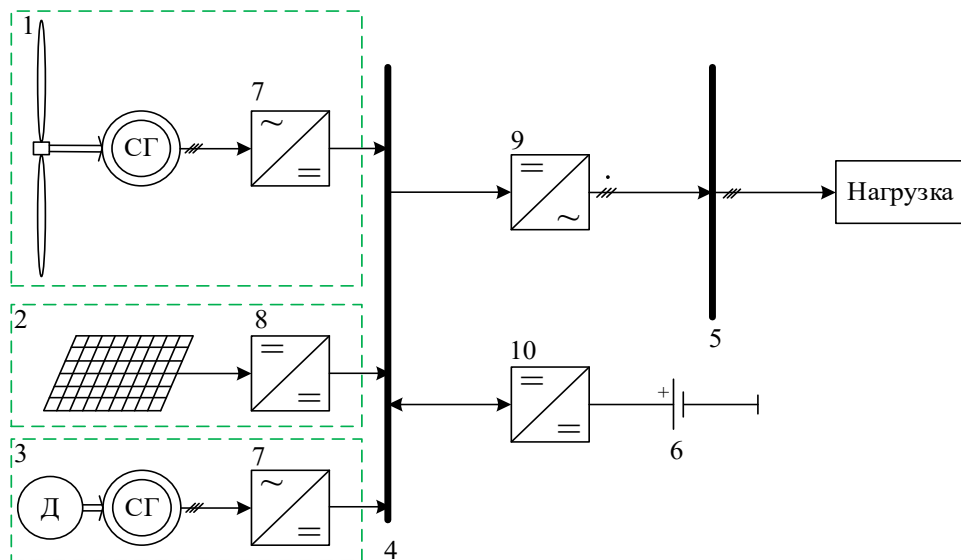


Рисунок 1.1 – Схема параллельного подключением генерирующих установок к шине постоянного тока

Кроме того, имеется возможность добавления СГ непосредственно к шине переменного тока, что позволит увеличить вырабатываемую мощность и увеличить КПД, избежав лишнего преобразования энергии и называется смешанным соединением генерирующих установок к шине постоянного тока [8]. Смешанное соединение показано на рисунке 1.2, где обозначения соответствуют введённым на рисунке 1.1.

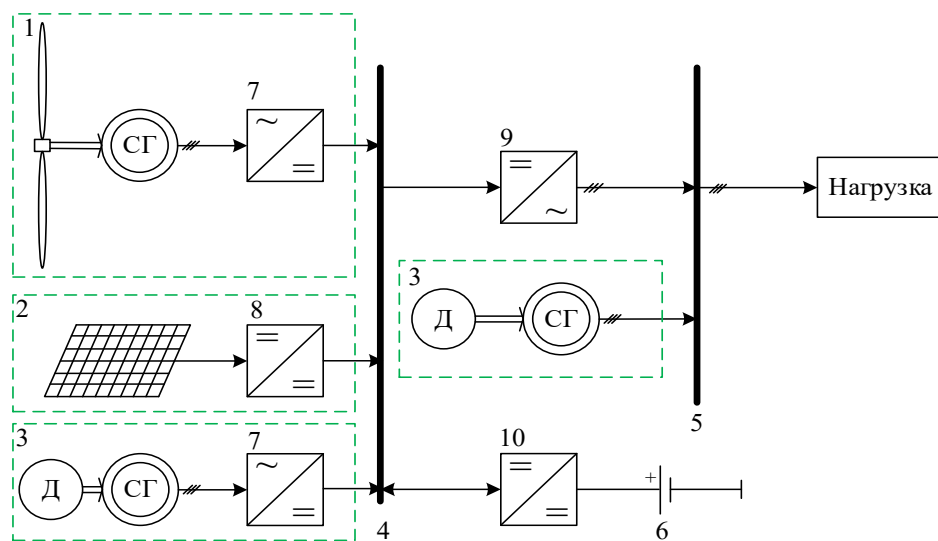


Рисунок 1.2 – Схема параллельного подключения генерирующих установок при смешанном соединении к шине питания

Для того чтобы уменьшить количество статических преобразователей энергии в схеме используют наиболее простую в реализации схему подключения источников энергии к шине переменного тока, но такая система должна обеспечивать синхронизацию запуска и дальнейшей работы всех устройств, а также распределить нагрузку между генераторами электроэнергии. Если использовать в качестве дополнительного источника энергии аккумуляторную батарею, то её совместное использование с СГ наиболее легко реализовать, используя шину переменного тока. В ВКР будет реализована данная система, структурная схема которой изображена на рисунке 1.3, где Д – двигатель, 1 – ветрогенератор, 2 – фотоэлектрическая установка, 3- дизельный СГ, 4 – шина переменного тока, 5 – аккумуляторная батарея, 6 – стабилизатор переменного напряжения, 7 – инвертор напряжения, 8 – двунаправленный импульсный преобразователь.

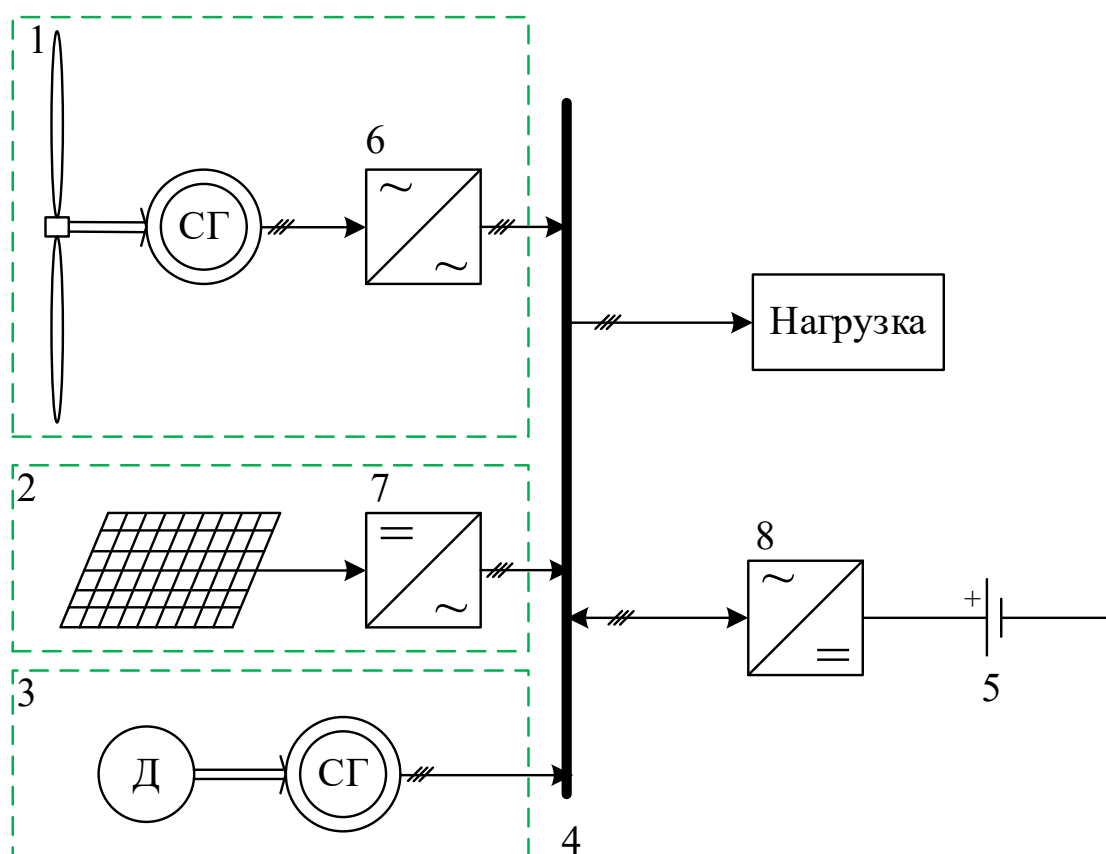


Рисунок 1.3 – Схема параллельного подключения генерирующих установок к шине переменного тока

Во всех видах гибридных систем использовалось параллельное подключение источников энергии. Данный способ подключения генерирующих установок имеет ряд преимуществ [9].

При использовании параллельного подключения в большинстве аварийных резервных системах, таких как больницы, компьютерные центры, насосные станции и другие, наиважнейшим критерием является надёжность. При проектировании энергосистем используют $n+1$ или $n+2$ источников энергии, где n – число потребителей. В случае выхода из строя основных питающих генераторов, резервные возьмут на себя всю нагрузку и сбой в питании не произойдёт [10].

Следующей отличительной чертой использования множества генерирующих установки является производительность. Это не только увеличение производимой мощности, но и уменьшается влияние отдельной нагрузки на генератор ввиду наличия общей шины большой ёмкости. Зачастую один из источников воспринимается основным, например, СГ, который берет на себя значительную нагрузку в пиковые часы работы. В это время дополнительный генератор энергии может использоваться как компенсатор реактивной мощности, тем самым повысив количество вырабатываемой полезной энергии основным генератором, следовательно, увеличив его эффективность и сэкономив на топливе.

Немаловажное отличие применения нескольких генераторов от одного – это их стоимость. Очевидно, что стоимость нескольких электромашин будет выше, чем стоимость одной машины такой же мощности, но нельзя забывать о затратах на техническое обслуживание. При ремонте единственного питающего источника энергии возникнут простои, что приведёт к убыткам. Если проводить техническое обслуживание в системах с несколькими параллельно соединёнными генераторами, то можно отключить один из них и направить всю нагрузку на оставшийся или при наличии резервного генератора временно подключить его к системе на время ремонта.

Для уменьшения вероятности поломок и выхода из строя генерирующих установок при проектировании необходимо обратить внимание на выбор мощностей каждого из источника энергии и их совместимость. В идеальном случае совместимыми будут две одинаковые электрические машины или же машины с одинаковой развиваемой скоростью, выходным напряжением, интерфейсом для управления, средством управления и распределения нагрузки и частотой. Если же генераторы будут несовместимыми, то возможна ситуация неравномерного распределения нагрузки между ними и последующим выходом их из строя [11].

В отличие от одной машины, использование нескольких может привести к существенному увеличению занимаемого ими пространства, ведь необходимо для каждой из машин обеспечить дополнительное место для доступа и обслуживания, но если учесть, что в МРЭ используется в основном установки до 25 МВт, то в совокупности занимаемое пространство будет небольшим относительно занимаемых в централизованной системе энергоснабжения.

Потенциал развития МРЭ позволит обеспечить всю территорию РФ доступной электроэнергией, заменить широко используемые тепловые электростанции, эффективно использовать активно развивающиеся АИЭ и ВИЭ в системе энергоснабжения.

1.2 Математическое описание синхронной машины при работе в генераторном режиме

В данном разделе рассматривается математическое описание СМ согласно [12].

СМ по конструкции ротора различаются на явнополюсные и неявнополюсные, а в качестве приводных двигателей могут использоваться паровые турбины, гидравлические турбины или дизели [13]. В электроэнергетике широко применяется связка дизельного двигателя и СГ с явнополюсным устройством ротора. По-

этому в качестве описываемой СМ будет рассмотрен явнополюсный СГ, имеющий механическую связь с дизельным двигателем, структурная схема такой системы приведена на рисунке 1.4.

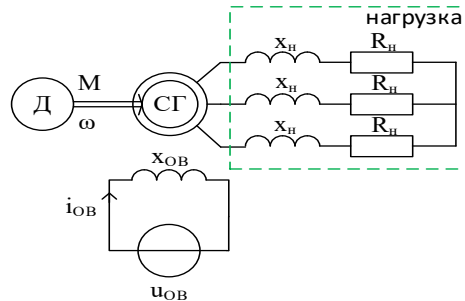


Рисунок 1.4 – Использование СМ в генераторном режиме

Для рассмотрения физической взаимосвязи электромагнитных процессов исследуем связь величин ЭДС (E_A, E_B, E_C), напряжений (U_A, U_B, U_C), токов (I_A, I_B, I_C) в обмотках статора с напряжением и током обмотки ротора (обмотки возбуждения) (E_{OB}, I_{OB}). В трёхфазных СГ в обмотках статора образуется симметричная система ЭДС E_A, E_B, E_C равных по величине и сдвинутых относительно друг друга на $2 \cdot \pi/3$ радиан, поэтому для упрощения расчётов будем рассматривать любую одну фазу и её комплексные действующие значения. На рисунке 1.5 представлена схема, описывающая основные процессы в СГ [12; 14; 15], где индексом «1» обозначаются величины обмотки статора, а индексом «2» обмотки ротора.

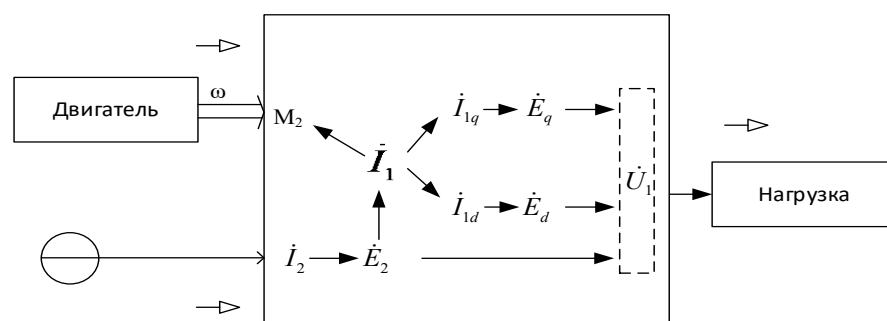


Рисунок 1.5 – Взаимосвязь основных величин в ненасыщенной СМ

В сети электроснабжения довольно часто СМ работают на активно-индуктивную нагрузку, поэтому удобно рассматривать влияние активной и реактивной составляющих по отдельности. Такой метод называется методом двух реакций, основанный на принципе наложения. Тогда ток обмотки статора:

$$\begin{aligned} I_{1d} &= I_1 \cdot \sin \alpha \\ I_{1q} &= I_1 \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (1.1)$$

где α - угол между ЭДС \dot{E}_1 и током обмотки \dot{I}_1 статора; \dot{I}_d и \dot{I}_q - продольная и поперечная проекции тока статора \dot{I}_1 на оси прямоугольной системы координат, связанной с ротором.

При нагрузке ток \dot{I}_1 создаёт магнитный поток $\dot{\Phi}_1$, который вращается синхронно с ротором и называется потоком реакции якоря [13]. Этот магнитный поток также можно представить в виде продольного размагничивающего потока $\dot{\Phi}_{1d}$ и поперечного потока $\dot{\Phi}_{1q}$. Тогда результирующий поток:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_{1d} + \dot{\Phi}_{1q} + \dot{\Phi}_{\sigma d} + \dot{\Phi}_{\sigma q}, \quad (1.2)$$

где $\dot{\Phi}_2$ - магнитный поток, созданный током \dot{I}_2 обмотки возбуждения; $\dot{\Phi}_\sigma$ - магнитный поток рассеяния.

Каждый из потоков индуцирует в обмотке статора соответствующую ЭДС:

$$\dot{E} = \dot{E}_2 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma d} + \dot{E}_{\sigma q} \quad (1.3)$$

Напряжение фазы обмотки явнополюсного СГ можно представить в виде:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma d} + \dot{E}_{\sigma q} - R_1 \cdot \dot{I}_1 \quad (1.4)$$

или подставив (1.3) в (1.4):

$$\dot{U}_1 = \dot{E} - R_1 \cdot \dot{I}_1, \quad (1.5)$$

где R_1 - активное сопротивление в одной фазе обмотки статора определяющее тепловые потери.

Пары ЭДС $\dot{E}_{1d}, \dot{E}_{\sigma d}$ и $\dot{E}_{1q}, \dot{E}_{\sigma q}$ совпадают по фазе, поэтому удобно выразить их через индуктивные сопротивления и соответствующие токи.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1d} &= -j \cdot x_{1d} \cdot \dot{I}_{1d} & \dot{E}_{\sigma d} &= -j \cdot x_{\sigma d} \cdot \dot{I}_{1d}, \\ \dot{E}_{1q} &= -j \cdot x_{1q} \cdot \dot{I}_{1q} & \dot{E}_{\sigma q} &= -j \cdot x_{\sigma q} \cdot \dot{I}_{1q}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где $x_{\sigma d}, x_{\sigma q}$ и x_{1d}, x_{1q} индуктивные сопротивления рассеяния и обмоток статора на оси прямоугольной системы координат, связанной с ротором, соответственно; $\dot{E}_{\sigma d}, \dot{E}_{\sigma q}, \dot{E}_{1d}, \dot{E}_{1q}$, - комплексные действующие значения соответствующих ЭДС.

Тогда используя уравнение (1.6):

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_2 - j \cdot x_{1d} \cdot \dot{I}_{1d} - j \cdot x_{1q} \cdot \dot{I}_{1q} - j \cdot x_{\sigma d} \cdot \dot{I}_{1d} - j \cdot x_{\sigma q} \cdot \dot{I}_{1q} - R_1 \cdot \dot{I}_1 = \\ &= \dot{E}_2 - j \cdot (x_{1d} + x_{\sigma d}) \cdot \dot{I}_{1d} - j \cdot (x_{1q} + x_{\sigma q}) \cdot \dot{I}_{1q} - R_1 \cdot \dot{I}_1 \end{aligned} \quad (1.7)$$

И обозначив $x_d = x_{1d} + x_{\sigma d}$ и $x_q = x_{1q} + x_{\sigma q}$, как полные индуктивные сопротивления обмоток статора на оси прямоугольной системы координат, получим уравнения напряжения фазы нагрузки:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_2 - j \cdot x_d \cdot \dot{I}_{1d} - j \cdot x_q \cdot \dot{I}_{1q} - R_1 \cdot \dot{I}_1 \quad (1.8)$$

Для упрощения дальнейших расчётов пренебрежём активным сопротивлением обмотки статора:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_2 - j \cdot x_d \cdot \dot{I}_{1d} - j \cdot x_q \cdot \dot{I}_{1q} \quad (1.9)$$

На основе полученного уравнения можно построить упрощённую однофазную схему замещения СГ, представленную на рисунке 1.6. [12]

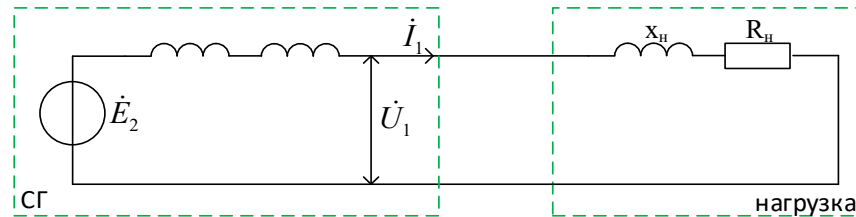


Рисунок 1.6. Упрощённая однофазная эквивалентная схема СГ подключённого на активно-индуктивную нагрузку

Для вывода формулы мощности, отдаваемой генератором в нагрузку, воспользуемся упрощённой векторной диаграммой (ВД) СГ на активно-индуктивную нагрузку (см. рисунок 1.7), построенной по уравнению (1.9). [6; 15; 16]

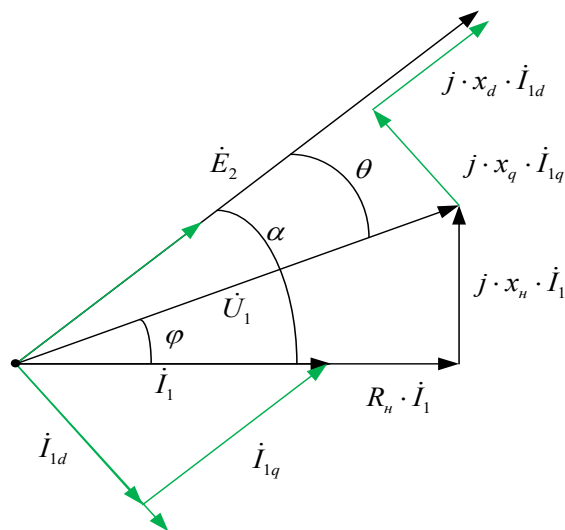


Рисунок 1.7. ВД явнополюсной машины

При симметричной нагрузке, полезная (активная) мощность СГ равна:

$$\begin{aligned} P_2 &= 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\alpha - \theta) = \\ &= 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\theta) + 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\theta), \end{aligned} \quad (1.10)$$

где $\cos \varphi$ - коэффициент мощности.

Имея в виду (1.1), запишем:

$$P_2 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1q} \cdot \cos(\theta) + 3 \cdot U_1 \cdot I_{1d} \cdot \sin(\theta) \quad (1.11)$$

По ВД на рисунке 1.7 выразим составляющие тока обмотки статора:

$$I_{1q} = \frac{U_1 \cdot \sin(\theta)}{x_q}; \quad I_{1d} = \frac{E_2 - U_1 \cdot \cos(\theta)}{x_d} \quad (1.12)$$

Подставив (1.12) в (1.11), получим:

$$\begin{aligned} P_2 &= 3 \cdot U_1 \cdot \frac{U_1 \cdot \sin(\theta)}{x_q} \cdot \cos(\theta) + 3 \cdot U_1 \cdot \frac{E_2 - U_1 \cdot \cos(\theta)}{x_d} \cdot \sin(\theta) = \\ &= \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_2}{x_d} \cdot \sin(\theta) + \frac{3 \cdot U_1^2}{2} \cdot \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \cdot \sin(2\theta) \end{aligned} \quad (1.13)$$

Тогда электромагнитный вращающийся момент равен:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_2 \cdot p}{\omega_2 \cdot x_d} \cdot \sin(\theta) + \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p}{2 \cdot \omega_2} \cdot \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \cdot \sin(2\theta), \quad (1.14)$$

где $\Omega_2 = 2\pi n_2 = 2\pi f_2 / p = \omega_2 / p$ - механическая угловая скорость вращения ротора.

