

На правах рукописи



Абуэлсауд Раиф Сиам Сайед Ахмед

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРОГНОЗИРУЮЩИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.09.03 –  
«Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2020 г

Работа выполнена в Инженерной школе энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

**Научный руководитель:** **Гарганеев Александр Георгиевич**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Симонов Борис Ферапонтович,**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

**Ганджа Тарас Викторович,**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Защита состоится «27» января 2021 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.12 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул.Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
ДС.ТПУ.12, к.т.н., доцент



М.В. Андреев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Несмотря на интенсивное развитие средств силовой электроники, устройств фотовольтаики и современных химических источников, многочисленные территории многих стран, включая Россию, испытывают большой дефицит в электроэнергии. Например, в настоящее время новые города и сельские регионы в Египте являются типичными примерами энергоснабжения удалённых потребителей, которое может осуществляться только от автономных источников энергии. Использование более экономичных и экологически чистых альтернативных систем генерации энергии объясняется следующими причинами:

- (а) из-за постепенного сокращения количества ископаемого топлива и увеличение спроса на электроэнергию как развитых, так и развивающихся стран;
- (б) существующие централизованные электростанции сталкиваются с проблемой высокой стоимости расширения, особенно в развивающихся странах;
- (с) высокая стоимость топлива во многих отдалённых районах.

Чистые, модульные и возобновляемые источники энергии, объединенные в микросети (microgrid) на уровне сообществ, могут стать экономически эффективным способом обеспечить доступ к надежному и недорогому энергоснабжению тем, кто сейчас живет без электричества, причем такие системы электроснабжения (СЭС) могут работать как автономно, так и совместно с основными электрическими сетями.

Автономные СЭС, как правило, работают в условиях ограничения мощности входного источника, а также «непредсказуемости» нагрузок, что определяет их случайный характер, как по величине активной мощности, так и по характеру – нагрузки могут быть одно- или трёхфазными, сбалансированными (симметричными) или несбалансированными, линейными или нелинейными. Несимметрия и гармонические искажения напряжения могут вызывать серьёзные проблемы с оборудованием, такие как вибрация, перенапряжение, перегрев и т. д.

Основными силовыми электронными устройствами в СЭС являются инверторы, которые используются в качестве интерфейсов для подключения источника питания к нагрузкам переменного тока. Основной функцией инверторов является передача и управление мощностью. Кроме того, путем правильного управления инверторами могут быть решены проблемы дисбаланса напряжений, а также компенсации высших гармоник.

Значительный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований систем электроснабжения, в том числе автономных, на основе полупроводниковых преобразовательных устройств внесли как российские, так и зарубежные ученые: С.А. Харитонов, Г.С. Зиновьев, Г.С. Мыщык, А.А. Ефимов, И.А. Баховцев, Шрейнер Р.Т., Г.В. Грабовецкий, Б.В. Лукутин, И.И. Лукин, Б.П. Соустин, В.Е. Тонкаль, В.А. Цишевский, Т.А. Lipo, Bimal K. Bose, Marvin J. Fisher, Kazmierkowski M., R. Zhang, M. E. Fraser, C. D. Manning, K. Zhang, Y. Kang, J. Xiong, и др.

При большой распространенности полупроводниковых СЭС в энергетике промышленных и автономных объектов применение новых схмотехнических и алгоритмических решений, позволяющих повысить качество их работы, является актуальной задачей.

**Объектом** исследования является система автономного электроснабжения на базе инвертора напряжения.

**Предметом** исследования являются режимы и алгоритмы управления полупроводниковой СЭС.

**Целью диссертационной работы** является обеспечение требуемого качества выходного напряжения автономной системы электроснабжения на основе алгоритмов прогнозирующего управления.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить и проанализировать особенности применения и построения автономных полупроводниковых СЭС при работе на различные виды нагрузок и в составе автономных сетей, в частности, microgrid.