В итоге получим,

$$\begin{aligned} M_2 &= f(\omega_2, x_d, x_q, U_1, E_2, p, \theta) \\ U &= f(E_2, I_{1d}, I_{1q}, x_d, x_q,) \end{aligned} \quad (1.15)$$

Уравнения (1.15) описывают электромагнитные процессы в СМ при принятых допущениях.

1.3 Описание и строение трехфазного мостового автономного инвертора напряжения с широтно-импульсно модулированным регулированием

Внедрение ВИЭ постоянного тока либо аккумуляторных батарей в систему МРЭ или автономного электроснабжения требует применения автономных инверторов. Особенностью данных преобразователей энергии является регулирование выходного напряжения, зависящее только от его схемы, режима работы и системы управления. Автономные инверторы по характеру процессов делятся на автономные инверторы тока, напряжения (АИН) и автономные резонансные инверторы [18].

В АИН источник напряжения подключён непосредственно к вентильным элементам, поэтому изменение их состояний приводит к скачкообразному изменению величины выходного напряжения и направлению выходного тока, в отличие от инвертора тока, который дуален АИН: источник энергии выступает в качестве источника тока и переключение полупроводниковых ключей приводит к изменению мгновенного значения тока и направления напряжения, следовательно, АИН свойственно работать на нагрузку индуктивного характера, а ёмкостная нагрузка характерна для автономного инвертора тока [19]. Резонансный инвертор выступает в роли промежуточного варианта и работает на нагрузку с резонансным контуром.

Зачастую в качестве нагрузки в системах автономного электроснабжения выступают асинхронные двигатели или другие потребители энергии, которых можно представить в виде активно-индуктивной нагрузки. В результате накопления энергии в индуктивных элементах нагрузки для избежания перенапряжения на полупроводниковых приборах требуется обеспечить протекание тока, поддерживаемого ЭДС самоиндукции обратно в источник постоянного тока, поэтому параллельно основному вентильному преобразователю подключают противоположно направленный диод, называемый обратным диодом, а на стороне источника устанавливают конденсатор. В качестве управляемых вентилях широко применяются биполярный транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ), отличающийся низкими потерями мощности во включённом состоянии и высоким входным сопротивлением или тиристоры, обладающие высоким КПД [20].

Рассмотрим принцип работы ТМАИН с управляемыми БТИЗ и обратными диодами на активно-индуктивную нагрузку, подключённой по схеме звезды, структурная схема которого приведена на рисунке 1.8.

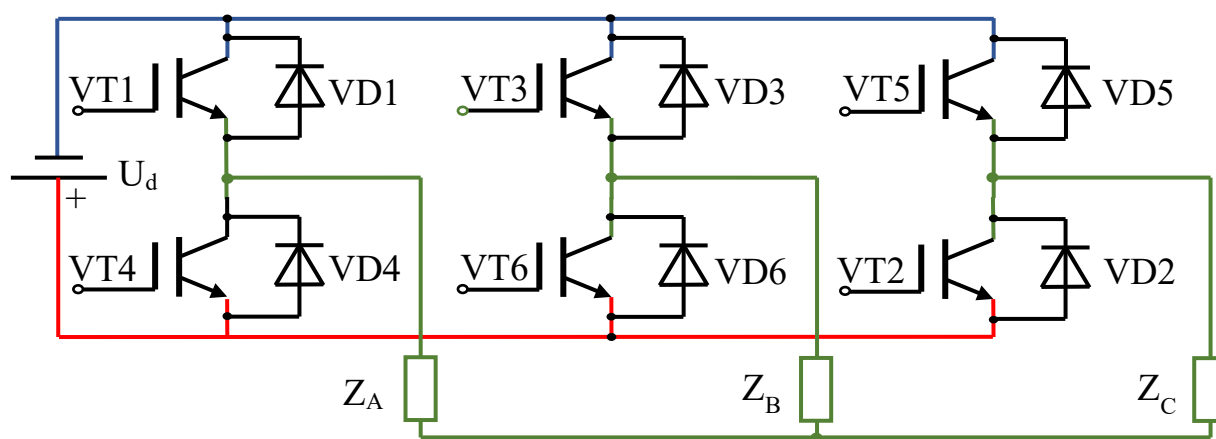


Рисунок 1.8 – Принципиальная схема ТМАИН на активно-индуктивную нагрузку, подключённой по схеме звезды

Независимо от длительности управляющих импульсов алгоритм управления ключами одинаков. Исследуем временные диаграммы ТМАИН на активно-

индуктивную нагрузку, представленные на рисунке 1.9 при управлении импульсами с длительностью в 180 (см. рисунок 1.9 а) и 120 (см. рисунок 1.9 б) электрических градусов. Транзисторы одной фазы открываются с разницей в 180 электрических градусов, а транзисторы каждой группы, анодной или катодной отпираются со сдвигом в 120 электрических градусов поочередно [18]. При 120 градусном регулировании изменяется форма напряжения на выходе инвертора (см. рисунок 1.9), тем самым увеличивается число гармонических составляющих напряжения, также уменьшается амплитудные значения фазных и линейных напряжений, поэтому анализ работы ТМАИН будет проводиться при 180 градусной длительности управляющих сигналов, поступающих на управляемые тиристоры [21]. В ТМАИН при 180 градусном управлении в каждый момент времени одновременно открыты три вентиля (см. рисунок 1.9) в шести различных комбинациях (см. рисунок 1.10).

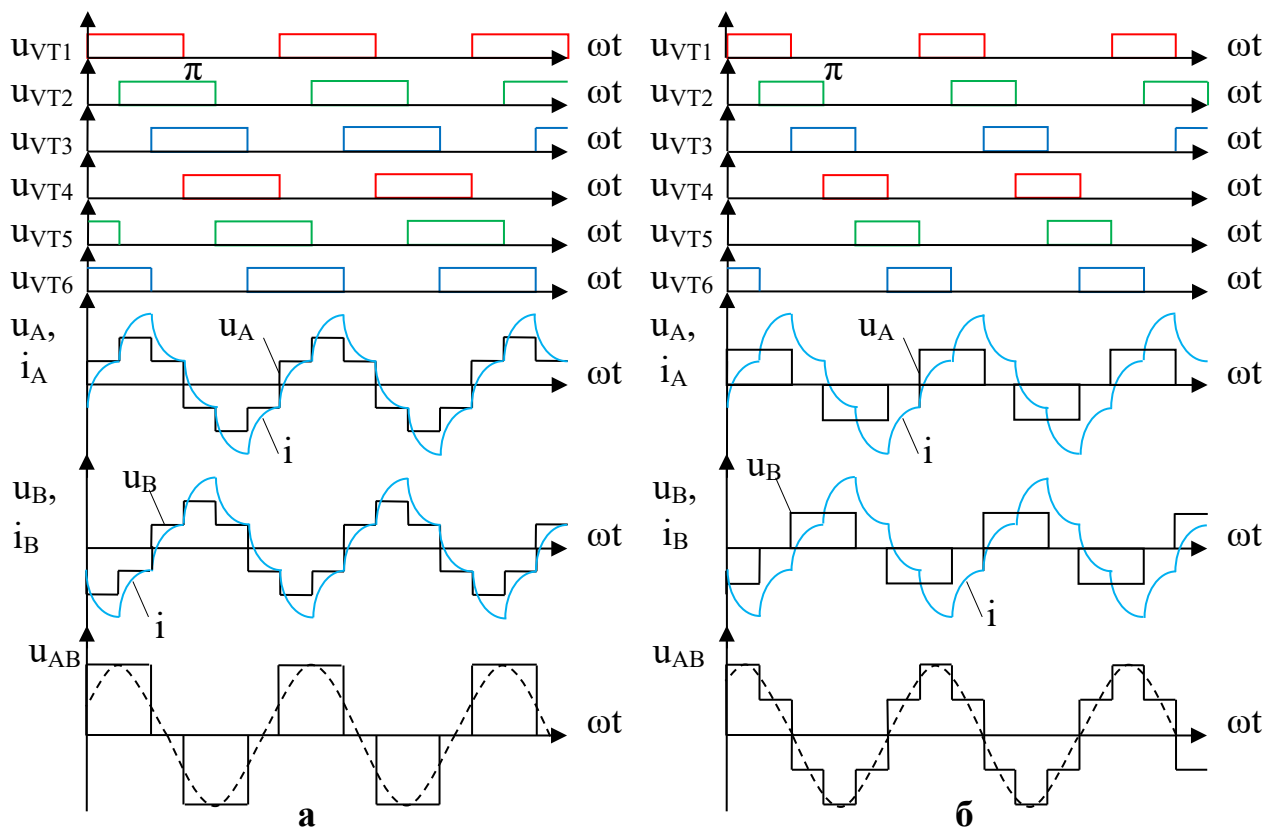


Рисунок 1.9 – Временные диаграммы ТМАИН на активно-индуктивную нагрузку при управлении импульсами длительность π (а) и $2\pi/3$ (б)

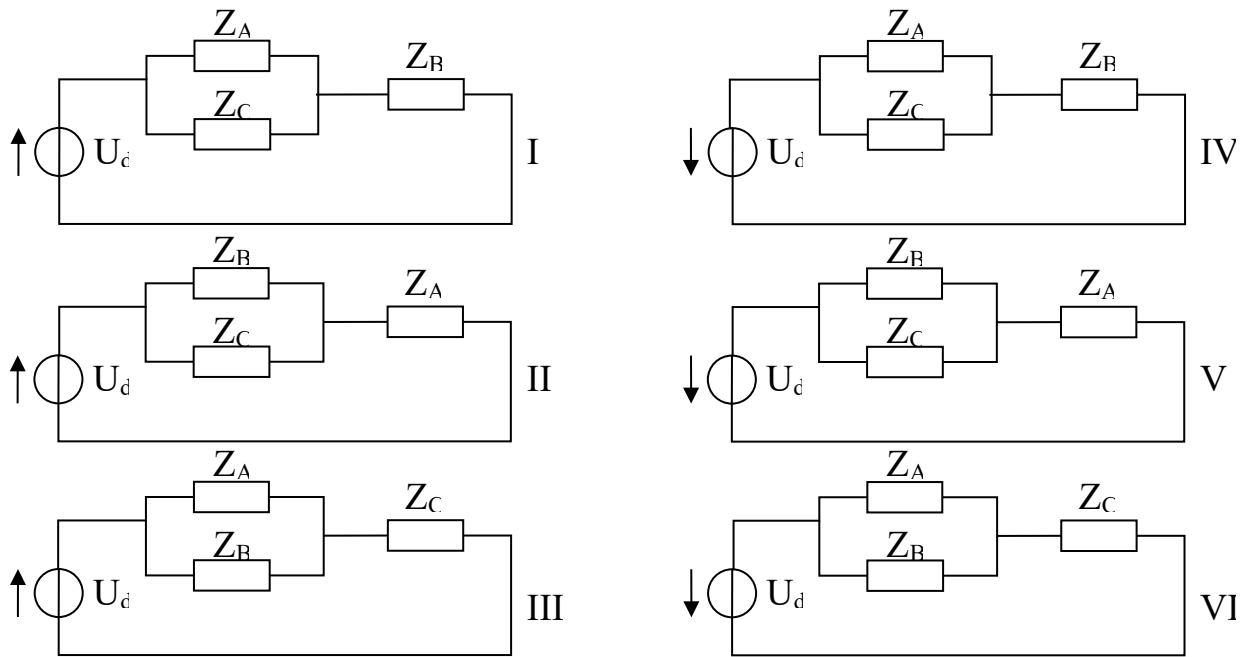


Рисунок 1.10 – Схемы замещения ТМАИН

Схемы замещения на рисунке 1.10 позволяют вычислить мгновенные значения фазных и линейных напряжений на каждой фазе. Приведём пример расчёта для фазы A , учитывая, что нагрузка симметричная, то есть $Z_A = Z_B = Z_C$ [22]:

$$U_A^1 = \frac{(Z_A \parallel Z_C) \cdot U_d}{(Z_A \parallel Z_C + Z_B)} = \frac{U_d}{3}; U_A^2 = \frac{Z_A \cdot U_d}{(Z_C \parallel Z_B + Z_A)} = \frac{2 \cdot U_d}{3}; U_A^3 = \frac{(Z_A \parallel Z_B) \cdot U_d}{(Z_A \parallel Z_B + Z_C)} = \frac{U_d}{3} \quad (1.16)$$

В последних трёх сочетаниях меняется направление протекания тока через нагрузку:

$$U_A^4 = \frac{-(Z_A \parallel Z_C) \cdot U_d}{(Z_A \parallel Z_C + Z_B)} = \frac{-U_d}{3}; U_A^5 = \frac{-Z_A \cdot U_d}{(Z_B \parallel Z_C + Z_A)} = \frac{-2U_d}{3}; U_A^6 = \frac{-(Z_A \parallel Z_B) \cdot U_d}{(Z_A \parallel Z_B + Z_C)} = \frac{-U_d}{3} \quad (1.17)$$

Аналогично были рассчитаны значения напряжений на фазе B и построены временные диаграммы U_A и U_B и на их основе получена U_{AB} амплитудное значение которой равняется U_d .

Основываясь на полученные временные диаграммы (см. рис. 1.9) рассчитаем действующие значения фазных напряжений [18]:

$$U_{\phi} = \sqrt{\frac{4}{2\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{U_d}{3}\right)^2 d\omega t + \frac{2}{2\pi} \cdot \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{2U_d}{3}\right)^2 d\omega t} = U_d \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \quad (1.18)$$

Также определим среднее значение токов, проходящих через полупроводниковые приборы на примере *VTI* и *VDI* [20]:

$$\begin{aligned} i_{VT1cp} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\varphi}^{\pi+\varphi} I_{Amax} \sin(\omega t) d\omega t = \frac{I_{Amax}}{\pi} \cdot \cos(\varphi) \\ i_{VD1cp} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\varphi} I_{Amax} \sin(\omega t) d\omega t = \frac{I_{Amax}}{2\pi} [1 - \cos(\varphi)] \end{aligned} \quad (1.19)$$

где φ – угол фазового сдвига между первой гармоникой фазного напряжения и тока нагрузки; I_{Amax} - амплитудное значение основной гармоники тока фазы *A*.

Выходное напряжение ТМАИН несинусоидального характера и состоит из основной (первой) гармоники и ряда высших гармоник не кратных двум и трём, которые можно пропустить через фильтр, тогда достаточно рассмотреть лишь первую гармонику выходного напряжения [23].

$$u_{lv} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot U_d \cdot \left[\sin(\omega t) + \frac{\sin(5 \cdot \omega t)}{5} + \frac{\sin(7 \cdot \omega t)}{7} + \frac{\sin(11 \cdot \omega t)}{11} + \dots \right], \quad (1.20)$$

где $U_{л(1)m} = 2\sqrt{3} \cdot U_d / \pi$ - амплитудное значение первой гармоники.

Как видно из (1.20) амплитуда выходного напряжения не зависит от параметров нагрузки, а только от входного источника напряжения. Для регулирования выходного напряжения и частоты автономного инвертора используют систему управления ключами на основе ШИМ. Рассмотрим ТМАИН с синусоидальным ШИМ управлением и сделаем несколько допущений:

- 1) вентили будем рассматривать идеальными;
- 2) опустим рассмотрение коммутационных процессов в системе.

Самая распространённая вариация ШИМ управления – синусоидальным ШИМ, в котором происходит сравнение эталонного сигнала в виде треугольника с несущим сигналом частотой первой гармоники синусоидального характера. Данный тип управления позволяет уменьшить содержание в эппюре выходного напряжения высших гармоник и регулировать амплитуду, фазу и частоту выходного напряжения путём изменения ширины управляющих импульсов [20, 24]. Различают однополярную и двухполярную ШИМ.

Преимуществом однополярной ШИМ перед двухполярной является простота её реализации и уменьшение коэффициента искажения выходного напряжения, что позволяет использовать на выходе инвертора более простые фильтры [20]. С появлением управляемых БТИЗ появилась возможность использования ШИМ с высокой частотой от 1 до 10 кГц при частоте выходного напряжения 50 Гц [23]. Для удобства рассмотрения процессов в схеме примем соотношение частоты опорного сигнала к модулированному равным 9. Проанализируем принцип работы схема ТМАИН с однополярной ШИМ на активно-индуктивную нагрузку, построим временные диаграммы на рисунке 1.11, иллюстрирующие основные процессы в схеме.

В отличие от 180 – градусного регулирования при ШИМ управлении наблюдается 8 комбинаций состояний ключей, к рассмотренным 6 добавляются два состояния при котором одновременно работают транзисторы одной группы, анодной или катодной, в таком случае напряжение на выходе инвертора равно

нулю. Принцип построения управляющих сигналов поступающие на управляемые транзисторы следующий: если значения напряжения модулированного фазного напряжения больше величины опорного сигнала, то открывается транзистор анодной группы соответствующей фазы, при противоположном соотношении сигналов, отпирается транзистор катодной группы этой же фазы.

Ширина импульсов, подаваемых на управляемые ключи, зависит от соотношения амплитуд опорного и модулированного сигналов. Это отношение характеризуется индексом амплитудной модуляции [20]:

$$M_a = \frac{U_{M \max}}{U_{OP \max}}, \quad (1.21)$$

где $U_{M \max}$ и $U_{OP \max}$ - амплитудные значения модулированного и опорного сигналов соответственно.

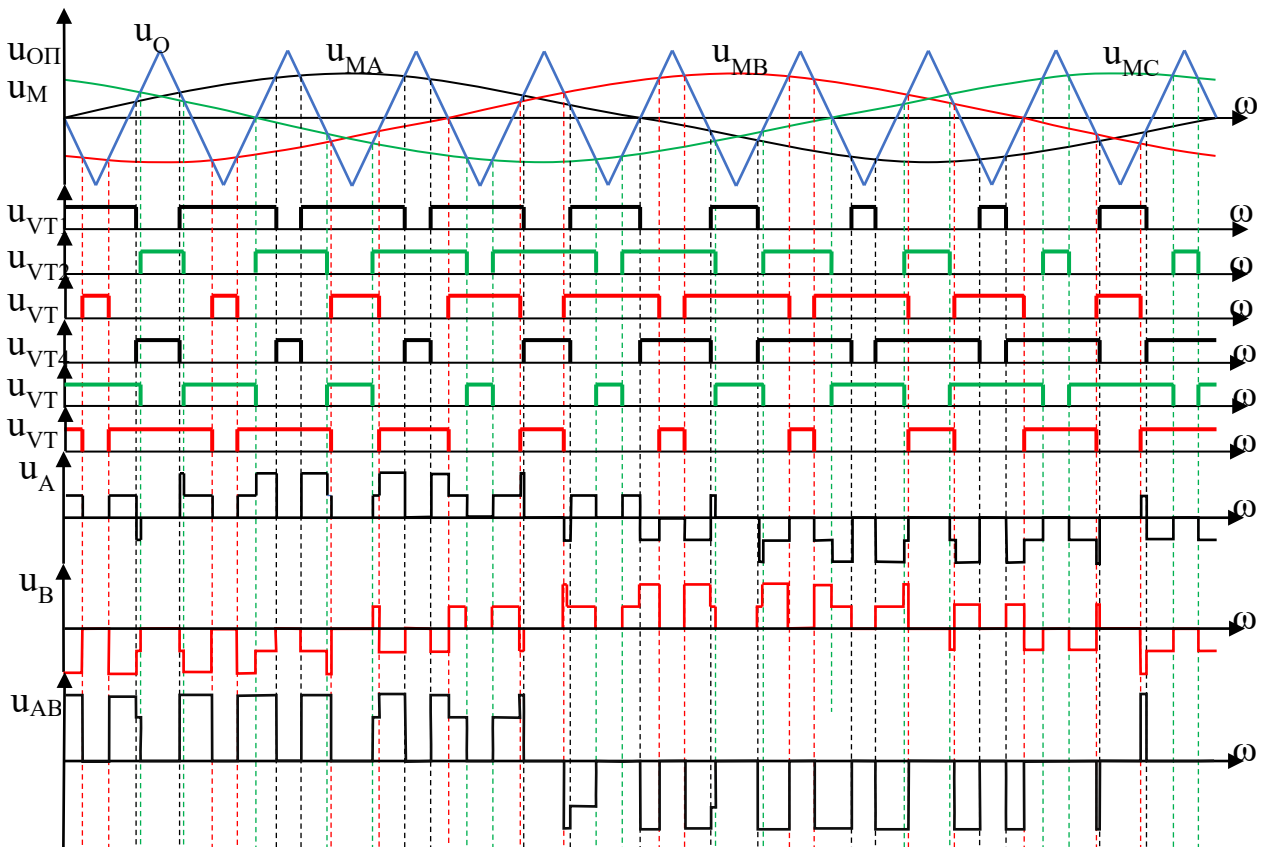


Рисунок 1.11 – Временные диаграммы ТМАИН при однополярной модуляции

Эффективность процесса модуляции зависит от соотношения частот, модулированного и опорного сигналов характеризующаяся величиной индекса частотной модуляции:

$$M_f = \frac{f_{\text{оп}}}{f_M}, \quad (1.22)$$

где $f_{\text{оп}}$ и f_M - частоты опорного и модулированного сигналов соответственно.

При изменении значения индекса амплитудной модуляции от 0 до 1 максимальное значение первой гармоники выходного напряжения инвертора линейно изменяется по отношению к этому параметру, а при значениях больше 1 увеличение M_a приводит к нелинейному изменению $U_{л(1)m}$ до его предельного значения. Такой режим работы называется сверхмодуляцией.

Величина M_f оказывает важнейшее влияние на качество выходного напряжения. Чем больше этот параметр, тем лучше гармонический состав выходного напряжения инвертора, но появляются значительные коммутационные потери в полупроводниковых элементах, поэтому при выборе частоты опорного сигнала следует учитывать технические параметры управляемых ключей и обратных диодов [20].

Выводы:

- 1) Составлено математическое описание СМ;
- 2) Рассмотрены принципы работы ТМАИН на активно-индуктивную нагрузку при 180 градусном и ШИМ управлении;
- 3) Исследованы системы с параллельной работой генерирующих установок при подключении их к шине постоянного, переменного тока или при смешенном соединении;
- 4) Приведены основные недостатки и преимущества параллельного соединения источников питания в единую сеть электроснабжения.

В результате была выбрана наиболее распространённая схема подключения разнородных источников энергии на параллельную работу, исследуемая далее, выявлена необходимость синхронизации разнородных источников энергии, обладающих существенно разными динамическими свойствами, в результате чего для обеспечения длительной устойчивой работы требуется применение специализированных алгоритмов синхронизации и распределения нагрузок.

2 СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

2.1 Методы синхронизации двух синхронных генераторов и распределение нагрузки между ними

В разделе 1 главы 1 были рассмотрены преимущества и недостатки параллельной работы источников питания. Исследуем необходимые требования синхронизации двух СГ для их параллельной работы на общую нагрузку. В качестве допущений вместо ведущий трёхфазный источник переменного напряжения будет выступать сеть с бесконечно большой мощностью, что позволяет считать её параметры неизменными при подключении нового источника энергии.

При подключении СМ в сеть используются следующие методы синхронизации [12, 13, 14, 15, 16, 25]:

1) *Метод точной синхронизации.* При данной варианте синхронизации достигается полное совпадение параметров напряжения и чередования фаз сети и подключаемой к ней электрической машины, т.е. $U_d = U_g$, $\omega_d = \omega_g$, $\varphi_d = \varphi_g$, а также необходимо обеспечить нулевой сдвиг вектора ЭДС каждой фазы генератора с вектором напряжения сети в момент включения.

$$\begin{aligned} u_d &= U_d \cdot \sin(\omega_d t \pm \varphi_d) \\ u_g &= U_g \cdot \sin(\omega_g t \pm \varphi_g) \end{aligned} \quad (2.1)$$

где U_d , ω_d , φ_d - параметры напряжения сети, U_g , ω_g , φ_g - параметры выходного напряжения фазы СМ.

Уравновешивание значений параметров напряжения генератора достигается путём изменения величины тока обмотки возбуждения в роторе синхронной

машины для корректирования амплитуды напряжения и величины вращающегося момента приводного двигателя для регулирования частоты выходного напряжения СМ. Совпадение чередования фаз генератора и сети определяется и проверяется при первом включении генератора. Отсутствие сдвига по фазе между векторами ЭДС фазы генератора и напряжения сети контролируется при помощи синхроскопов, ламп, нулевых вольтметров или автоматических синхронизаторов. [14, 15, 25]

Не соблюдение одного из условий приводит к появлению уравнивающих токов большой величины, которые могут вывести из строя электрические машины, коммутационные приборы, электрические контакты, тем самым нарушив работу системы электроснабжения. На рисунке 2.1 приведены диаграммы значений тока и электромагнитного момента генератора по отношению к их номинальным величинам при невыполнении последнего условия точной синхронизации СМ с сетью (кривая 1) и генератором равной мощности (кривая 2). [12, 14]

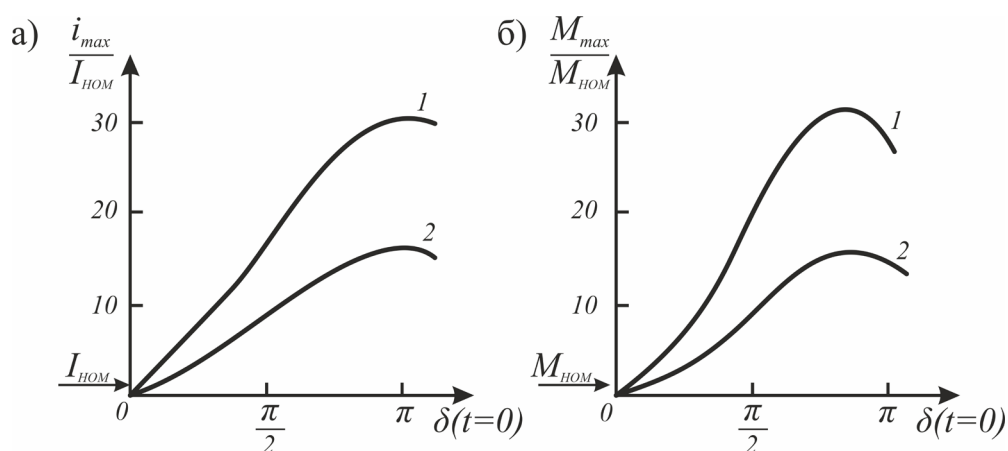


Рисунок 2.1 – Зависимость значений тока (а) и электромагнитного момента (б) генератора при невыполнении требований по совпадению по фазе векторов напряжения сети и ЭДС СМ при его синхронизации с сетью и генератором равной мощности

Кроме этого включение в сеть генератора с частотой ЭДС фазы отличной от частоты напряжения сети, но при согласовании напряжений по фазе приводит

к втягиванию в синхронизм, процессу при котором происходит естественное выравнивание частоты напряжений или угловой скорости вращения ротора путём перераспределения кинетической энергии роторов подключённых к сети генераторов энергии. При большой разнице в частоте напряжений возникают увеличения тока и момента генератора, что приводит к нарушению динамической устойчивости генераторов. [12]

2) **Метод грубой синхронизации.** Для синхронизации используются такие же требования и оборудования, что и при точной синхронизации, но генератор подключается к сети не напрямую, а через реактивное сопротивление. Наличие индуктивного сопротивления ограничивает величины уравнивающего тока, поэтому достаточно выполнить условие равенства амплитудного значения напряжений, чередования фаз, а сдвиг по фазе между векторами ЭДС генератора и напряжения сети может быть отличен от нуля. Частоты напряжений выравниваются после завершения процесса втягивания в синхронизм, а индуктивные сопротивления зашунтируются, тем самым облегчится весь механизм синхронизации, но необходимо помнить о уравнивающих токах, которые могут вывести из строя коммутационное оборудование. [25]

3) **Метод самосинхронизации.** До подключения генератора к сети его ротор раскручивается приводным двигателем до частоты вращения близкой к синхронной. После достижения необходимой частоты генератор подключается к сети и впадает в синхронизм. В результате того что при разгоне ротора генератор работает в холостом ходу, то не требуется выполнять условия выравнивания напряжений по амплитуде и фазе, но аналогично методу точной синхронизации возникают уравнивающие токи, которые компенсируют индуктивными сопротивлениями подключённые к каждой фазе статора генератора. [26]

Последние два метода синхронизации двух генераторов на параллельную работу основаны на вхождении машины в синхронизм, что облегчает и ускоряет процесс синхронизации, повышает надёжность работы системы и упрощает

схему питания. Возникающие в результате отклонения от условий синхронизации уравнивающие токи не должны превышать значения $3.5 \cdot I_{\text{НОМ}}$, чтобы не нанести серьёзный вред генератору, но необходимо также учитывать, что кроме электрической машины в системе используется множество иных устройств, которые могут выйти из строя при меньшем значении уравнивающего тока. [26]

В данной ВКР известные принципы синхронизации будут применяться для обеспечения условий параллельной работы источника переменного и постоянного тока, включенного через ТМАИН, но поскольку инвертор выполняется на базе полупроводниковых приборов, не обладающих высокой токовой защитой, то будет использоваться метод, при котором величина уравнивающих токов является минимальной, а именно метод точной синхронизации.

После соблюдения всех условий точной синхронизации, в том числе и $\dot{E}_2 = \dot{U}_1 = \dot{U}$ генератор будет работать в режиме холостого хода (см. рисунок 2.2 а). Согласно уравнению (1.12):

$$I_{1q} = \frac{U_1 \cdot \sin(\theta)}{x_q} = 0; \quad I_{1d} = \frac{E_2 - U_1 \cdot \cos(\theta)}{x_d} = 0 \quad (2.2)$$

Следовательно, ток статора \dot{I}_1 равен нулю и генератор не возьмёт на себя никакой нагрузки. Для перевода СМ в генераторный режим необходимо увеличить его активную мощность. Это достигается увеличением значения механического момента на валу генератора, увеличив скорость вращения приводного двигателя. Тогда равенство моментов на валу генератора будет нарушено и вектор ЭДС обмотки возбуждения на роторе опередит вектор напряжения сети на некоторый угол θ , тем самым создав ток \dot{I}_1 статора (см. рисунок 2.2 б). В результате генератор начнёт отдавать в сеть активную мощность:

$$P_2 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi > 0 \quad (2.3)$$

Неравенство моментов на валу приведёт к возникновению дополнительной синхронизирующей мощности и момента.

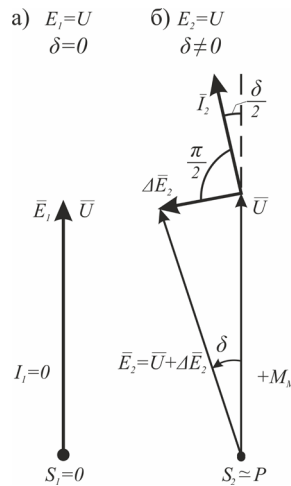


Рисунок 2.2 – ВД параллельной работы СМ с сетью в режиме холостого хода (а) и в генераторном режиме (б)

Допустим, ротор СМ отклонился на некоторый малый угол $\Delta\theta$, а его угловая скорость на пренебрежимо малую величину $\Delta\omega$, тогда:

$$\begin{aligned}
 M_2 &= \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_2 \cdot p}{(\omega_2 + \Delta\omega) \cdot x_d} \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) + \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p}{2 \cdot (\omega_2 + \Delta\omega)} \cdot \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \cdot \\
 &\cdot \sin(2(\theta + \Delta\theta)) = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_2 \cdot p}{\omega_2 \cdot x_d} \cdot [\sin(\theta) \cos(\Delta\theta) + \cos(\theta) \sin(\Delta\theta)] + \quad (2.4) \\
 &+ \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p}{2 \cdot \omega_2} \cdot \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \cdot [\sin(2\theta) \cos(2\Delta\theta) + \cos(2\theta) \sin(2\Delta\theta)]
 \end{aligned}$$

Рассмотрим малые углы отклонения θ , при которых:

$$\sin(2\Delta\theta) \approx 2\Delta\theta; \quad \sin(\Delta\theta) \approx \Delta\theta; \quad \cos(\Delta\theta) \approx 1; \quad \cos(2\Delta\theta) \approx 1 \quad (2.5)$$

Сделаем следующую замену:

$$\begin{aligned}
M_{\theta} &= \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_2 \cdot p}{\omega_2 \cdot x_d} \cdot \sin(\theta) + \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p}{2 \cdot \omega_2} \cdot \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \cdot \sin(2\theta) \\
M_a &= \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_2 \cdot p}{\omega_2 \cdot x_d} \cdot \cos(\theta) + \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot p}{\omega_2} \cdot \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \cdot \cos(2\theta)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

где M_{θ} - основной электромагнитный момент, M_a - удельный синхронизирующий момент, показывающий изменение вращательного момента рассчитанного на единицу угла θ . Тогда получим:

$$M_2 = M_{\theta} + M_a \cdot \Delta\theta \tag{2.7}$$

Момент $M_a \cdot \Delta\theta$ - называется синхронизирующим моментом. Можно заметить, что:

$$M_a = \frac{dM_2}{d\theta} \tag{2.8}$$

Подставив значение угла $\theta = \pi/2$ получим нулевое значение синхронизирующего момента, а его наибольшее значение наблюдается при $\theta = 0$. Следовательно, при малых углах θ СМ более устойчива, а при углах больше чем $|\theta| > \pi/2$ произойдёт выход из синхронизма. [25]

Аналогичным образом найдём удельную синхронизирующую мощность:

$$P_a = \frac{dP_2}{d\theta} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_2}{x_d} \cdot \cos(\theta) + 3 \cdot U_1^2 \cdot \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \cdot \cos(2\theta) \tag{2.9}$$

Тогда синхронизирующую мощность можно представить в виде $P_a \cdot \Delta\theta$.

При параллельной работе двух СГ возникает потребность в перераспределении активной и реактивной мощностей между генераторами, в частном случае разделение этих мощностей поровну. Как было сказано ранее, регулирование активной мощности производится изменением вращающего момента приводного двигателя, в то время как, реактивная мощность зависит напрямую от значения тока обмотки возбуждения, поэтому для анализа нахождения условий равенства реактивной и активной мощностей строят внешние характеристики СГ и регуляторные характеристики приводных двигателей, соответственно (см. рисунок 2.3). [27]

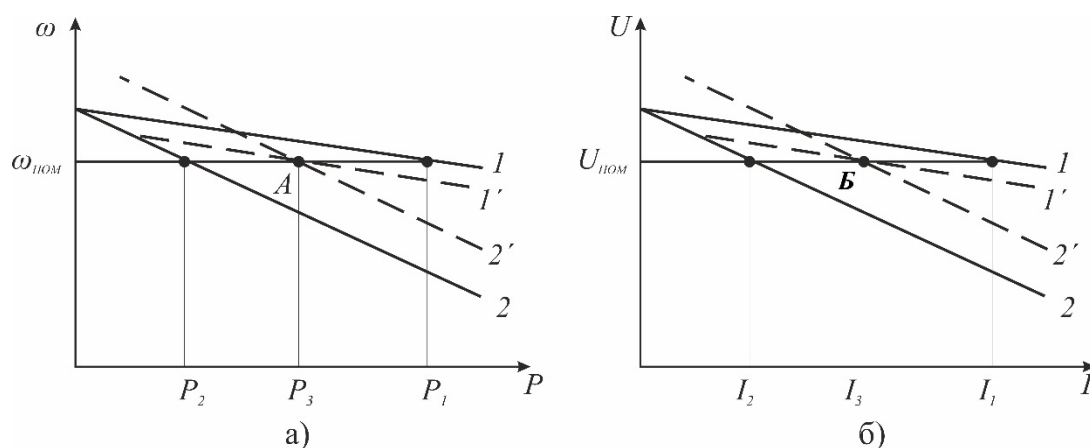


Рисунок 2.3 – Регуляторные характеристики (а) приводных двигателей и внешние характеристики (б) двух параллельно работающих СГ

Регуляторная характеристика приводных двигателей снимается при неизменном количестве подаваемого топлива, если это количество увеличить, то характеристики поднимется верх параллельно исходной и наоборот при уменьшении впрыскиваемого горючего. Аналогичным образом изменяется вид внешней характеристики СГ изменением значения тока в ОВ.

Рассмотрим регуляторную характеристику двух приводных двигателей при неравномерном распределении активной нагрузки. При номинальном значении скорости вращения двигателей наблюдается разные значения выделяемых

мощностей P_1 и P_2 . Для равенства активных мощностей требуется изменять подачу топлива на двигатели до тех пор, пока их регуляторные характеристики не пересекутся в одной точке, например в точке А ($1 \rightarrow 1'$ и $2 \rightarrow 2'$) (см. рисунок 2.3 а), при которой каждый из двигателя будет выделять $P_3 = (P_1 + P_2)/2$ активной мощности. Следовательно, у машины, которая больше нагружена подача горючего уменьшается, а у другой машины, наоборот, увеличивается. Схожим образом происходит выравнивание реактивной нагрузки между СГ, только вместо изменения количества подаваемого топлива изменяется величина тока в обмотке возбуждения. В результате при равном напряжении на зажимах генератора внешние характеристики пересекаются в точке Б ($1 \rightarrow 1'$ и $2 \rightarrow 2'$) (см. рисунок 2.3 б) и происходит потребление равной реактивной мощности $P_6 = (P_4 + P_5)/2$. [27]

2.2 Методы синхронизации и распределения мощности между синхронным генератором и трехфазным мостовым автономным инвертором напряжения

В системах малой распределённой энергетики одной из основных задач является осуществить синхронизацию нескольких СГ или генератора в паре с альтернативным источником энергии на параллельную работу. Условия для синхронизации двух СГ были рассмотрены ранее. В данном разделе проанализируем методы синхронизации ТМАИН и СГ на их параллельную работу.

Процесс и методы синхронизации двух параллельно работающих СГ изучен и широко используется на практике [12, 14, 15, 25, 26], в результате на их основе был создан метод, суть которого заключается в имитации инвертором работы генератора [28-43]. Такой подход получил название метода виртуального синхронного генератора (ВСГ) или в переводе на английский язык, *virtual synchronous generator (VSG)*, но также его можно встретить под названиями метод виртуальной синхронной машины или синхронизатор. ВСГ — это метод управления инверторами для имитации инерционного демпфирующие свойства и

функции спада СГ для повышения стабильности и контроля микросетей. [36] Существуют различные вариации данного метода.

1. **Базовый метод.** Имитация регулятора частоты СГ, который изменяет величину скорости вращения ротора ЭМ, производится в контуре управления активной мощностью и регулятора частоты, основанный на уравнении механической части СГ:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_e - M_{damp} \quad (2.10)$$

где J - момент инерции; M_m , M_e - механический и электромагнитный моменты; M_{damp} - демпфирующий момент, эквивалентный моменту сил трения в СГ. ТМАИН является статическим преобразователем энергии и не может быть непосредственно описан с помощью второго закона Ньютона для вращательного движения. Поэтому для проведения аналогии с электромеханическим преобразователем энергии рационально рассматривать уравнение (2.10), переписанное относительно мощностей в правой части $P = M / \omega \approx M / \omega_n$, где ω_n - заданная угловая частота выходного напряжения инвертора [28-43].

Тогда уравнение контура активной мощности ВСГ примет вид:

$$J \cdot \omega_n \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - P_{damp} \quad (2.11)$$

где $J_{VSG} = J \cdot \omega_n$ - виртуальный момент инерции ВСГ, определяющий инерционные свойства СГ; P_m - механическая мощность; P_e - электромагнитная мощность; P_{damp} - демпфирующая мощность.

Демпфирующая мощность P_{damp} возникает в результате механического трения и рассчитывается по формуле:

$$P_{damp} = D_{d\omega} \cdot (\omega_n - \omega), \quad (2.12)$$

где $D_{d\omega}$ - демпфирующий коэффициент спада активной мощности от частоты;
 ω - угловая частота выходного напряжения инвертора.

Также при рассмотрении механической мощности, следует учесть регулятор падения частоты вращения ротора, используемый в СГ:

$$P_m = P_n - k_p \cdot (\omega_n - \omega), \quad (2.13)$$

где P_n - заданная активная мощность; k_p - коэффициент спада ω .

С учётом всего вышесказанного, выведем итоговое уравнение осуществляющее регулирование частоты выходного напряжения инвертора.

$$J_{VSG} \frac{d\omega}{dt} = P_n - P_e - k_p \cdot (\omega_n - \omega) - D_{d\omega} \cdot (\omega_n - \omega) \quad (2.14)$$

После приведения подобных членов и произведя замену $K_p = k_p + D_{d\omega}$, получим:

$$J_{VSG} \frac{d\omega}{dt} = P_n - P_e - K_p \cdot (\omega_n - \omega) \quad (2.15)$$

Уравнение (2.15) также можно записать относительно разности заданной и рассчитанной угловой частоты выходного напряжения инвертора, сделав замену $\Delta\omega = \omega_n - \omega$, тогда $(\Delta\omega)' = \omega'$, перейдя в операторную область, получим:

$$J_{VSG} \cdot s \cdot \Delta\omega = P_n - P_e - K_p \cdot \Delta\omega \quad (2.16)$$

где s – оператор Лапласа.

Тогда уравнение (2.15) в упрощённой форме будет иметь вид:

$$\Delta\omega = \frac{P_n - P_e}{(J_{VSG} \cdot s + K_p)} \quad (2.17)$$

Для получения фазы выходного напряжения воспользуемся следующей формулой:

$$\theta = \int \omega \cdot dt = \frac{1}{s} \cdot \omega \quad (2.18)$$

На основании полученных уравнений, построим структурную схему (см. рисунок 2.4) регулятора фазы выходного напряжения инвертора.

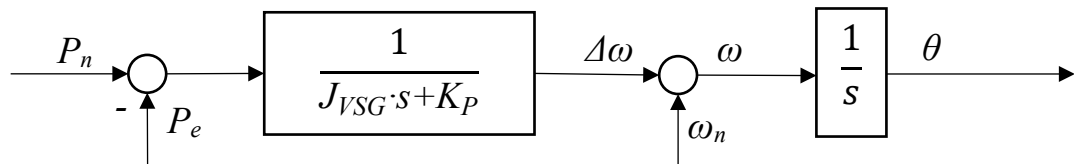


Рисунок 2.4 – Структурная схема блока управления фазой выходного напряжения инвертора

На основании уравнения (2.17) можно сделать вывод, о том, что регулирование ошибки частоты вращения производится с неизменяющейся постоянной времени $T=1/J_{VSG}$ и стремящимся к нулю коэффициентом передачи $(P_n - P_e)/K_p$.