2. Провести исследования по особенностям применения метода прогнозирующего управления в структуре полупроводниковой СЭС и разработать алгоритмы управления СЭС при ее работе на активную, реактивную и нелинейную нагрузки как симметричного, так и несимметричного (несбалансированного) типа в соответствии с показателями качества управления.

3. Провести сравнительные исследования СЭС с прогнозирующим управлением с СЭС, функционирующих на основе алгоритмов пропорционально-интегрально- дифференциального (ПИД) и пропорционально-резонансного (ПР)-регуляторов.

4. Разработать алгоритмы аварийной защиты полупроводниковой СЭС с прогнозирующим управлением по току нагрузки.

5. Для подтверждения теоретических исследований провести экспериментальную проверку алгоритмов прогнозирующего управления.

**Методы исследований.** В диссертационной работе использовались методы теоретических основ электротехники, математические методы с применением интегро-дифференциальных и матричных уравнений, имитационное моделирование с применением пакета *Matlab Simulink*, а также экспериментальные исследования. Для анализа устойчивости СЭС и синтеза регуляторов применялся метод корневого годографа.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Предложена математическая модель СЭС для управления напряжением нагрузки автономного инвертора напряжения (АИН) с нулевым проводом (четвёртой стойкой) на основе алгоритма с прогнозирующим управлением.

2. Предложены математические модели СЭС на базе АИН с нулевым проводом (четвертой стойкой) и выходным фильтром при реализации алгоритма ее управления на основе ПИД-регулятора, ПР-регулятора, скалярной ШИМ и при компенсации взаимной связи между осями D и Q в системе координат DQ0.

3. Разработана имитационная модель СЭС при управлении автономным инвертором с нулевым проводом (четвёртой стойкой), способная реализовать три метода управления СЭС: с ПР-регулятором, ПИД-регулятором и с прогнозирующим управлением.

4. Разработаны алгоритмы прогнозирующего управления выходным напряжением АИН с нулевым проводом (четвертой стойкой), позволяющие получить высокое качество выходного напряжения СЭС с функцией эффективной защиты по току.

5. Произведена оценка чувствительности управления и оценки влияния изменения нагрузки и параметров LC-фильтра на характеристики управления СЭС при УПМ- и ПИД-алгоритмах.

#### **Практическая ценность работы:**

1. Разработанная имитационная модель полупроводниковой СЭС с нулевым проводом (четвертой стойкой) и прогнозирующим управлением позволяет исследовать и оптимизировать ее статические и динамические режимы в процессе проектирования.

2. Разработанный на основе прогнозирующего управления алгоритм защиты от короткого замыкания позволяет не только эффективно защищать автономный инвертор СЭС от аварийных режимов работы, но и формировать заданное значение выходного тока в аварийных режимах.

3. Полученные графические зависимости частоты коммутации ключей автономного инвертора СЭС с прогнозирующим управлением от коэффициента мощности и величины нагрузки позволяют проектировщику производить выбор частоты коммутации ключей инвертора с оценкой динамических потерь.

4. Результаты исследования чувствительности СЭС с прогнозирующим управлением к изменениям параметров выходного фильтра дают основу для его проектирования.

#### **На защиту выносятся:**

1. Имитационная модель СЭС при управлении автономным инвертором с нулевым проводом (четвёртой стойкой), способная реализовать три метода управления: с ПР-регулятором, ПИД-регулятором и с прогнозирующей моделью (УПМ).

2. Алгоритм прогнозирующего управления выходным напряжением АИН с нулевым проводом (четвертой стойкой), минимизирующий ошибку между выходным и опорным напряжениями.

3. Алгоритм аварийной защиты полупроводниковой СЭС с прогнозирующим управлением по току нагрузки.

4. Результаты анализа чувствительности управления и оценки влияния изменения нагрузки и параметров LC-фильтра на характеристики управления СЭС при УПМ- и ПИД-алгоритмах.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования.** Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием научно-обоснованных методов исследований, сходимостью экспериментальных и

расчетных данных. Результаты, полученные при проведении экспериментальных испытаний, подтверждают справедливость научных положений и применимость предложенных методов, технических решений и выводов.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. 4th International Conference on Frontiers of Educational Technologies - ICFET '18, 2018, Proceedings, г. Москва.
2. The first International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2019, Proceedings, г. Москва.
3. 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2019, – Proceedings, г. Новосибирск.