Имитация автоматического регулятора возбуждения СГ, который изменяет величину подаваемого напряжение ОВ, тем самым регулируя магнитное поле ЭМ, производится в контуре управления реактивной мощностью и амплитуды выходного напряжения АИН.

Запишем уравнение, определяющее амплитуду выходного напряжения инвертора [33, 35, 37, 38, 40, 42, 43]:

$$K \cdot \frac{dU}{dt} = Q_n - Q_e - D_q \cdot (U_n - U) \quad (2.19)$$

где U_n и U - заданная и рассчитанная амплитуда выходного напряжения инвертора; Q_n - заданная реактивная мощность инвертора; Q_e - электромагнитная реактивная мощность инвертора; D_q - демпфирующий коэффициент реактивной мощности; K - виртуальный коэффициент напряжения.

Аналогично с уравнением фазы выходного напряжения, перепишем уравнение (2.19) относительно разности заданной и рассчитанной мощности.

$$K \cdot \frac{d\Delta U}{dt} = Q_n - Q_e - D_q \cdot \Delta U \quad (2.20)$$

Перейдём в операторную область и запишем (2.20) относительно ΔU :

$$\Delta U = \frac{Q_n - Q_e}{(K \cdot s + D_q)} \quad (2.21)$$

По уравнению (2.21) построим структурную схему (см. рисунок 2.5) блока регулирования амплитудой выходного напряжения инвертора.

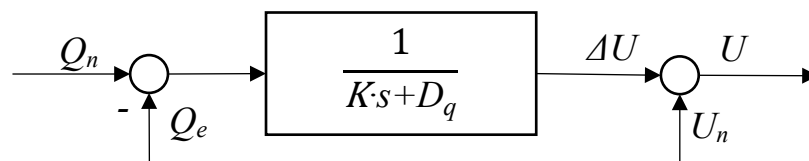


Рисунок 2.5 – Структурная схема блока управления амплитудой выходного напряжения инвертора

По полученным амплитуде (2.21) и фазе (2.18) строиться трёхфазный сигнал, который поступает в блок построения ШИМ сигнала:

$$\begin{aligned}U_A &= U_m \cdot \sin(\theta) \\U_B &= U_m \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \\U_C &= U_m \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\tag{2.22}$$

где U_m - нормированная амплитуда выходного напряжения инвертора U .

Традиционный метод регулирования параметрами выходного напряжения инвертора обладает существенным недостатком, а именно, ненулевая статическая ошибка при расчёте и амплитуды и фазы, что приводит к большим скачкам мощности и возникновению высоких значений уравнивающих токов. Эту проблему решает следующий метод.

2. Базовый метод с предварительной синхронизацией. Данный метод основывается на тех же уравнениях (2.21) и (2.18) для получения амплитуды и фазы выходного напряжения инвертора, но к заданной частоте добавляется разность заданной и измеренной частот, которая после синхронизации должна быть плавно сведена к нулю. Кроме этого, предполагается добавить интегральную составляющую к демпфирующим коэффициентам, тем самым получив ПИ – регулятор способный обеспечить нулевую статическую ошибку [29, 31, 35, 38, 40-43]. После синхронизации интегральная составляющая отключается, но значение накопившиеся в интеграторе следует свести к нулю плавно, чтобы избежать высокого перерегулирования или выхода системы из устойчивого состояния.

Учитывая все вышесказанное, изобразим общую структуру (см. рисунок 2.6) регулятора амплитуды и фазы выходного напряжения инвертора на основе развёрнутых уравнений (2.19) и (2.15), где $SW1$ и $SW2$ – ключи, замыкающиеся в момент синхронизации, K_{PI} и D_{qI} – коэффициенты интегрирующих составляющих.

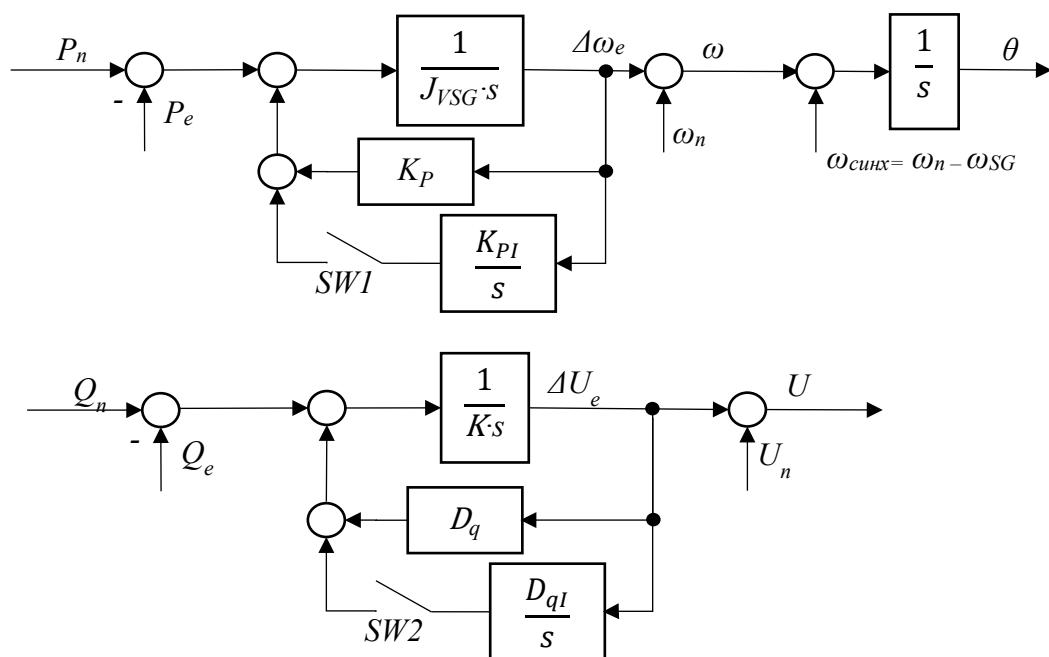


Рисунок 2.6 – Структурная схема регулятора амплитуды и фазы выходного напряжения инвертора

На рисунке 2.6 представлена наиболее полная структурная модель алгоритма, хотя некоторые исследователи [28-32, 34, 36, 39] не учитывают демпфирующие мощности или блоки предварительной [29, 31, 35, 38, 40-43] синхронизации [28, 30, 32-34, 36-37, 39], другие же предпочитают работать в других координатах, таких как dq [32, 33, 41] или $\alpha\beta$ [35]. Тем не менее, используя данный метод удаётся достичь небольших колебаний в системе, нулевой статической ошибки и контролируемого распределения мощности.

2.3 Настройка регуляторов системы синхронизации и распределения нагрузок

Моделирование и изучение работы алгоритмов будет проводиться в системе малой распределённой энергетики, которая представляет из себя параллельную работу СГ и ТМАИН на общую активно-индуктивную нагрузку. В данной системе рассматривается явнополюсный СГ с номинальными параметрами, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1 – Номинальные параметры СГ, используемого в модели

S , кВА	f , Гц	$U_{\text{Л}}$, В	p	n , об/мин
85	50	400	2	1500

ТМАИН представляет из себя мостовое соединение идеализированных *IGBT* – модулей, управляемых с помощью ШИМ сигнала с частотой 2000 Гц. На вход инвертора поступает постоянное напряжение в 800 В от идеального источника напряжения, в результате амплитуда первой гармоники равна 400 В.

Активно-индуктивная нагрузка потребляется 40 кВт и 30 кВАР активной и реактивной мощности, её можно также представить в виде параллельного соединения активного сопротивления $R_{\text{Н}}$ и индуктивности $L_{\text{Н}}$, которые можно рассчитать через формулы мощностей:

$$P_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{Л}}^2}{R_{\text{Н}}} \quad Q_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{Л}}^2}{L_{\text{Н}} \cdot 2\pi \cdot f_{\text{Н}}}, \quad (2.23)$$

где значения действительного значения линейного напряжения $U_{\text{Л}}$ и частоты $f_{\text{Н}}$ нагрузки равны номинальным параметрам СГ, приведенные в таблице 1.

Подставив значения получим, $R_{\text{Н}} = 4$ Ом и $L_{\text{Н}} = 17$ мГн.

Рассчитаем также номинальные максимальные значения фазного напряжения $U_{\text{фmax}}$ и тока $I_{\text{Н}}$, протекающих в нагрузке, соединенная по схеме звезда.

$$U_{\text{фmax}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \quad S_{\text{Н}} = \sqrt{P_{\text{Н}} + Q_{\text{Н}}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{ф}} \quad (2.24)$$

Согласно (2.24) максимальное фазное напряжение $U_{\text{фmax}} = 326.6$ В, а максимальный ток $I_{\text{Нmax}} = I_{\text{ф}} \cdot \sqrt{2} = 102$ А.

Все эти параметры необходимы для моделирования системы и расчета параметров системы обеспечивающую синхронизацию на основе рассмотренных алгоритмов. Кроме этого, в формулах (2.19) и (2.15), необходимо рассчитать три параметра: K , $D_{p\omega}$, D_q . Последние два можно определить по характеристикам $P-\omega$ и $Q-U$ СГ.

Для снятия характеристики $P-\omega$ (см. рисунок А.1) исследуемого СГ, необходимо установить постоянное неизменное значение напряжения ОВ, обеспечивающее номинальный режим работы и при этом менять скорость вращения ротора, что эквивалентно изменению подачи топлива приводного двигателя, попутно снимая активную мощность выдаваемую генератором.

Аналогичным образом снимем характеристику $Q-U$ (см. рисунок А.2) СГ, но в данном случае неизменным будет скорость вращения ротора и снимать необходимо значение реактивной мощности. Регулируемые параметры СГ меняются от нулевого до значения, превышающего номинальные в 1.5 раза.

Основываясь на формулы приведенные в [28-31, 34, 37, 43], рассчитаем:

$$D_{p\omega} = \frac{\Delta P}{\Delta \omega \cdot \omega_{set}}, \quad D_q = \frac{\Delta Q}{\Delta U}, \quad (2.25)$$

где ΔP , ΔQ - изменение активной и реактивной мощностей, $\Delta \omega$, ΔU - изменение скорости вращения ротора и напряжения ОВ.

По построенным характеристика на рисунке А.1 в приложении А вычислим демпфирующие коэффициент для случая, когда мощность СГ будет меняться от нуля до номинального значения: $D_{p\omega} = 256.3$, $D_q = 5044.1$, но необходимо также учесть, что в [37] демпфирующий коэффициент активной мощности рассчитывался для уравнения механической части СГ, а D_q при действующем значении выходного напряжения инвертора, следовательно для применения данных значений в исследуемых алгоритмах, необходимо помножить $D_{p\omega}$ на ω_n , а

D_q на $\sqrt{2}$, тогда получим следующие значения: $D_{p\omega} \cong 80519$, $D_q \cong 7133$. Оставшийся коэффициент K рассчитаем из следующей формуле, согласно [37]:

$$\frac{D_q}{2\pi K} \leq \frac{f_H}{5} \quad \Rightarrow \quad K \leq \frac{5D_q}{2\pi f_H} \quad (2.26)$$

В результате K должно быть более 113, выберем наибольшее значение. Виртуальный момент инерции выбирается из следующего равенства [43]:

$$\frac{J_{SG}}{S_{SG}} = \frac{J_{INV}}{S_{INV}}, \quad (1.27)$$

где S_{INV} - полная мощность инвертора рассчитанная по формуле (2.24) и равная 75 кВт. В результате $J_{INV} = 0.6296$ [кг · м²].

Более того, в алгоритмах используется и регулируемые параметры такие как k_p , I – составляющие регуляторов и величины постоянных времени апериодических звеньев, использующиеся для плавной подачи регулирующих величин, которые будут рассчитаны и подобраны в результате математического моделирования системы в следующей главе.

Выводы: Были рассмотрены методы синхронизации и распределения мощностей между двумя параллельно работающими СГ, на их основе был метод ВСГ в двух вариациях: базовый и базовый с модификациями, для которых был приведен расчет параметров, таких как: демпфирующие коэффициенты и K , которые будут использоваться для анализа и расчета оставшихся коэффициентов при помощи моделирования исследуемых алгоритмов. Обеспечивается модификация метода по сравнению с базовым.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК ПОСРЕДСТВОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Расчёт и моделирование сглаживающего фильтра

Выходное напряжение ТМАИН с ШИМ имеет несинусоидальный импульсный характер, что пагубно влияет на работу двигателей, трансформаторов и других потребителей энергии. Вид выходного напряжения инвертора был показан в первой главе на рисунке 1.11. Рассмотрим применение различных пассивных фильтров для сглаживания выходных напряжений и токов инвертора при работе на исследуемую активно-индуктивную нагрузку. Без фильтра амплитуда основной гармоники максимальное значение выходного напряжения составляет 399.9 В и обладает чрезмерно высоким коэффициентом несинусоидальности по напряжению (КНН) в 68.58%. Применением фильтра требуется значительно снизить величину КНН.

Самым простым из возможных пассивных фильтров – шунтирующие конденсаторы, соединённые по схеме звезды или треугольника. Результат применения данного фильтра на активно-индуктивную нагрузку приведён на рисунке 3.1. Чем больше величина ёмкости, тем больше искажается основная гармоника, поэтому зададимся максимальным падением амплитуды первой гармоники напряжения в 3%. На рисунке 3.1 были использованы конденсаторы ёмкостью 0.75 Ф, соединённых звездой, при этом амплитуда основной гармоники падает на 2.65% и достигает значения 389.3 В. Также можно видеть, ввиду появления ёмкостей, постоянное смещение тока. Величина КНН опустилась до 5.24% при активно-индуктивной нагрузке. Применение L , RL и RC фильтров не дало положительного результата, т.к. подобные фильтры в основном применяются в системах с небольшими токами.

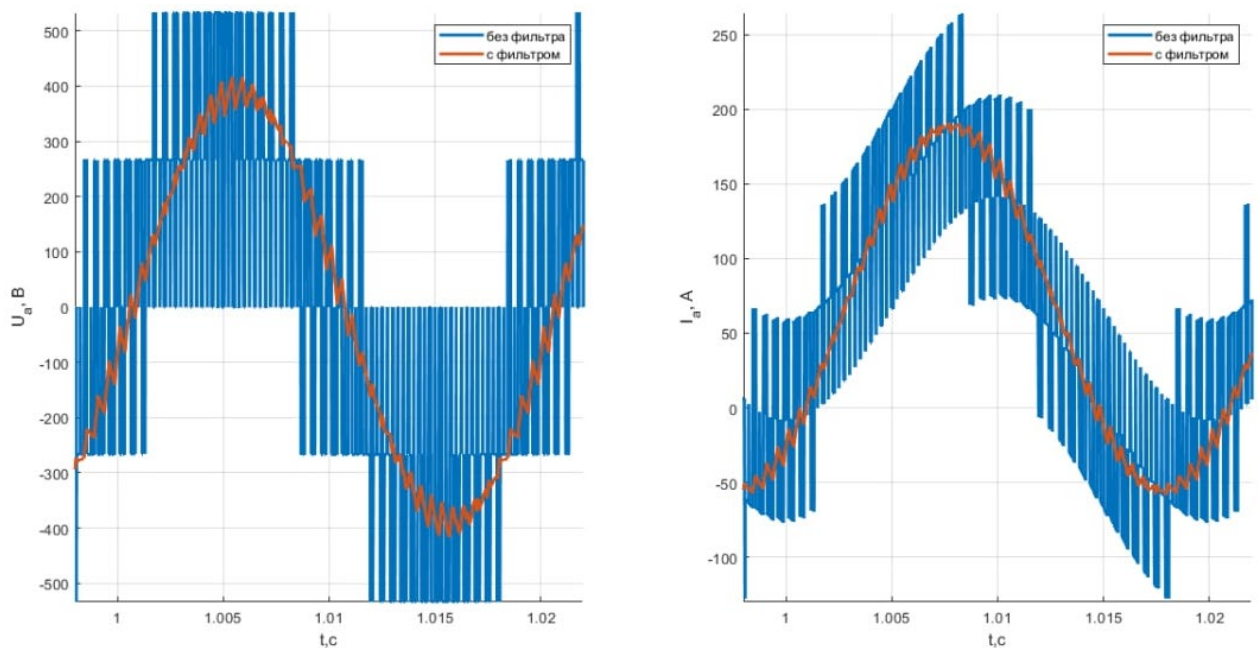


Рисунок 3.1 – Выходные напряжение и ток ТМАИН при использовании C – фильтра при активно-индуктивной нагрузке

Рассмотрим простейший однозвенный Γ -образный LC – фильтр нижних частот. Такой фильтр применимый для сглаживания сигналов на выходе преобразователя и имеющий резонансную частоту меньшую чем половину частоты ШИМ называют синус-фильтром (СФ). Гармоники с частотой ниже, чем резонансная частота фильтра пропускается практически без искажения, а остальные затухают обратно пропорционально квадрату их частот [44].

Частоту среза f_p выбирают намного меньшую частоты ШИМ и большую частоты основной гармоники [44], т.е.

$$f_1 \ll f_p \ll f_{\text{ШИМ}}, \quad (3.1)$$

где $f_1 = 50$ Гц - частота основной гармоники выходного напряжения, $f_{\text{ШИМ}} = 2000$ Гц - частота ШИМ сигнала. Условию (3.1) удовлетворяет резонансная частота в 400 Гц.

Расчёт параметров фильтра будет производиться относительно ёмкости, значение которой вычислим по формуле [44]:

$$C = \frac{S_H}{3} \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\varphi)}}{\omega \cdot U_{(1)}^2}, \quad (3.2)$$

где S_H - полная мощность, выделяемая в нагрузке; $\cos(\varphi)$ - коэффициент мощности нагрузки; ω - угловая частота основной гармоники напряжения; $U_{(1)}$ - действительное значение амплитуды первой гармоники.

Значение коэффициента мощности вычислим через активную и полную мощности нагрузки:

$$\cos(\varphi) = \frac{P_H}{S_H} \quad (3.3)$$

Тогда формулу (3.2) можно представить в виде:

$$C = \frac{Q_H}{3\omega \cdot U_{(1)}^2} \quad (3.4)$$

Величину индуктивности вычислим по следующей формуле [44, 45]:

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot f_p)^2 \cdot C}, \quad (3.5)$$

где f_p - частота среза фильтра.

В итоге были получены следующие значения: $L = 0.5$ мГн и $C = 0.6$ мФ . Также рассмотрим добавление в ёмкостную цепь демпфирующих резисторов номиналом 0.01 Ом, а к индуктивной составляющей добавим активное сопротивление в 0.1 Ом в связи с потерями в длинных силовых кабелях. Диаграммы выходных токов и напряжений инвертора приведены на рисунке 3.2.

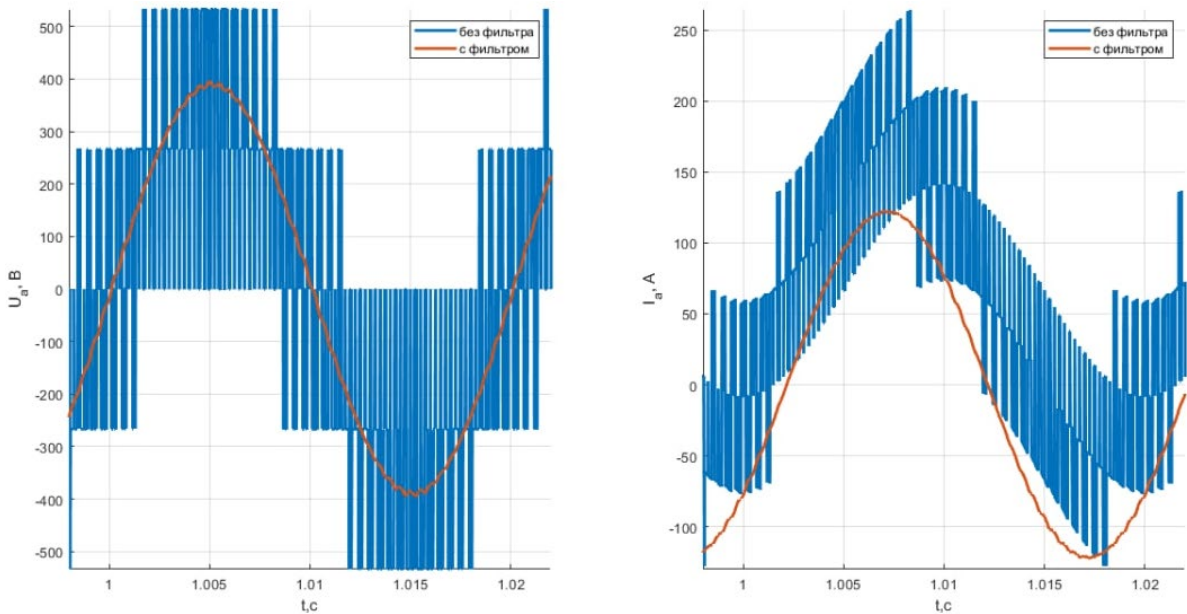


Рисунок 3.2 – Выходные напряжение и ток ТМАИН с СФ при активно-индуктивной нагрузке

Амплитуда первой гармоники напряжения изменилась искажена на 2.53%, а КНН опустилось значительно, до 1.24%. Для улучшения показателей однозвенного LC фильтра применяются многосвязные фильтры, состоящие из последовательного каскада однозвенных LC - фильтров, схема которого изображена на рисунке 3.3.

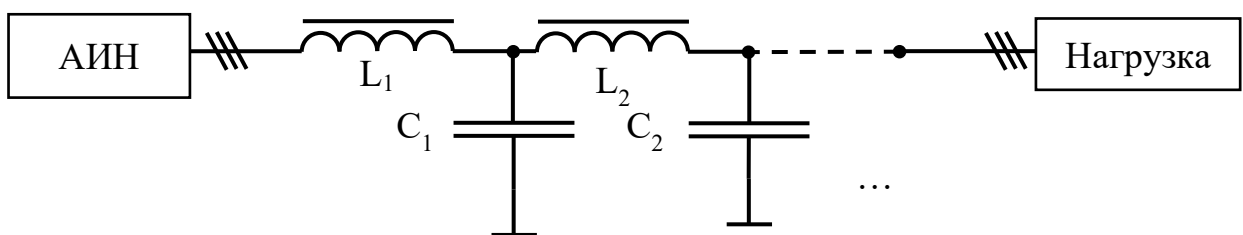


Рисунок 3.3 – Структурная схема многосвязного LC - фильтра

Добавим к СФ аналогичный каскад и проиллюстрируем результаты на рисунке 3.4.

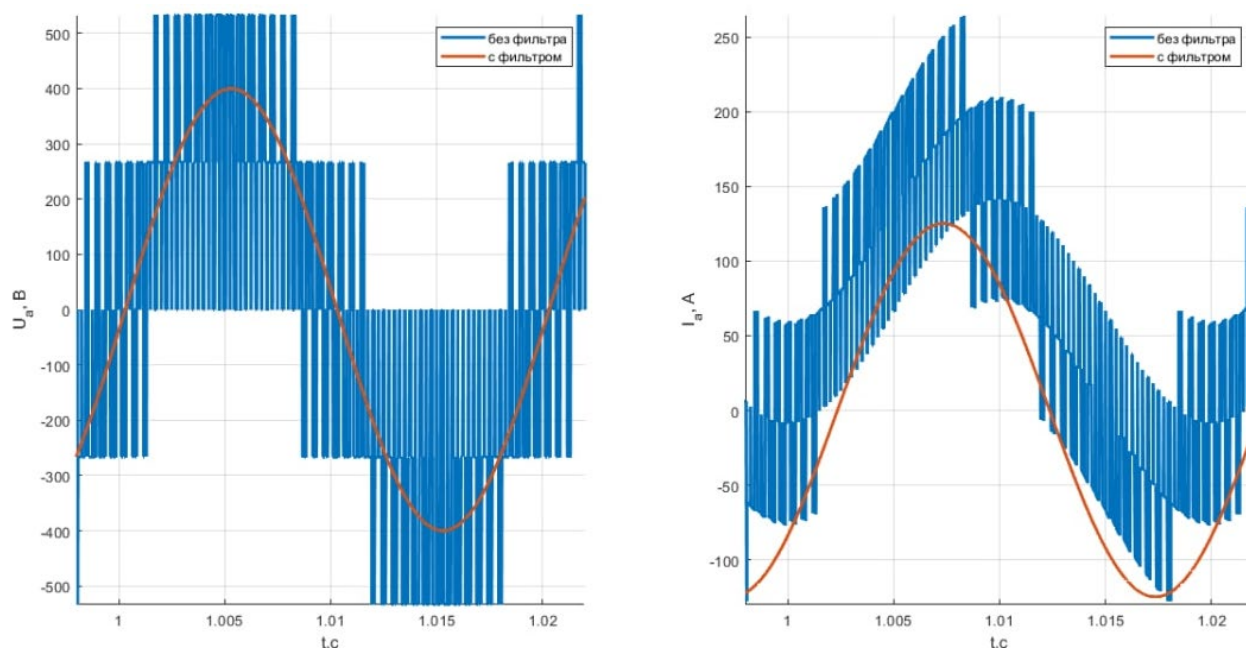


Рисунок 3.4 – Выходные ток и напряжение ТМАИН при использовании двухзвенного LC фильтра при активно-индуктивной нагрузке

Применение позволило достичь неизменности амплитуды основной гармоники и уменьшения КНН до 1.17%.

К двухзвенному LC фильтру можно добавить дополнительные равные каскады или резонансные контура настроенные на определенные гармоники, в большинстве случаев на 3 и 5, а оставшиеся шунтируются последним конденсатором, но применение двухзвенного LC фильтра позволило достичь сглаженных синусоидальных выходных сигналов автономного инвертора.

Сравнивая результаты применения фильтра, можно заметить, что при активно – индуктивной нагрузке удовлетворительными будут два фильтра: СФ и двухзвенный, но при применении второго, удалось полностью сохранить исходную амплитуды первой гармоники и получить почти идеально сглаженную синусоиду.

3.2 Моделирование синхронного генератора и трехфазного мостового автономного инвертора напряжения и подсистем измерений и регулирования

В данной ВКР экспериментальные данные будут получены путём моделирования процессов в программе *Matlab&Simulink* версии 2021a. Основой модели является блок *Synchronous Machine SI Fundamental* и *Universal Bridge*.

Первый иллюстрирует работу СГ с номинальными параметрами, приведёнными в таблице 1. Входами данного блока является частота вращения ротора в рад/с и величина напряжения ОВ. Частота вращения задаётся постоянной величиной равной номинальному значению, а напряжение поступает от подсистемы первичного регулятора напряжения, который будет рассмотрен позже. Выходами блока моделирующего СГ являются клеммы трёх фаз поступающие в блок *Three-Phase V-I Measurement* для измерения фазных напряжений и токов, и измерительный порт, который в этой работе не задействован.

Блок *Universal Bridge* является моделью трёхфазной мостовой схемы, состоящей из полупроводниковых элементов, в нашем случае, *IGBT*-модуля. Остальные настройки остаются по умолчанию. На вход блока подключается идеальный источник постоянного напряжения в 800 В и управляющие импульсы, а на выходе клеммы трёх фаз, также поступающих на измерительный блок через двухзвенный *LC* – фильтр, параметры которого рассмотрены в предыдущем разделе.

СГ и ТМАИН работают на активно-индуктивную нагрузку имитируемую блоком *Three-Phase Parallel RLC Load*, в настройках которого указывается значение потребляемой активной и реактивной мощности (40 кВт и 30 кВА), действующее значение линейного напряжения (400 В) и её частота (50 Гц). До нагрузки установлен измерительный порт для получения её фазных напряжений и токов.

Измеренные фазные токи и напряжения можно получить с помощью меток *From* под соответствующими именами: V_{abc_INV} и I_{abc_INV} – для ТМАИН, V_{abc_Load} и I_{abc_Load} для нагрузки, V_{abc_SG} и I_{abc_SG} – для СГ.

ТМАИН подключается к общей нагрузке через идеальный контактор, моделируемый блоком *Three-Phase Breaker*, с установленным пренебрежимо малым активным сопротивлением 0.001 Ом и управляемый с помощью внешнего воздействия. После выполнения всех условий синхронизации контактор замыкается.

Для работы модели ЭМ в программе *Matlab&Simulink* необходимо установить блок *Powergui*, в настройках которого выберем непрерывный переменный шаг. Также необходимо выбрать настройки метода интегрирования при поиске шага, рекомендуемым является метод *ode23tb* с относительным отклонением не менее 10^{-4} . Структурная модель основной системы представлена на рисунке 3.5.

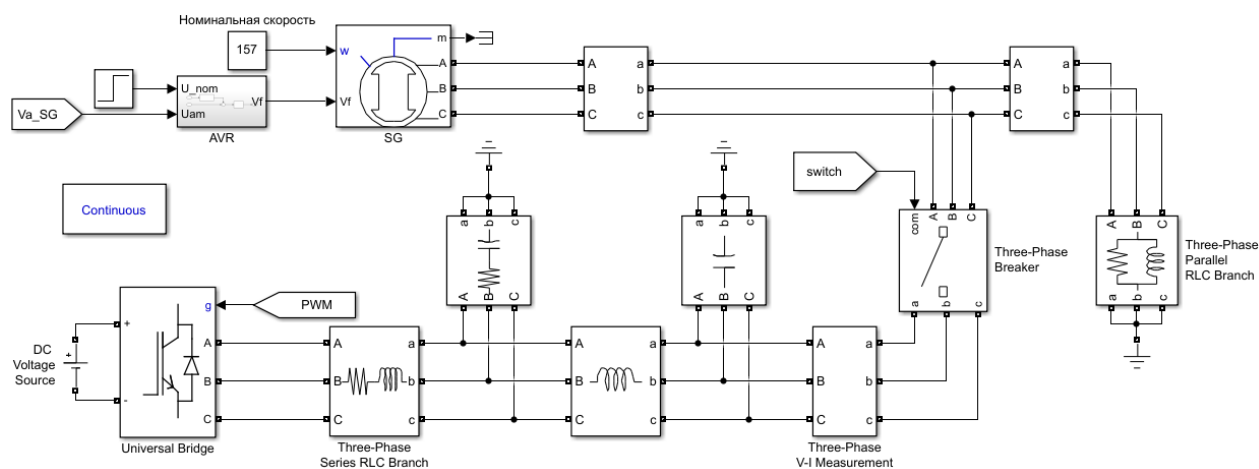


Рисунок 3.5 – Модель системы синхронизации СГ и ТМАИН, работающих параллельно на активно-индуктивную нагрузку

Теперь рассмотрим все подсистемы, используемые в модели.

1. Подсистема регулятора напряжения ОВ СГ. Регулирование напряжением ОВ происходит путем сравнения номинального и рассчитанного значений амплитуды первой гармоники СГ (см. рисунок 3.6). Амплитуда первой гармоники определяется с помощью преобразования Фурье (блок *Fourier*).

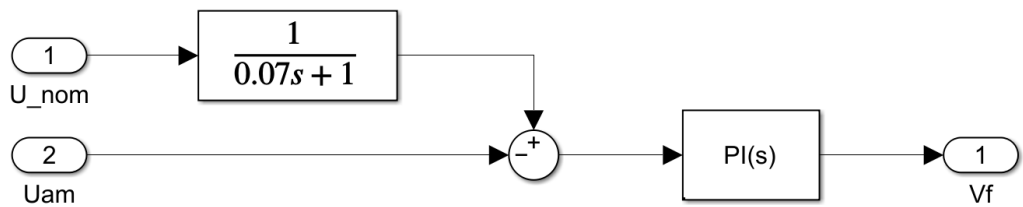


Рисунок 3.6 – Подсистема регулирования напряжением ОБ СГ

Разность напряжений через ПИ – регулятор поступает на вход СГ и будет равна нулю, когда будет достигнуто номинальное значения напряжения на ОБ.

Настройки П и И - составляющих регулятора: $P = 0.1$, $I = 1.25$. Постоянная времени задания номинального напряжения равняется 0.07 с.

2. Подсистема измерения мощности ТМАИН и СГ. Для получения величин активной и реактивной мощностей используется блок Power (*PLL-Driven, Positive-Sequence*), со следующими настройками: начальное значение частоты – 50 Гц; минимальная частота – 45 Гц; начальные значения параметров тока и напряжения равны 0; шаг расчёта равен шагу моделирования. На вход блока Power поступают трёхфазные сигналы напряжения и тока, а также частота сигнала и его фаза. В конечном виде подсистема измерения мощности представлен на рисунке 3.7.

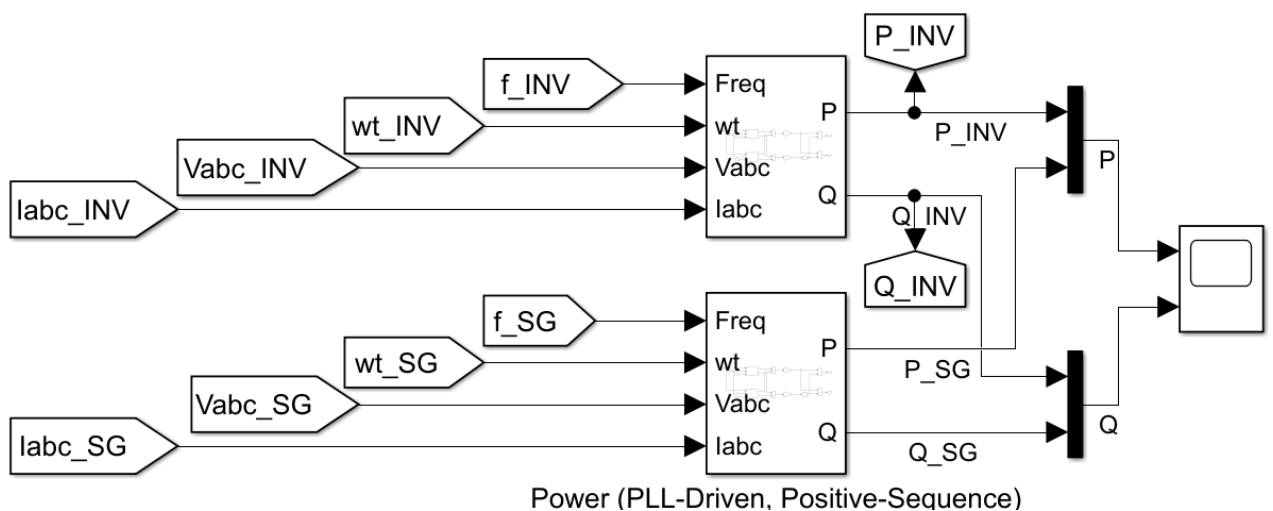


Рисунок 3.7 – Подсистема измерения активной и реактивной мощностей

Для удобства и компактности передачи сигнала используются метки *Goto* и *From*.

3. Подсистема измерения амплитуды и фазы первой основной гармоники напряжений. Основным блоком для измерения амплитуды и фазы первой гармоники является блок *Positive-Sequence (PLL-Driven)*, на вход которого поступает трёхфазный сигнал, в нашем случае напряжение, а также фаза и частота этого сигнала, которое рассчитывается при помощи блока *PLL (3ph)*, который в свою очередь требует нормированного сигнала на входе, поэтому сигнал трёхфазного напряжения умножаем на нормировочный коэффициент. Ввиду того, что частота и фаза сигнала меняется, из полученной амплитуды найдём её среднее значение с помощью блока *Mean (Variable Frequency)*, который принимает на входе сигнал, который нужно измерить и его частоту. Полученная подсистема измерения амплитуды и фазы первой гармоники напряжений СГ и ТМАИН представлен на рисунке 3.8.

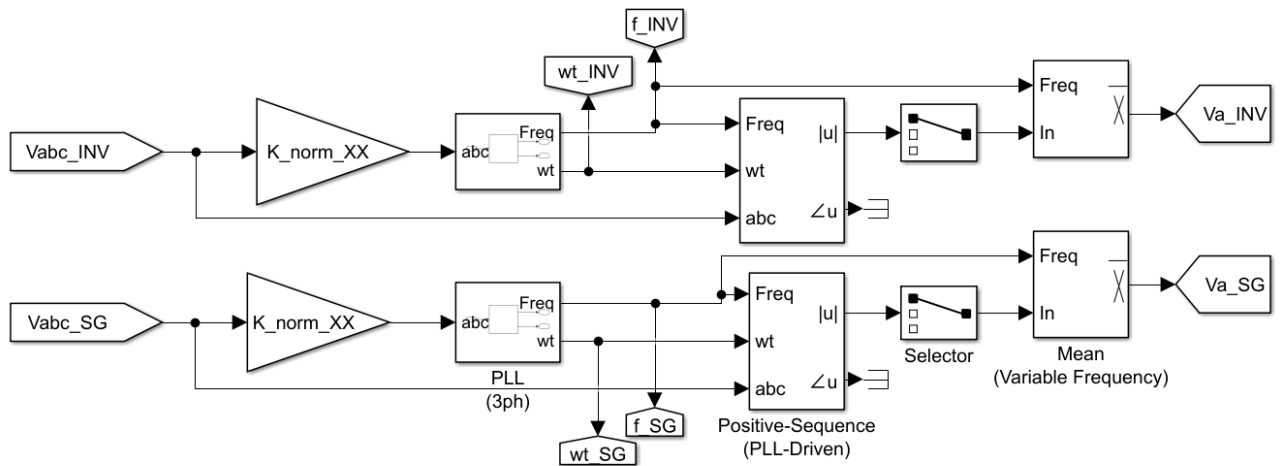


Рисунок 3.8 – Подсистема для измерения амплитуды и фазы первой основной гармоники напряжений СГ и ТМАИН

Во всех блоках устанавливается начальное значение частоты в 50 Гц, минимальное значение частоты в 45 Гц, нулевые начальные условия и шаг расчёта равный шагу моделирования. Блок *PLL* имеет дополнительные параметры, такие

как, коэффициенты регуляторов, постоянной времени дифференцирования, максимальная скорость изменения частоты и частота среза фильтра для измерения частоты, значения которых оставим по умолчанию.

4. Подсистема построения ШИМ сигнала. Для построения ШИМ модулированного сигнала используются два блока: *3-Phase Sine Voltage Generator*, отвечающий за построение трёхфазного сигнала по рассчитанной фазе и амплитуде и блок *PWM Generator (2-Level)*, строящий непосредственно ШИМ сигнал с частотой 2000 Гц для ТМАИН. Значение фазы поступающая на вход блок генерации трёхфазного синусоидального сигнала задаётся в радианах, поэтому следует выбрать соответствующий параметр в настройках блока. Настройки блока *PWM Generator* следующие:

1. Тип генерации: 6 импульсный для трёхфазной мостовой схемы;
2. Параметры несущего сигнала: несинхронизированный, частота 2000 Гц, начальная фаза 0° , минимальная и максимальная амплитуда сигнала равна -1 и 1, соответственно;
3. Остальные параметры остаются без изменений;

Модель подсистемы построения ШИМ сигнала представлена на рисунке 3.9.

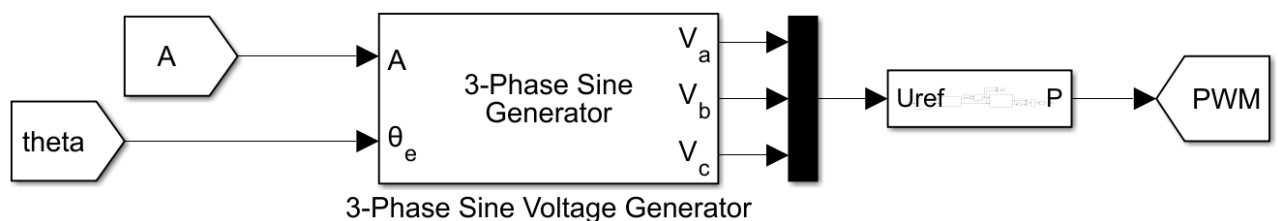


Рисунок 3.9 – Подсистема для построения ШИМ сигнала

Метки под названиями *theta* и *A* содержат рассчитанные значения амплитуды и фазы напряжения, а метка *PWM* импульсные сигналы управления транзисторами поступающий на блок *Universal Bridge*.

4. Подсистема определения допустимых условий синхронизации. Данная подсистема отвечает за отслеживание выполнения условий синхронизации,

а именно, поиска момента времени при котором разница амплитуды напряжений, фазы и частоты СГ и ТМАИН будут меньше заданных значений: 0.15 – для амплитуды, 0.15 – для частоты и 10^{-10} – для фазы, но эти значения в процессе анализа будут изменяться. И только после выполнения всех условий (это условие проверяется после трех периодов напряжения, т.к. требуется время для калибровки блоков *PLL*) подается импульс в метку *Switch* и ТМАИН подключается на параллельную работу с СГ. Структурная схема данной подсистемы представлена на рисунке А.2 в ПРИЛОЖЕНИИ А. Для сравнения разности амплитуды и частоты напряжения с заданными критериями используются подсистемы, содержащие блок взятия модуля, сравнения с константой и блок конвертации в тип *double*, т.к. блок сравнения возвращает тип *Boolean*. В тоже время, сравнение фазы происходит иным способом предложенным в [31, 35-43], а именно получение сигнала $1 - \cos(\Delta\theta)$ и сравнение этого сигнала с заданной константой (см. рисунок А.3).

5. Подсистемы плавной разгрузки интеграторов. При анализе работы базового метода с предварительной синхронизации особо уделялось внимание плавной разгрузки значений, накопленных интегратором или плавное уменьшение некоторого участка системы, который необходимо отключить после синхронизации. Структурная схема подсистемы, плавно уменьшающая входной сигнал после синхронизации представлена на рисунке А.4 в ПРИЛОЖЕНИИ А.

Представленная подсистема состоит из двух частей: определение момента времени и значение сигнала в момент синхронизации и обработка входного сигнала. В блоке *Matlab Function* после синхронизации значение входного сигнала помножается на экспоненту в степени $-t/\tau$, а после 6τ , полностью обнуляется, тем самым получается избежать резких скачков тока. Аперриодические звенья с малой постоянной времени (см. рисунок А.4) используется для предотвращения закликиваний. Листинг программы приведен в ПРИЛОЖЕНИИ А под №1.

6. Подсистема регулирования амплитудой и фазой выходного напряжения ТМАИН. Основная подсистема, осуществляющая регулирование амплитуды и фазы выходного напряжения ТМАИН исследуемым алгоритмами, ее структурная схема представлена на рисунке А.5. в ПРИЛОЖЕНИИ А, в ней используются блоки ПФ, константы, метки, подсистемы задания и регулирования параметров системы, блок *Matlab Function*, при помощи которого происходит ограничение фазы от -2π до 2π (код представлен в листинге №2 в ПРИЛОЖЕНИИ А). Более развернутая структурная схема подсистемы представлена на рисунках А.6 и 7.