**Публикации.** Результаты выполненных исследований отражены в 12 публикациях, в том числе 5-х статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 7 статьях, индексируемых в наукометрических базах SCOPUS и WoS.

#### **Внедрение результатов исследований.**

Результаты диссертационной работы использованы в Институте силовой электроники Новосибирского государственного технического университета для проектирования автономных СЭС, а также в учебном процессе инженерной школы энергетики НИ ТПУ при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 и магистров по направлению 13.04.02 (Электроэнергетика и электротехника) по профилям «Электрооборудование летательных аппаратов» и «Электротехнические комплексы автономных объектов».

**Личный вклад автора.** Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в теоретических исследованиях, разработке, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных данных, написании текстов статей и докладов. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: математические, имитационные модели и алгоритм прогнозирующего управления автономным инвертором с дополнительной четвертой стойкой, включая аварийные режимы, анализ электромагнитных процессов и устойчивости в СЭС, оценка качества электроэнергии в СЭС.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, определены объект и предмет исследования, сформирована цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён обзор существующих конфигураций микрогридов и СЭС, а также топологий трёхфазных инверторов напряжения в СЭС, показаны их преимущества и недостатки. Автономный инвертор напряжения (АИН) с четвёртой стойкой выбран из-за высокой способности выдерживать несбалансированные нагрузки в автономной СЭС (рис.1). В этой топологии нейтральный про-

вод подключён к искусственно созданной средней точке в четвертой стойке (рис. 1). Конденсаторы шины постоянного тока используются только для устранения пульсации на шине постоянного тока (средняя точка шины постоянного тока не используется, поэтому в этом преобразователе отсутствует проблема дисбаланса напряжения конденсатора). Таким образом, используемые конденсаторы шины постоянного тока относительно малы. Поэтому требование уровня напряжения шины постоянного тока становится ниже, а потери на переключение уменьшаются, что приводит к повышению эффективности. Наличие двух дополнительных транзисторных ключей приводит к усложнению алгоритма управления, что в принципе достижимо с учётом современного уровня развития микропроцессорной техники.