В отличие от теоретической структурной схемы, представленной в предыдущей главе, на рисунках А.6 и 7 присутствуют дополнительные блоки, а именно:

1. коэффициент нормирования рассчитанной амплитуды выходного напряжения, который при работе инвертора на холостой ход равен $1/437.2$, а после момента синхронизации и работы на заданную активно-индуктивную нагрузку $1/399.9$.

2. после нормировочного коэффициента устанавливается блок насыщения в пределах от -1 до 1 , ввиду ограничения амплитуды опорного сигнала ШИМ.

3. блок задания мощностей реализован таким образом, чтобы рассмотреть процесс распределения энергии между СГ и ТМАИН: до момента синхронизации ТМАИН работает на холостом ходу, а СГ выделяет 100% активной и реактивной мощности нагрузки, далее выделяемая мощность распределяется поровну, спустя 2 с инвертор берет на себя всю нагрузку и СГ начинает работу на холостом ходу и спустя еще 2 с мощность снова распределяется поровну.

В добавок ко всему для построения графиков использовались блоки *ToWorkspace*, а для уменьшения времени моделирования ее процесс заканчивался спустя 6с после момента синхронизации, это было достигнуто использованием блока задержки и блока *STOP*.

3.3 Сравнительный анализ базового метода и его модификаций

Для синхронизации рассматриваемых СГ и ТМАИН применим базовый метод ВСГ, а также проведем сравнительный анализ влияние его модификаций на скорость синхронизации, величину пусковых токов, перерегулирования и скорости регулирования переходных процессов установления активной и реактивной мощностей после момента синхронизации.

В начале приведем результаты моделирования при рассчитанных ранее теоретических значениях коэффициентом регуляторов. Для проведения анализа будем рассматривать следующие графики:

- выходных токов фазы A СГ, ТМАИН и нагрузки, с акцентом на моменте синхронизации;
- активной и реактивной мощностей СГ и ТМАИН;
- разности фаз СГ и ТМАИН рассчитанная в радианах;
- частот выходного напряжения СГ и ТМАИН;
- амплитуд выходного напряжения СГ и ТМАИН с акцентом на моменте синхронизации.

На рисунках А.8-9 приведены все необходимые диаграммы для базового метода регулирования фазой и амплитудой выходного напряжения ТМАИН, по ним видно, что скорость синхронизации составляет 2 с, амплитуда тока нагрузки увеличилась на 3.6А, перерегулирование активной и реактивной мощностей составляет 1.54 и 2.67 %, а время завершения переходного процесса 1.36 с и 1.32 с, соответственно.

Далее рассмотрим влияние настраиваемых регуляторов и модификаций базового метода на качество синхронизации.

1. Влияние на величину статической ошибки величины коэффициента K . Результат моделирования при различных значениях коэффициента K представлен на рисунке А.10, по которому можно заметить, что при увеличении K уменьшается статическая ошибка, но замедляется процесс синхронизации,

чтобы решить это рассмотрим влияние внесения интегрирующих составляющих параллельно демпфирующим коэффициентам.

2. Влияние интегрирующих составляющих. На рисунке А.11 представлены графики разности фаз, амплитуд выходного напряжения СГ и ТМАИН и частота выходного напряжения инвертора при изменении величин K_{PI} и D_{qI} коэффициентов И составляющей демпфирующих регуляторов, по которому отчетливо видно, что частота и амплитуда первой гармоники выходного напряжения ТМАИН стремятся к номинальным значениям, при этом увеличивается время за которое сравниваются фазы напряжения СГ и ТМАИН. При том, что увеличиться время синхронизации, а именно моменты полного соответствия фаз напряжений, оставшиеся два условия синхронизации выполняются наилучшим образом, т.е. будет меньше разница между частотой и амплитудой основной гармоники, что приведет к меньшим пусковым токам.

3. Влияние добавления разности, заданной и измеренной частот СГ. Последней модификаций влияющей на процесс предсинхронизации является добавка частоты. На рисунке А.12 представлены графики разности фаз, амплитуд СГ и ТМАИН и частоты последнего, по результатам которым можно видеть что хоть и величина статической ошибки частоты уменьшается, но увеличивается ее предельные значения в начальный момент времени и уменьшается скорость синхронизации.

4. Влияние величины постоянной времени разгрузки блоков регуляторов. В построенной модели используются рассмотренная ранее подсистема плавной разгрузки интеграторов для П (τ_D) и И (τ_I) составляющих демпфирующих регуляторов и (τ_f) для постепенно отключения подстройки частоты.

Для анализа влияния τ_D воспользуемся настройками базового метода. Полученные результаты представлены на рисунке А.13.

При рассмотрении воздействия τ_I на систему, установим значения И составляющих демпфирующих регуляторов в 25000, а τ_D выберем 0.1 с. Полученные результаты представлены на рисунке А.14.

Изменение τ_f не приводит в видимым различиям результатов, т.к. величина разницы частоты слишком мала.

По рисункам А.13-14 можно сделать вывод, о том, что большие значения постоянных времени, а следовательно почти мгновенное отключение регулятора не позволяют системе обработать возникшие изменения, а при чрезмерно малых постоянных времени процесс отключения медленный и ввиду больших значения регуляторов, ошибка на их входе увеличивается и вносит значительное влияние в систему. Для соблюдения необходимых требований, а именно недопущение величин пусковых токов более 50 А, были выбраны следующие значения постоянных времени: $\tau_D = 0.15\text{с}$, $\tau_f = 0.1\text{с}$, $\tau_I = 0.5\text{с}$.

Подытоживая полученные результаты сравним начальную систему с применением базового метода ($K = 6000$, $K_{PI} = D_{qI} = 0$, $\tau_D = \tau_f = \tau_I = 0.1\text{с}$) и данного метода с исследованными модификациями: $K_{PI} = D_{qI} = 25000$, $\tau_D = 0.15\text{с}$, $\tau_f = 0.1\text{с}$, $\tau_I = 0.5\text{с}$ и включение добавки фазы (см. рисунки А.15-16).

В результате имеем:

1) Увеличение амплитуды напряжения после синхронизации уменьшились с 6.32% до 5.21%, а для тока с 10.1% до 5.6%, что сказалось на значениях пере-регулирования активной и реактивной мощностей: с 33.45% до 0% для реактивной и с 66.9% до 0% для активной.

2) Скорость синхронизации возросла с 2.13 с до 4.35 с.

Таким образом, значительно уменьшились пиковые значения мощностей после синхронизации, за счет увеличения скорости синхронизации в 2 раза.

Вывод: в данной главе были проведены расчеты настройки C , LC и многозвенного LC фильтров, на основе полученных результатов был выбран многозвенный LC фильтр, который не уменьшает амплитуду основной гармоники выходного напряжения и значение показателя THD . Кроме этого, рассмотрены и приведены настройки основных блоков и подсистем, используемых в модели, а также проведен сравнительный анализ применения базового метода и его модификаций.

4 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрим интерфейс используемого пакета программ *Matlab&Simulink* на соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 9241 – 100, позволяющий определить перечень стандартов, соответствующих эргономике ПО.

Применения ГОСТ Р ИСО 9241 позволит избежать таких проблем как [46]:

- выполнение дополнительных действий, не требуемых для выполнения задачи;
- получение вводящую в заблуждение информацию;
- использование интерфейсов с недостаточной информацией;
- неожиданная реакция интерактивной системы;
- навигационные ограничения при использовании системы;
- неэффективное восстановление после ошибок.

Важной частью ПО является предоставление информации, которая будет вследствие обрабатываться и анализироваться, для этого в ИСО 9241-12 приведены основные требования, предоставляемые полученной информации:

- четкость;
- распознаваемость;
- лаконичность;
- постоянство;
- обнаруживаемость;
- разборчивость;
- понятность.

Программа *Matlab&Simulink* позволяет получить информации в процессе симуляции или после ее завершения, в числовом формате или в виде графиков. Вид и формат выводимых данных полностью регулируется пользователем.

Кроме требования к информации также следует рассмотреть рекомендации по разработке диалога между пользователями и ПО, представленные в ИСО 9241-110.

- пригодность для выполнения задачи;
- информативность;
- соответствие ожиданиям пользователя;
- пригодность для обучения;
- управляемость;
- устойчивость к ошибкам;
- пригодность для индивидуализации.

При создании модели были совершены множество ошибок, в результате которых появлялись соответствующие комментарии в окне Средства просмотра отладки, что позволяло определить или локализовать ошибки, кроме этого, рассматриваемое ПО само предлагало способы решения ошибки. Если у пользователя возникнут недопонимания в предоставляемой информации, то имеется возможность открыть документацию.

Для поддержки диалога согласно ИСО 9241-140 и ИСО 9241-149 прописаны руководства по выбору способов взаимодействия, управлению, командам, диалогам, формам и меню, а руководство по элементам пользовательского интерфейса прописаны в ИСО 9241-160 и ИСО 9241-169.

Используемое ПО *Matlab&Simulink* позволяет спроектировать систему управления для непрерывных и дискретных систем, предоставляя широкий набор инструментов систем управления, включающие в себя множество предварительно созданных блоков для общих функций, сигналов и моделей.

Simulink обладает отзывчивым и простым в использовании графической средой, подходящей для простого представления процессов с помощью сигналов, которые переходят из одного блока в другой. Большинство инженерных и научных моделей, включая системы уравнений, можно перевести в модель *Simulink*.

Многие готовые наборы инструментов позволяют сэкономить время и облегчить доступ для создания моделей, применимых во многих областях науки и техники, таких как электрические системы. Все возможные модели и блоки хранятся в *Simulink library browser*, предоставляющий возможность поиска, получения информации и редактирования моделей.

Simulink входит в стандартный пакет *MATLAB*, и большинство его функций пакетов кодирования совместимы и могут использоваться в среде разработки *Simulink*, что позволяет запускать и моделировать построенную модель в скрипте созданным в программе *MATLAB*. Симуляция может происходить в трех режимах: нормальном, ускоренном и сверхускоренном. В последних двух используется режим конвертации построенной модели в программу *Simulink* в *C* код и построения решения на основе применения численных методов, с возможностью выбора метода и шага интегрирования. В третьем режиме отключается возможность графического представления полученной информации, но есть возможность сохранения решения и дальнейшего его вывода средствами *Matlab*, кроме этого, от пользователя не требуется никакого вмешательства и необходимо лишь выбрать режим в меню представленном на рисунке 4.1.

Полученная модель синхронизации СГ и ТМАИН, работающих параллельного на общую активно-индуктивную нагрузку, получилась довольно громоздкой, поэтому для облегчения восприятия и удобства были использованы подсистемы и метки.

Метки состоят из двух блоков: *From* и *Goto*, следовательно, откуда и куда поступают сигналы, что позволяет сэкономить место на соединениях блоков, располагающихся на большом расстоянии друг от друга и избавиться от пересечения соединительных линий, что позволит лучше ориентироваться по созданной модели.

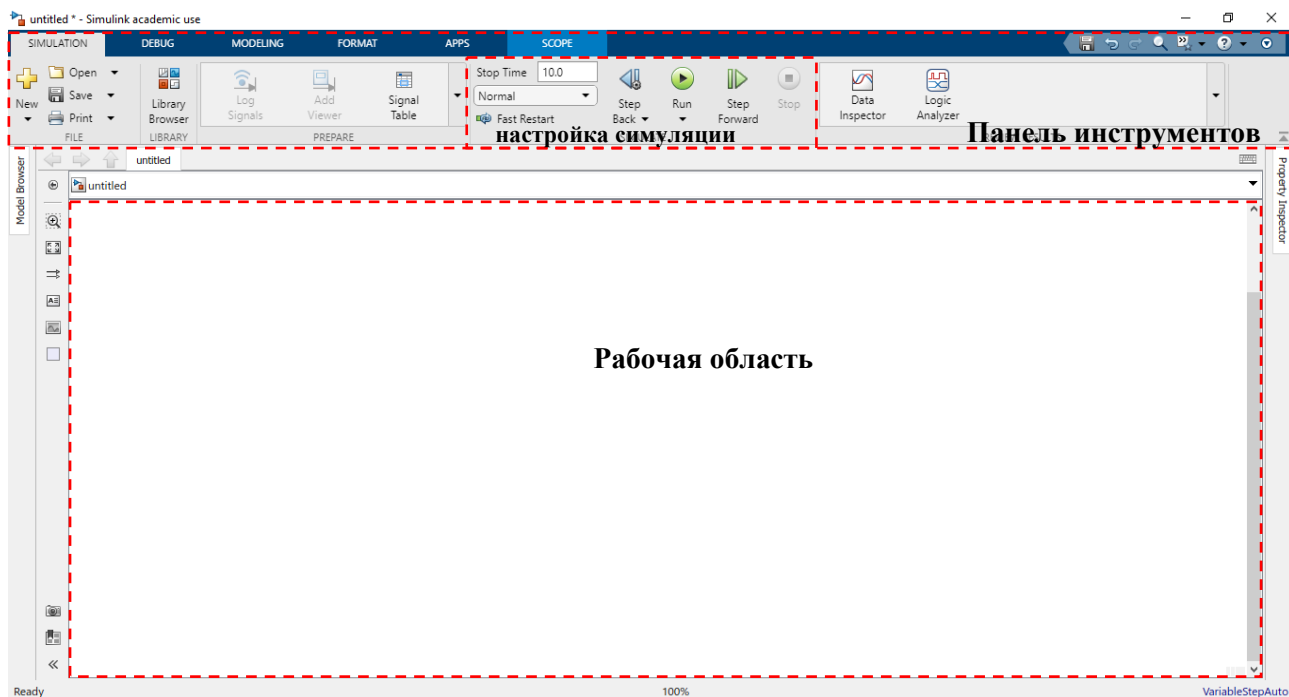


Рисунок 4.1. Интерфейс программы *Simulink*

В созданной модели на рисунке 4.2 при помощи подсистем были объединены повторяющиеся или общие по смыслу блоки. Это не только позволяет сэкономить занимаемое блоками пространство, но также позволяет настроить цвета и представление подсистем для лучшего их определения. Кроме этого, это позволит использовать внешние подсистемы, созданные другими пользователями.

Несмотря на то, что модель была создана в программе *Simulink*, настройка компонентов и вывод требуемых диаграмм были выполнены при помощи *Matlab*. Взаимодействие программ *Matlab* и *Simulink* было описано ранее. Среда *Matlab* позволяет взаимодействовать с моделью непосредственно через скрипт и полученные значения автоматически записываются в пространстве переменных. На рисунке 4.3 представлен интерфейс программы *Matlab*, в котором представлены панель инструментов, пространство переменных, проводник, командная строка и панель инструментов.

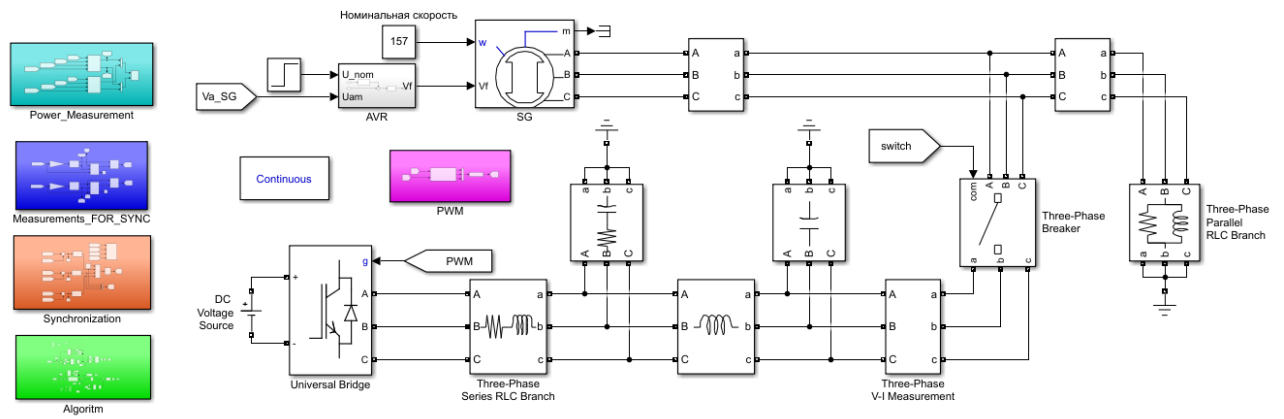


Рисунок 4.2. Модель исследуемой системы

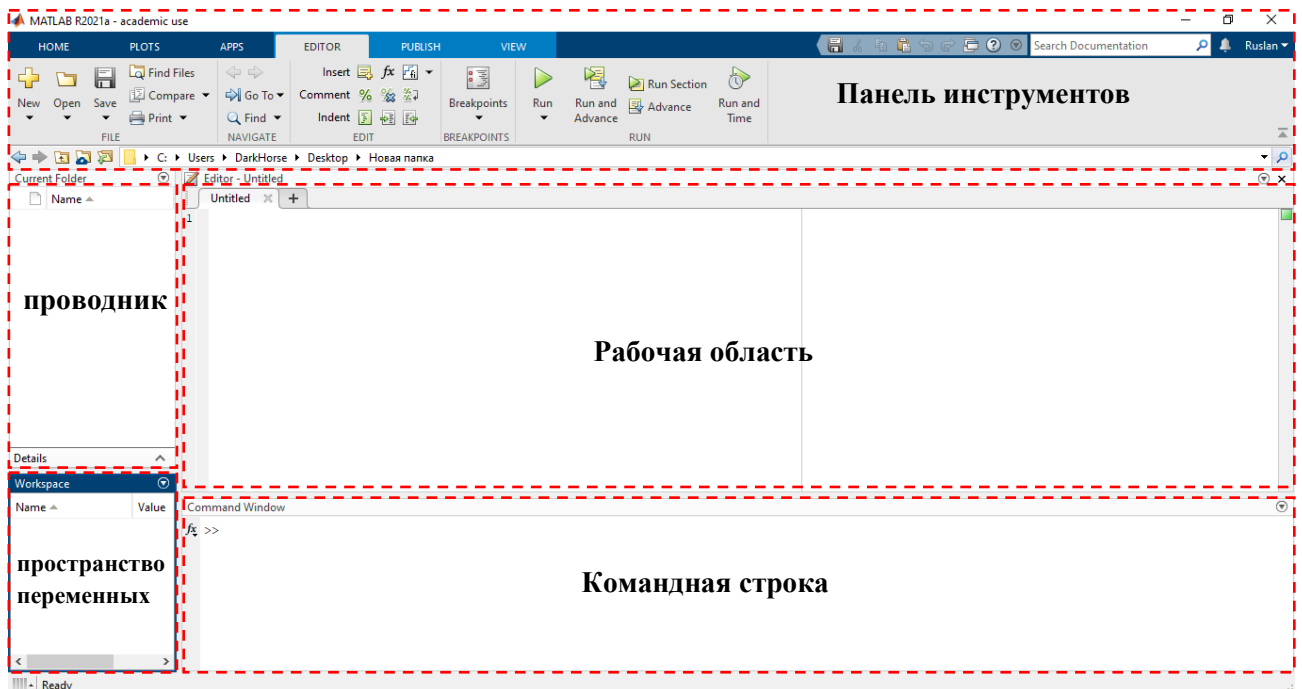


Рисунок 4.3. Интерфейс программы *Matlab*

Интерфейс на рисунке 4.3, можно персонализировать.

Вывод. В результате можно сделать вывод, о том, что, используемый пакет программ *Matlab&Simulink* версии 2021a, полностью удовлетворяет требованиям и рекомендациям ГОСТ Р ИСО 9241 и позволили создать эргономичную исследуемую модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Были описаны математическая модель и принцип работы СГ являющийся основной генерирующей установкой в системе МРЭ, а также преобразовательное устройство из постоянного тока в переменный, использующееся для интеграции АИЭ и ВИЭ в систему.

2. На основе сравнения способов подключения объектов управления к общей шине питания и достоинств параллельной работы генерирующих установок, в работе применялась система с подключением устройств к общей шине переменного тока, для уменьшения количества преобразовательных устройств.

3. На базе методов синхронизации и распределения мощности двух СГ работающих параллельно, были рассмотрены две модификации метода ВСГ, выведены основные уравнения описывающие получение амплитуды и фазы выходного напряжения ТМАИН для последующей интеграции.

4. Для сравнительного анализа двух методов была построена модель системы МРЭ в программе Matlab&Simulink, приведены основные расчеты и настройки модели и ее блоков.

В результате проведения математического моделирования было получено следующее:

1) Интегрирующие составляющие оказывают существенное влияние на скорость синхронизации и уменьшение величины статической ошибки;

2) Введение добавки разности номинальной и рассчитанной частоты выходного напряжения СГ уменьшает статическую ошибку и увеличивает скорость синхронизации;

3) Основным параметром влияющий на параметры переходного процесса является постоянная времени разгрузки значений регуляторов, при малой постоянной времени процессы удастся снизить колебательность системы, а при больших увеличивается скорость синхронизации.

Результаты работы могут использоваться при выборе структуры и настройке регуляторов объектов МРЭ, в том числе автономных электроэнергетических систем с источниками различной мощности, соизмеримых по величине, но различных по физической природе процесса генерации энергии. Также полученные результаты могут быть полезны в учебном процессе при освоении дисциплин, связанных с электроэнергетическими системами автономных объектов.

В дальнейшем для рассматриваемой системы имеется возможность применения 2-го поколения ВСГ, например, самонастраивающийся ВСГ [30, 42] с использованием нейронных сетей, прогностические управляющие модели [32], кроме этого вместо блока PLL, обладающий рядом недостатков заменяется обобщённым интегратором 2-го порядка, что позволяет получать данные от датчиков более точно [35]. Также возможно расширить представление о процессе предсинхронизации вносящий колоссальное влияние на скорости синхронизации и величину пусковых токов. [43]

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огунлана А.О. Магистерская диссертация. Перспективы применения гибридных установок (на основе возобновляемых источников энергии) в малой энергетике России. [Электронный ресурс] <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/39843/1/TPU395254.pdf> (дата обращения: 16.01.2021)
2. Татьяна Сазонова. Малая распределённая энергетика: новые планы [Электронный ресурс] <https://energy.s-kon.ru/wp-content/uploads/2015/10/7-5.pdf> (дата обращения: 16.01.2021)
3. Михаил Андронов. Президент ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ» [Электронный ресурс] <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki/> (дата обращения: 16.01.2021)
4. ООО «Группа компаний «МКС». Распределённая энергетика. Что это такое? [Электронный ресурс] <https://mks-group.ru/a/raspredelennaya-energetika> (дата обращения: 16.01.2021)
5. НП "ЕВРОСОЛАР Россия". Автономная генерация [Электронный ресурс] http://www.eurosolarussia.org/tehnologicheskie_resheniya/avtonomnaya_generatsiya.php (дата обращения: 24.01.2021)
6. Розанов Ю. К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – 2 -е изд., стер. – М.: МЭИ, 2009. – 632 с.
7. РБК Выпуск №1, 29.01.2020. Ветер, солнце и вода: перспективы «зеленой» энергии в России [Электронный ресурс] <https://plus.rbc.ru/news/5f7227f37a8aa9e8aabd24fc> (дата обращения: 14.01.2021)
8. Некрасов С. А., Зейгарник Ю. А., Шевченко И. С. Альтернативный подход к проблеме энергоснабжения малых поселений. // Журнал «Промышленная Энергетика», 2012 - № 07
9. Power Generation, Application Engineering, Liquid-Cooled Genset Application Manual

10. Clifford Power Systems. Generator Paralleling Compared to a Single Generator [Электронный ресурс] <https://cliffordpower.com/generator-paralleling-compared-to-a-single-generator/> (дата обращения: 12.01.2021)

11. Leslie Fernandez. Paralleling generator systems [Электронный ресурс] <https://www.csemag.com/articles/paralleling-generator-systems/> (дата обращения: 12.01.2021)

12. Судовая электротехника и электроника: учебник / Архангельский Е.Н., Богач В.Г., Вилесов Д.В., Сеньков А.П. / под ред. д-ра техн. наук Д.В. Вилесова. — Л.: Судостроение, 1985. — 312 с.

13. Лавров А. Г. Машины постоянного тока. Синхронные машины. Учебное пособие: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 94 с.

14. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. тех. учебн. заведений. - 3-е изд., перераб.-Л.: Энергия,1978. -832с.

15. Вольдек А.И., Попов В.В. Машины переменного тока: Учебник для ВУЗов. - СПб.: Питер,2008. -320с.

16. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х томах. Т. 2 / А.В. Иванов-Смоленский. –М.: Издательский дом МЭИ, 2004. – 532 с.

17. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины. Учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 2008. - 195 с.: ил.

18. Силовая электроника. Автономные инверторы. Преобразователи частоты: учебное пособие / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) "ЛЭТИ"; сост. В. А. Павлова. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2020. -72 с.

19. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. Учебное пособие. - М.: Юрайт,2012- 668с

20. Розанов Ю.К. Силовая электроника. Учебник для вузов – М.: Издательство МЭИ, 2018.- 507 с.

21. Розанов Ю. К., Лепанов М.Г. Силовая электроника. Учебник и практикум для вузов М.: Юрайт, 2018 – 207 с.

22. Попков О.З. Основы преобразовательной техники. Учебное пособие - М.: Издательский дом МЭИ, 2007.- 200 с.
23. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский М.: Издательский центр «Академия», 2006.- 272 с.
24. Томашевский Д. Н. Автономные инверторы: учебное пособие: Издательство Уральского университета, 2019. — 120 с.
25. Мезин Е.К. Судовые электрические машины. - Л. Судостроение, 1985. - 320 с.
26. Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. СПб.: Издание Центра подготовки кадров РАО «ЕЭС России», 2001.—388 с
27. Сергиенко Л. И. Электроэнергетические системы морских судов /Л. И., Сергиенко, В. В. Миронов. –М.: Транспорт, 1991. –264 с
28. Guanfeng Zhang, Junyou Yang, Haixin Wang, Jia Cui, "Presynchronous Grid-Connection Strategy of Virtual Synchronous Generator Based on Virtual Impedance", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, Article ID 3690564, 9 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/3690564>
29. Yong-jin Yu, Li-ke Cao & Xingmin Zhao (2018) A novel control strategy of virtual synchronous generator in island micro-grids, *Systems Science & Control Engineering*, 6:3, 136-145, DOI: 10.1080/21642583.2018.1539930
30. Tamrakar U, Shrestha D, Maharjan M, Bhattarai BP, Hansen TM, Tonkoski R. Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions. *Applied Sciences*. 2017; 7(7):654. <https://doi.org/10.3390/app7070654>
31. Chen, Xuhai & Zhang, Yiwang & Dong, Jiqing & Mao, Xingkui & Chen, Jiaqiao & Wen, Buyin & Zhang, Zhe. (2020). A Novel Pre-Synchronization Control for Grid Connection of Virtual Synchronous Generator. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 26. 25-31. 10.5755/j01.eie.26.6.25874.

32. Jin N, Pan C, Li Y, Hu S, Fang J. Model Predictive Control for Virtual Synchronous Generator with Improved Vector Selection and Reconstructed Current. *Energies*. 2020; 13(20):5435. <https://doi.org/10.3390/en13205435>
33. Zhang B, Yan X, Li D, Zhang X, Han J, Xiao X. Stable Operation and Small-Signal Analysis of Multiple Parallel DG Inverters Based on a Virtual Synchronous Generator Scheme. *Energies*. 2018; 11(1):203. <https://doi.org/10.3390/en11010203>
34. Zhong, Qing-Chang & Weiss, George. (2011). Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 58. 1259 - 1267. 10.1109/TIE.2010.2048839.
35. Xin, Li & Chen, Guozhu. (2019). Synchronization Strategy for Virtual Synchronous Generator based Energy Storage System. 2512-2517. 10.1109/IECON.2019.8927372.
36. Yan, Xiangwu & Mohamed, Sara & Li, Dongxue & Gadalla, Abuzaid. (2018). Parallel operation of virtual synchronous generators and synchronous generators in a microgrid. *The Journal of Engineering*. 2019. 10.1049/joe.2018.8644.
37. Hao, Yue & Li, Hua. (2020). Research on VSG Control Strategy of Microgrid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 440. 032087. 10.1088/1755-1315/440/3/032087.
38. J. Wu, F. Zhuo, Z. Wang, H. Yi and K. Yu, "Pre-synchronization method for grid-connection of virtual synchronous generators based micro-grids," 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017, pp. P.1-P.8, doi: 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099309.
39. S. Xiang, S. Li, S. Wu and Z. Li, "Pre-synchronization Control of Grid-connected Three-phase Inverters Based on the Characteristics of Synchronous Generators," 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2020, pp. 1371-1376, doi: 10.1109/ICIEA48937.2020.9248105.
40. Xing, Pengxiang & Jia, Xuanyue & Tian, Chunzheng & Mao, Yubin & Yu, Linlin & Jiang, Xiaoliang. (2019). Pre-synchronization Control Method of Virtual Synchronous Generator with Alterable Inertia. 142-146. 10.1109/PEDG.2019.8807766.

41. M. Zhang, M. Liu, X. Zheng, H. Li, Y. Yu and Z. Li, "Research on Pre-Synchronization Control Strategy for Microgrid VSG Inverter," 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2019, pp. 1587-1592, doi: 10.1109/ICIEA.2019.8834104.

42. Zhou, Zifu & Long, Jun. (2020). An improved grid-connected pre-synchronization method for photovoltaic micro-grid. Journal of Physics: Conference Series. 1549. 052040. 10.1088/1742-6596/1549/5/052040.

43. K. Shi, W. Song, H. Ge, P. Xu, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Transient Analysis of Microgrids With Parallel Synchronous Generators and Virtual Synchronous Generators," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 1, pp. 95-105, March 2020, doi: 10.1109/TEC.2019.2943888.

44. Пустоветов М.Ю., Солтус К.П., Синявский И.В. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 209 с.

45. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник и практикум для среднего профессионального образования / Ю. К. Розанов, М. Г. Лепанов ; под редакцией Ю. К. Розанова. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 206 с.

46. ГОСТ Р 55241.1-2012/ISO/TR 9241-100:2010 Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 100. Введение в стандарты, относящиеся к эргономике программных средств

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг №1:

```
function y = fcn(u,t,sw,u0,t0,tau)
if(sw)
    if (t>=t0+6*tau)
        y=0;
    else
        y = u0*exp(-(t-t0)/tau);
    end
else
    y = u;
end
```

Листинг №2:

```
function y = fcn(u)
while u >= 2*pi
    u = u - 2*pi;
end
y = u;
```

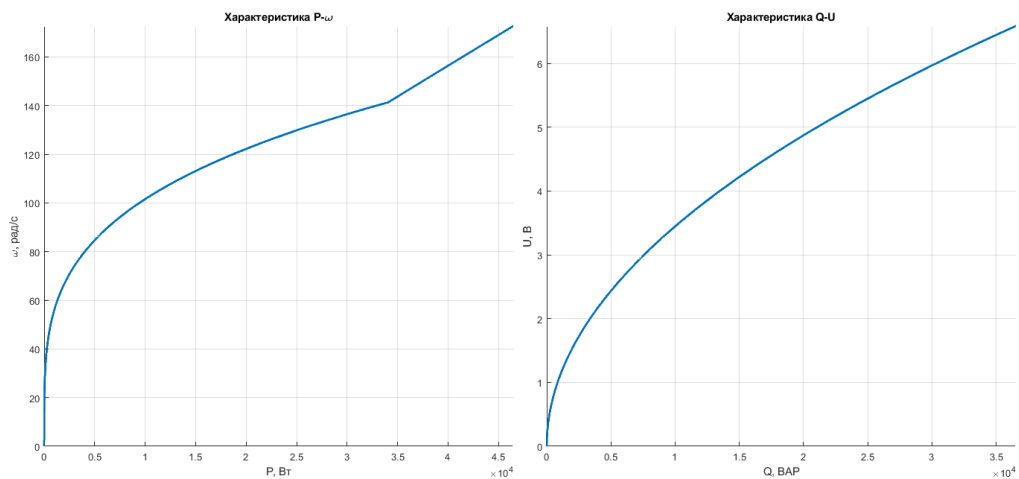


Рисунок А.1 – Зависимость $P-\omega$ и $Q-U$ исследуемого СГ

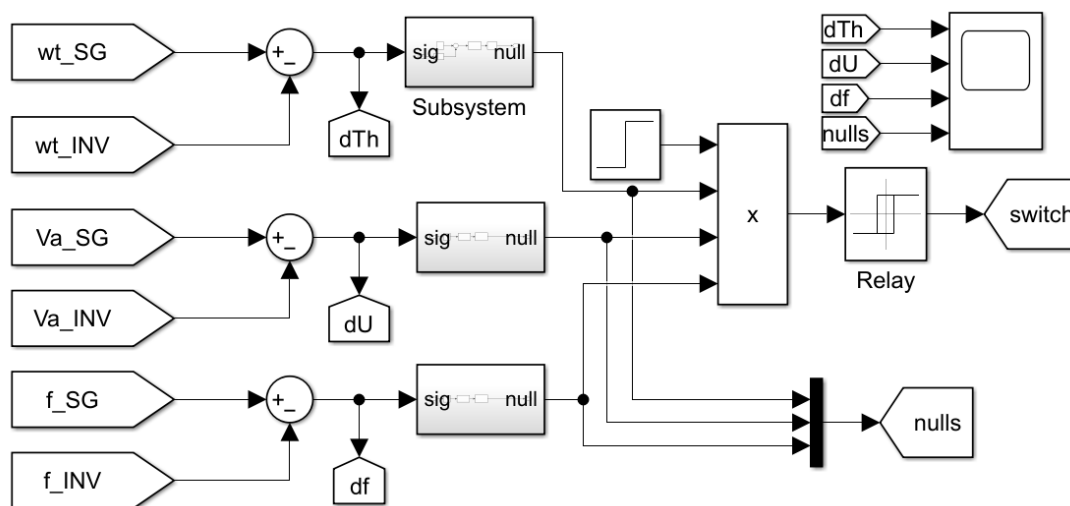


Рисунок А.2 – Подсистема регулирования процессом синхронизации

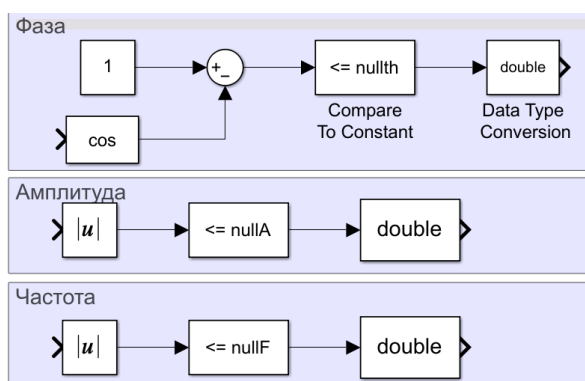


Рисунок А.3 – Структурная схема подсистем отслеживания выполнения условий синхронизации

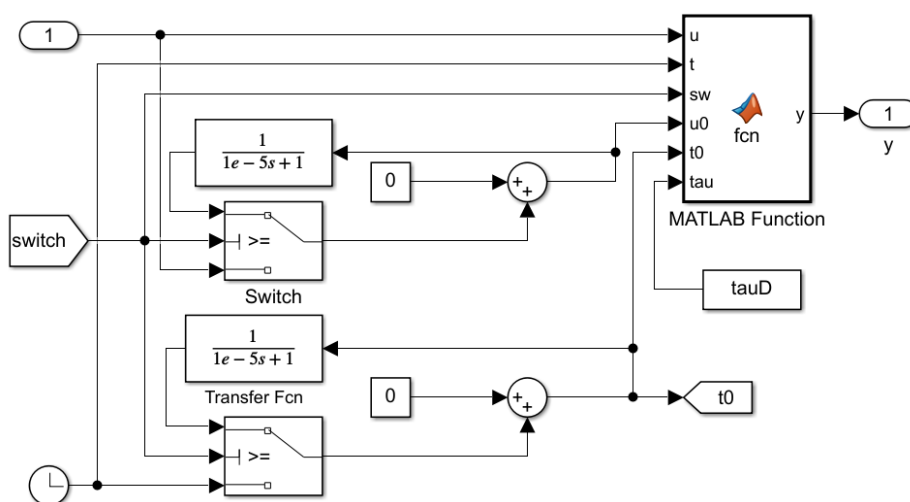


Рисунок А.4 – Структурная схема подсистемы плавной разгрузки входного сигнала до нуля

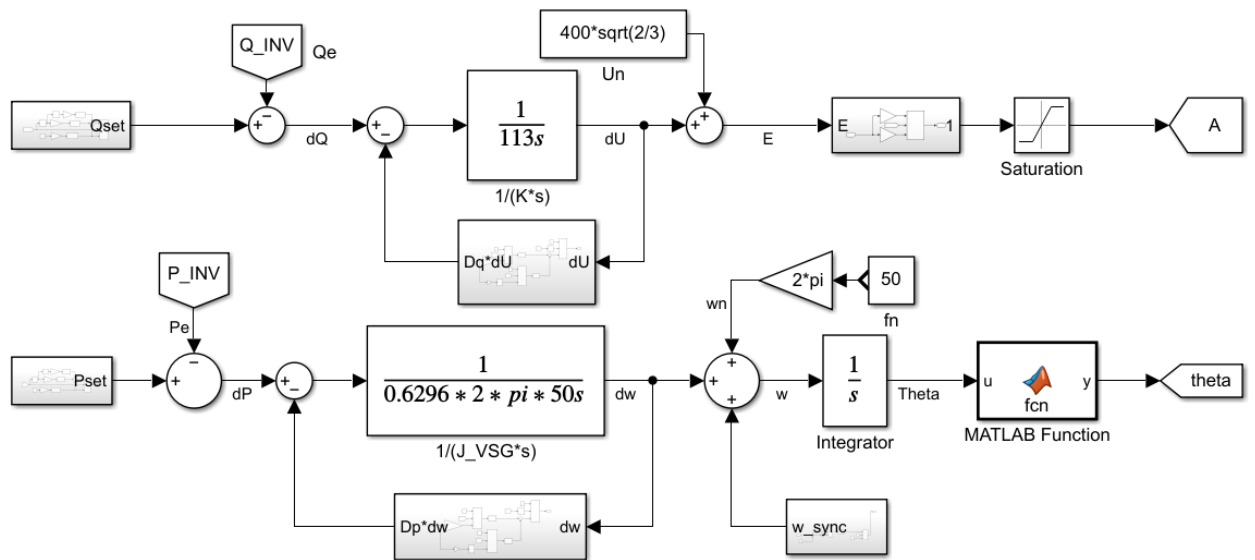


Рисунок А.5 - Подсистема регулирования амплитудой и фазой выходного напряжения ТМАИН

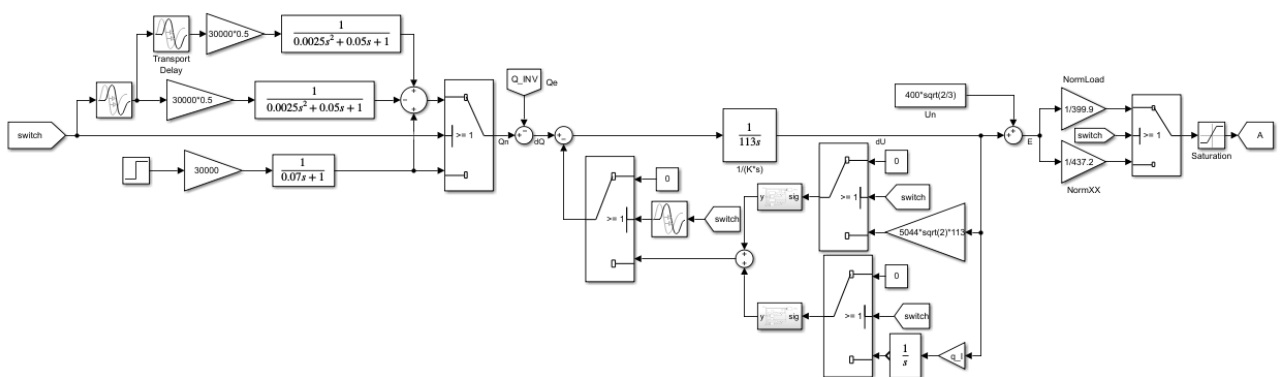


Рисунок А.6 – Структурная схема системы управления амплитудой выходного напряжения инвертора

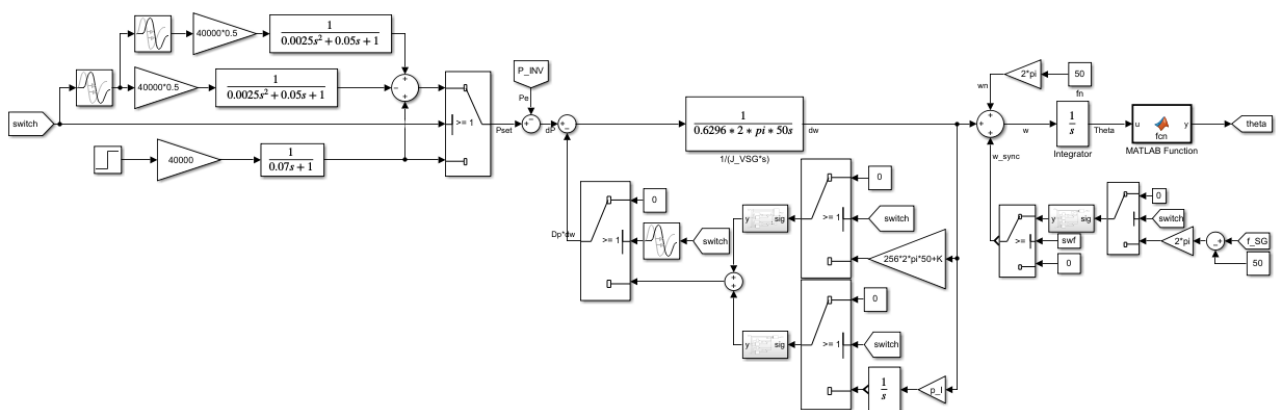


Рисунок А.7 – Структурная схема системы управления фазой выходного напряжения инвертора