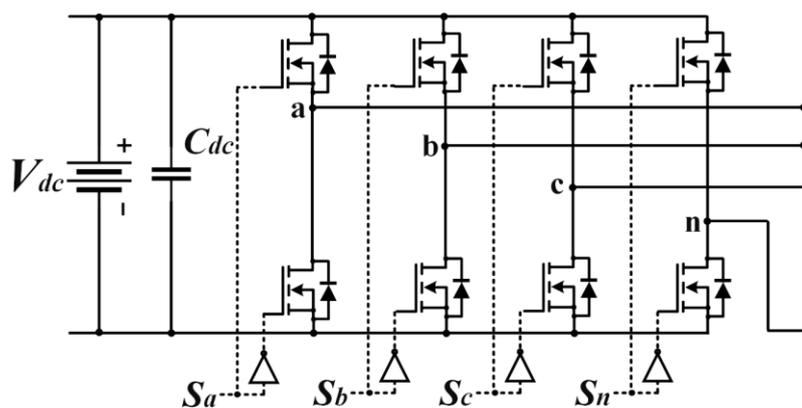


Рис. 1. Топология трёхфазного АИН с четвертой стойкой

Проведен обзорный анализ методов управления техническими системами, способных найти применение в автономных полупроводниковых СЭС. Сформулированы задачи диссертационного исследования. Сделан вывод о перспективности создания полупроводниковых автономных СЭС в составе Micro Grid на основе прогнозирующего управления (в англ. терминологии - Model Predictive Control, MPC - «модель прогнозирующего управления», «управление с прогнозирующей моделью - УПМ) из-за его способности справляться с дискретной природой электронных устройств, а также с её простой концепцией и реализацией. Способ управления с прогнозирующей моделью (УПМ) использует модель системы для прогнозирования будущего поведения контролируемых параметров. В случае СЭС – это выходное напряжение (ток) АИН. УПМ использует эту информацию для получения оптимального действия управления в зависимости от predetermined целевой функции. УПМ может управлять инвертором без стадии модуляции и имеет быструю переходную реакцию. УПМ не нуждается в настройке параметров. Более того, производительность этого метода управления можно гибко регулировать, изменяя его цель и ограничения в алгоритме управления, причём технически реализация данного метода может дать положительный эффект лишь при адекватном техническом решении управляющего силового звена, а именно, автономного инвертора напряжения. Таким техническим решением может быть автономный инвертор напряжения с четвертой стойкой.

Во второй главе представлена схема УПМ для управления напряжением нагрузки АИН с четвёртой стойкой в автономной СЭС (рис. 2). LC-фильтр используется для фильтрации высших гармоник. Индуктор нейтрали  $L_n$  используется для смягчения колебаний тока нейтрали. Возобновляемые источники питания и их преобразователи в СЭС могут быть представлены источником питания постоянного тока  $V_{dc}$  с внутренним сопротивлением.

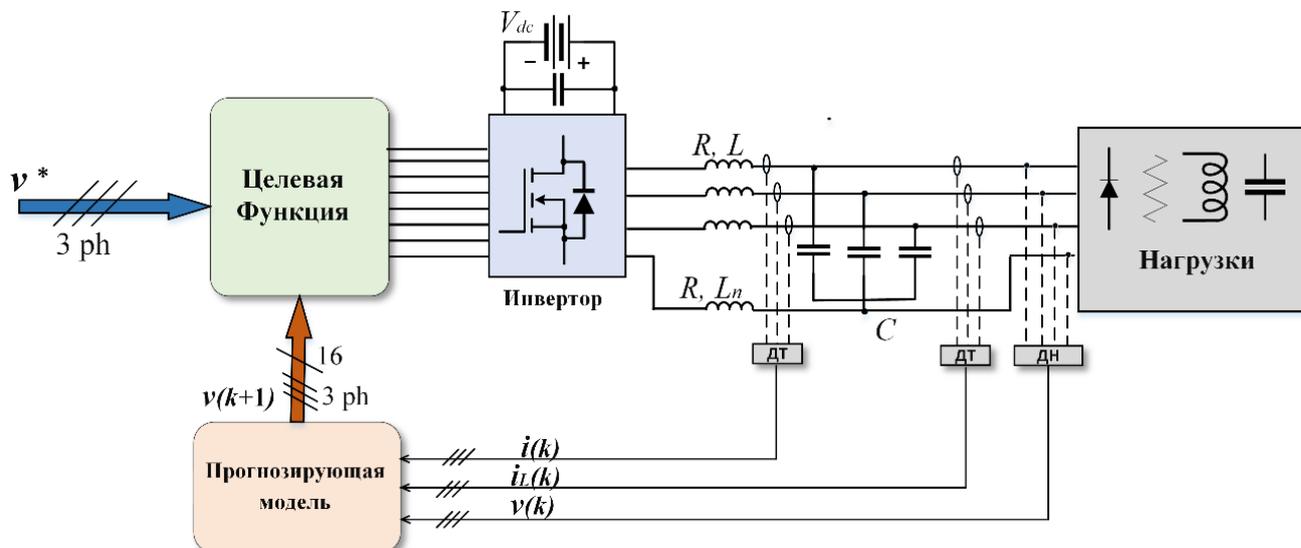


Рис. 2. Топологическая схема СЭС при управлении АИН на основе прогнозирующей модели