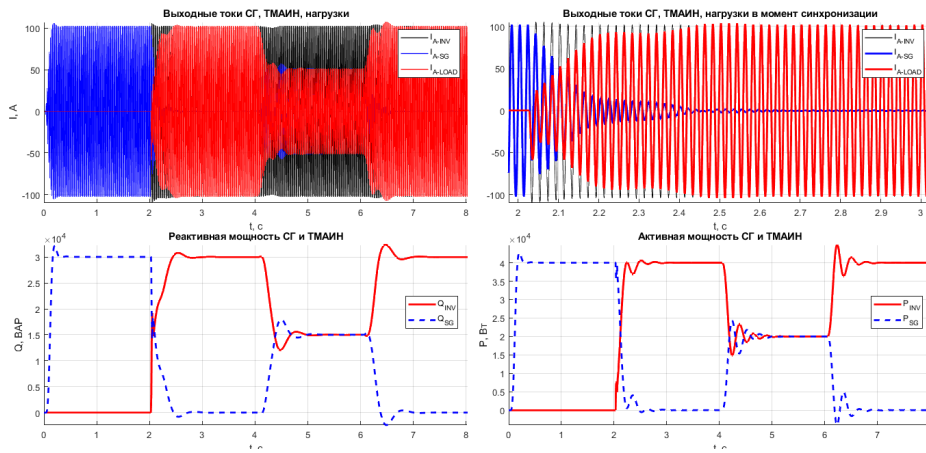


Рисунок А.8 – Графики выходного тока СГ, ТМАИН и нагрузки, активной и реактивной мощностей СГ и ТМАИН при базовом методе

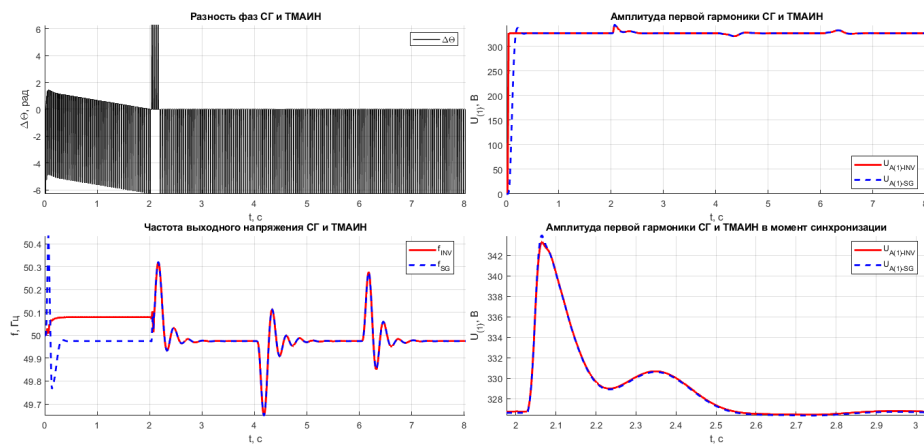


Рисунок А.9 – Графики разности фаз СГ и ТМАИН, частоты и амплитуды выходного напряжения СГ и ТМАИН при базовом методе

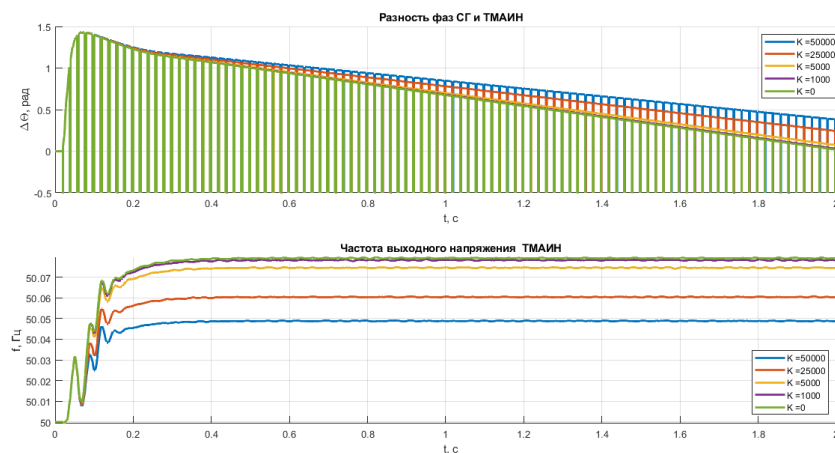


Рисунок А.10 – Графики разности фаз СГ и ТМАИН и частоты выходного напряжения инвертора при изменении K

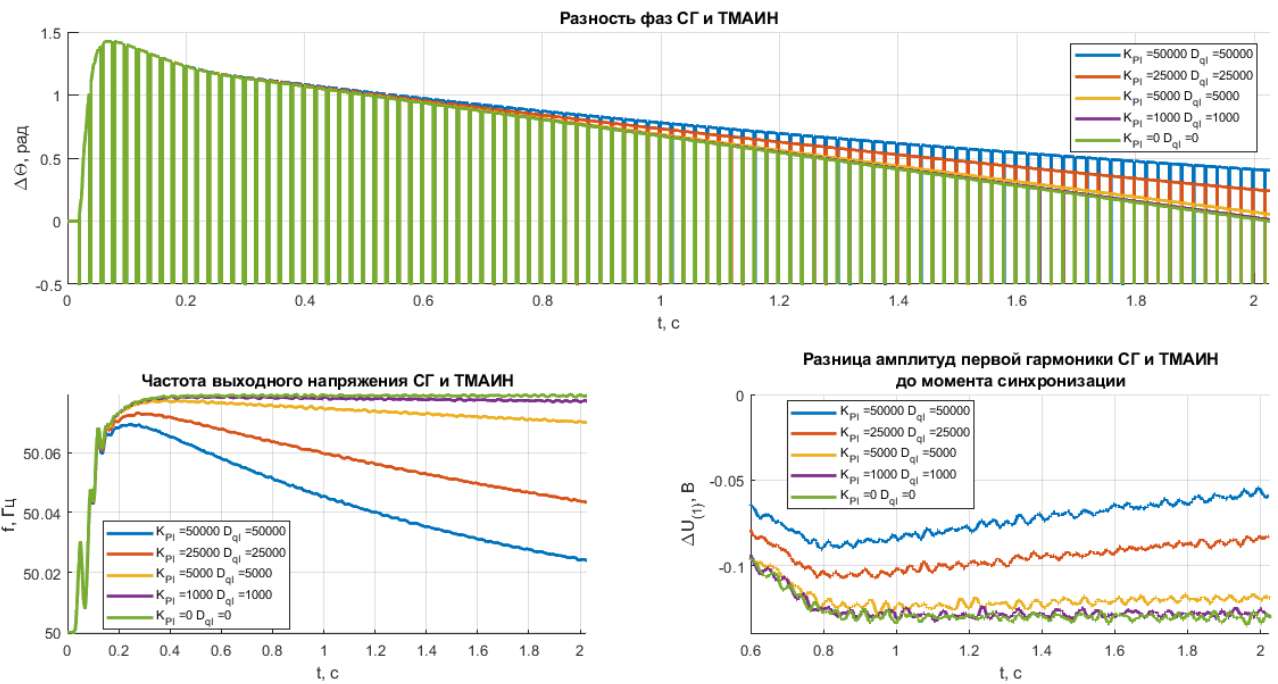


Рисунок А.11 – Графики разности фаз, амплитуд СГ и ТМАИН и частоты выходного напряжения инвертора при изменении величин K_{PI} и D_{qI}

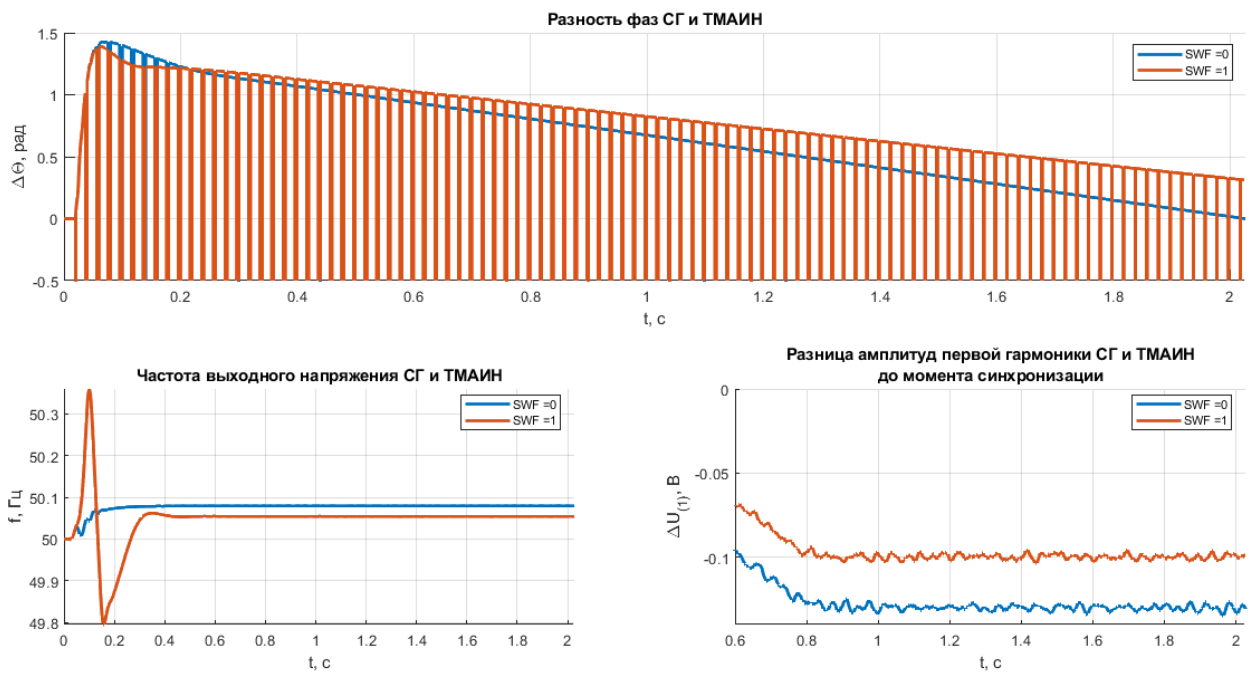


Рисунок А.12 – Графики разности фаз, амплитуд СГ и ТМАИН и частоты выходного напряжения инвертора при добавке частоты

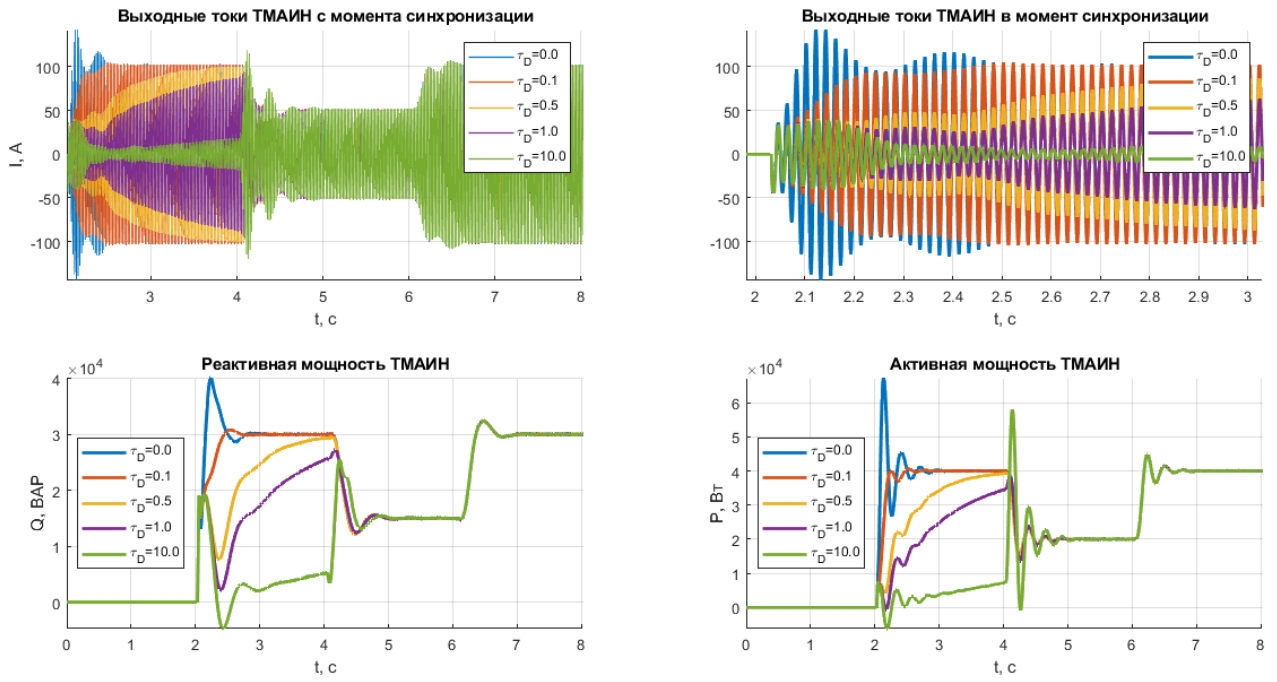


Рисунок А.13 – Графики выходного тока после и в момент синхронизации, активной и реактивной мощностей ТМАИН при изменении τ_D

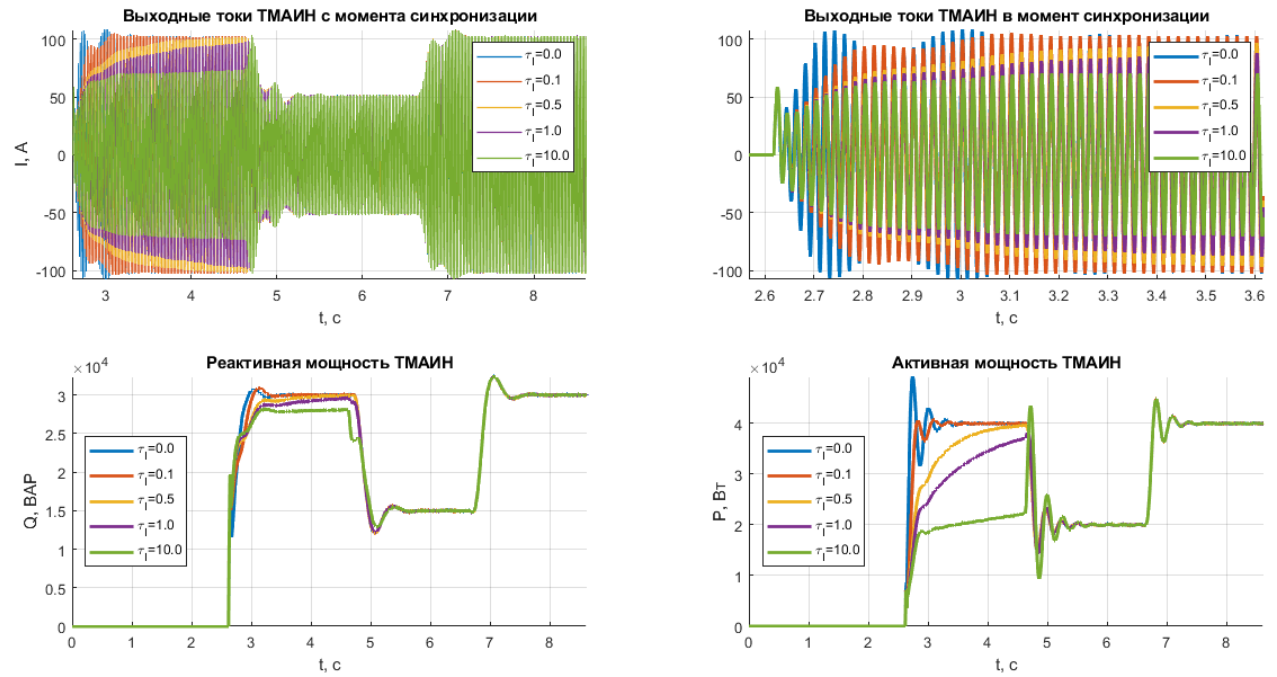


Рисунок А.14 – Графики выходного тока после и в момент синхронизации, активной и реактивной мощностей ТМАИН при изменении τ_I

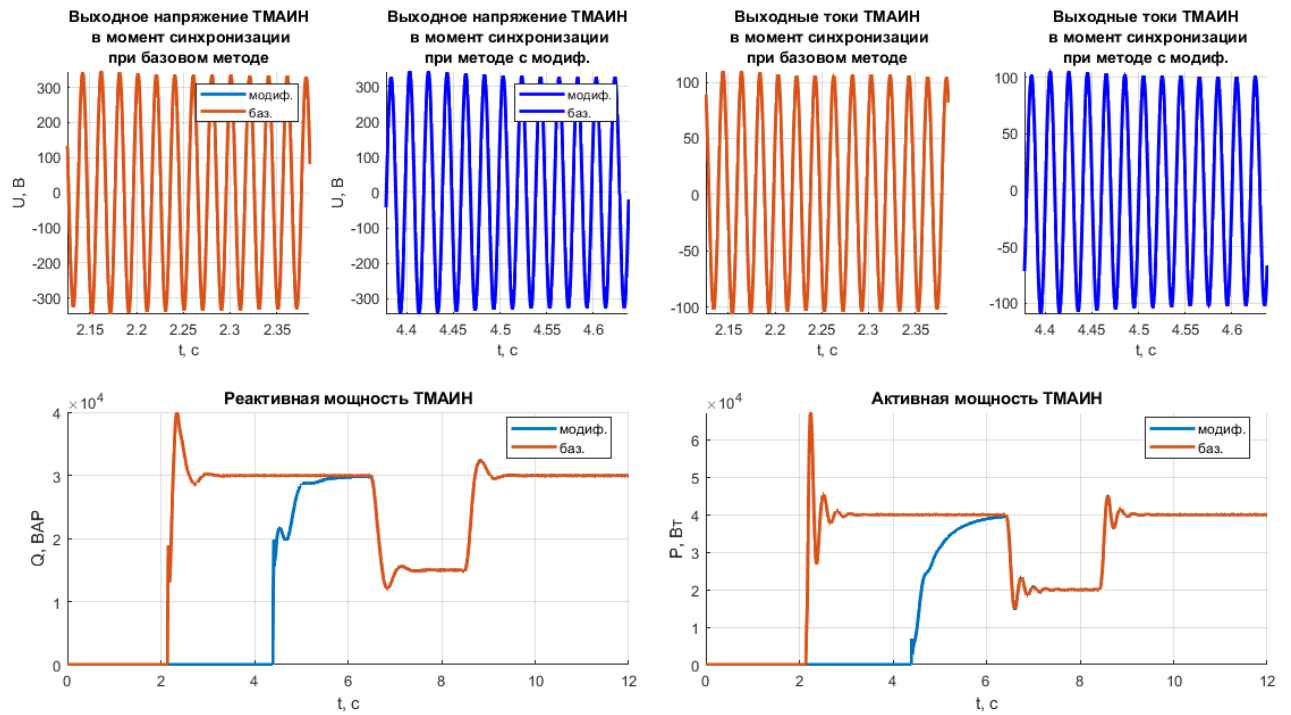


Рисунок А.15 – Графики выходного тока и напряжения в момент синхронизации, активной и реактивной мощностей ТМАИН при базовом и модифицированном методах

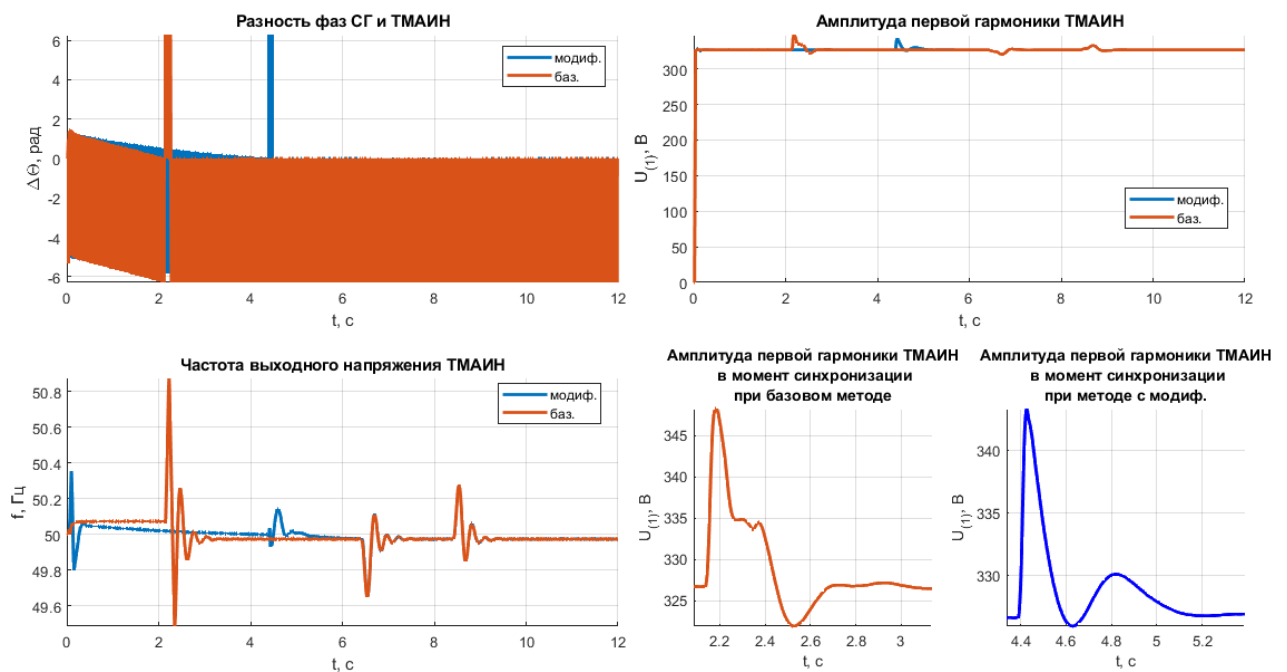


Рисунок А.16 – Графики разности фаз СГ и ТМАИН, частоты и амплитуды выходного напряжения СГ и ТМАИН с акцентом последнего в момент синхронизации при базовом и модифицированных методах