Таблица 1 Состояния переключения АИН

	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S_n$	$v_{an}$	$v_{an}$	$v_{an}$
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	$V_{dc}$	0	0
3	0	1	0	0	0	$V_{dc}$	0
4	1	1	0	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$	0
5	0	0	1	0	0	0	$V_{dc}$
6	1	0	1	0	$V_{dc}$	0	$V_{dc}$
7	0	1	1	0	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$
8	1	1	1	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$	$V_{dc}$
9	0	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
10	1	0	0	1	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
11	0	1	0	1	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
12	1	1	0	1	0	0	$-V_{dc}$
13	0	0	1	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
14	1	0	1	1	0	$-V_{dc}$	0
15	0	1	1	1	$-V_{dc}$	0	0
16	1	1	1	1	0	0	0

АИН с четвёртой стойкой имеет 16 состояний переключения. Каждое состояние переключения обеспечивает определённое выходное фазное напряжение, как

показано в таблице 1.  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  и  $S_n$  являются управляющими сигналами переключателей (рис. 1):

$$S_j = \begin{cases} 1, & \text{верхний ключ закрыт и нежный ключ открыт} \\ 0, & \text{верхний ключ открыт и нежный ключ закрыт} \end{cases} \quad (1)$$

где  $j = a, b, c, n$ .

Прогнозирующая модель является дискретной моделью системы, которая используется для прогнозирования вектора напряжения нагрузки для одношагового времени прогнозирования  $(k + 1)$  по измеренному напряжению и току в момент времени  $k$ . Прогнозирующая модель системы выражена в форме пространства состояний как:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}(k+1) \\ \mathbf{i}(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{i}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{J} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{i}_L(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $k$  - дискретный момент выборки,  $\mathbf{J}$  и  $\mathbf{Q}$  - матрицы параметров системы,  $\mathbf{v}(k)$ ,  $\mathbf{i}(k)$  и  $\mathbf{i}_L(k)$  – векторы напряжения, тока нагрузки и выходного тока инвертора соответственно в момент времени  $k$ .  $\mathbf{v}(k+1)$  и  $\mathbf{i}(k+1)$  - векторы напряжения нагрузки и выходного тока инвертора в следующий момент времени  $(k + 1)$ .  $\mathbf{e}$  – вектор выходного напряжения инвертора.

Из модели дискретной системы в (2) прогнозируемый вектор напряжения нагрузки может быть получен для каждого состояния переключения. Для каждого состояния переключения  $\mathbf{e}$  имеет новое значение в соответствии с таблицей 1, следовательно, прогнозируемое напряжение нагрузки имеет разные значения для 16 состояний переключений.

Алгоритм УПМ может быть кратко описан в следующих шагах:

- 1) Алгоритм УПМ использует дискретную модель системы для прогнозирования вектора напряжения нагрузки для одношагового времени прогнозирования  $(k + 1)$  по измеренному напряжению и току в момент времени  $k$ ;
- 2) Напряжение нагрузки прогнозируется для каждого состояния переключения;
- 3) Целевая функция ( $g$ ) вычисляется для каждого состояния переключения, чтобы выбрать наилучшее состояние переключения, которое минимизирует ошибку между опорным напряжением и прогнозируемым напряжением;
- 4) Выбранное состояние переключения применяется к переключателям.

Такой алгоритм выполняется для каждого времени выборки, как показано на рис. 3.

Целевая функция  $g$  может быть определена следующим образом:

$$g = (v_a^* - v_a(k+1))^2 + (v_b^* - v_b(k+1))^2 + (v_c^* - v_c(k+1))^2 \quad (3)$$

где  $v_a^*$ ,  $v_b^*$ ,  $v_c^*$  являются опорной фазой напряжения.  $v_a(k+1)$ ,  $v_b(k+1)$ ,  $v_c(k+1)$  - это прогнозируемые напряжения нагрузки, которые выводятся из модели дискретной системы. Целевая функция - это ошибка между опорным и прогнози-

руемым значением напряжения нагрузки. УПМ будет работать в координатах АВС, чтобы независимо управлять напряжением каждой фазы нагрузки.

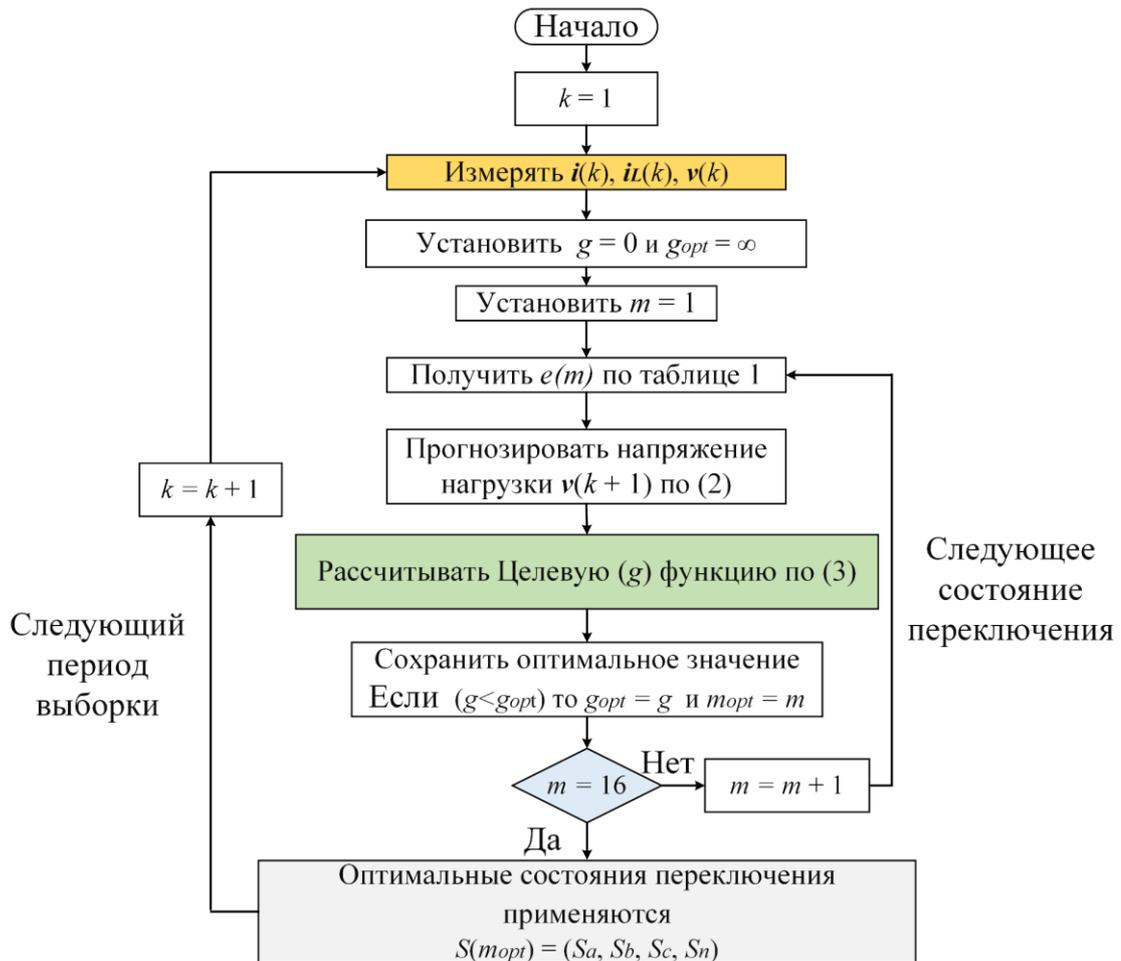


Рис. 3. Блок-схема алгоритма прогнозирующего управления АИН

УПМ имеет некоторые недостатки, такие как переменная частота коммутации, которая влияет на спектр гармоник нагрузки и конструкцию фильтра, зависимость его производительности от модели системы, а также большое количество вычислений и расчётов, необходимых для реализации алгоритма, который требует высокоскоростных микропроцессоров. С другой стороны, линейные контроллеры управляют силовыми преобразователями с постоянной частотой переключения с помощью модуляторов. Поэтому общую производительность УПМ необходимо оценивать путём проведения сравнительного исследования с линейным контроллером на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В этой работе ПИД-регулятор выбран в качестве классического метода управления для этого сравнительного исследования, потому что этот метод управления широко используется в приложениях силовой электроники из-за простоты в его схеме управления и проектирования.

Также в главе представлена схема СЭС при управлении АИН на основе ПИД-регуляторов в среде DQ0, как показано на рис. 4 и произведено проектирование параметров ПИД-регуляторов. Стратегия управления определяется наличием внешнего контура напряжения и внутреннего контура тока. Контур напряже-

ния используется для регулирования выходных напряжений, а внутренний контур тока используется для обеспечения точной команды для ШИМ. В контуре управления напряжением сигнал ошибки между опорными напряжениями ( $v_q^*$ ,  $v_d^*$ , и  $v_0^*$ ) и измеренные напряжения нагрузки ( $v_q$ ,  $v_d$ , и  $v_0$ ) обеспечивается ПИД-регулятором. Выходной сигнал контура управления напряжением рассматривается как опорный сигнал для контура управления током и вычитается из измеренного выходного тока инвертора ( $i_d$ ,  $i_q$ , and  $i_0$ ), а ошибка между ними поступает на ПИД-регулятор. Чтобы компенсировать взаимную связь между осями D и Q в среде DQ0 и для повышения надёжности системы, используются контуры прямой невзаимной связи для напряжения и тока. Выходной сигнал контура управления током ( $e_d$ ,  $e_q$ , and  $e_0$ ) передаётся в систему координат ABC и подаётся на скалярную ШИМ.

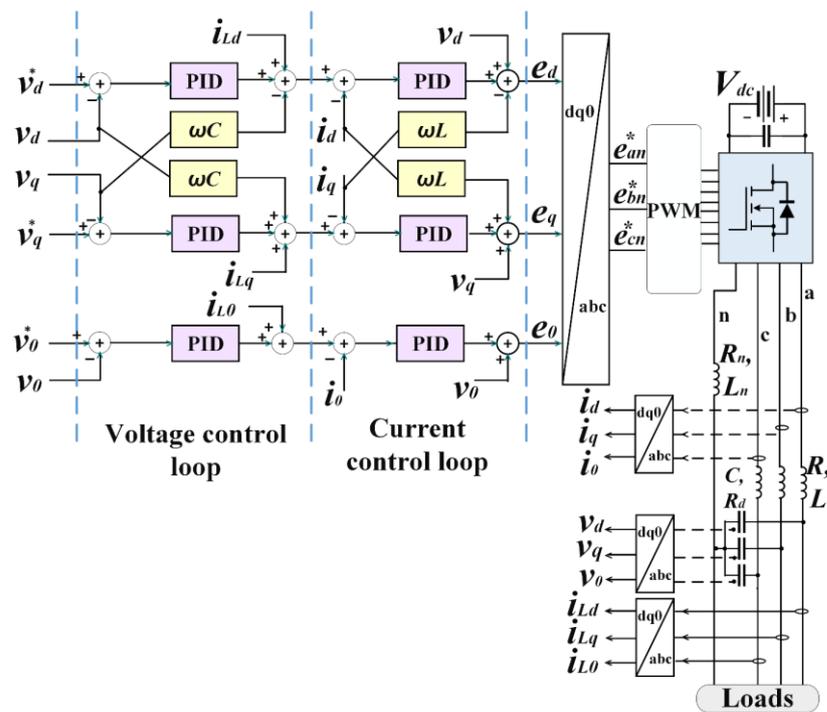


Рис. 4. Топологическая схема СЭС при управлении АИН на основе ПИД-регуляторов

**В третьей главе** произведён сравнительный анализ производительности ПИД и УПМ в среде MATLAB/SIMULINK. Проводятся три главных анализа:

- 1) в статическом режиме;
- 2) в динамическом режиме;
- 3) чувствительность управления к изменению нагрузки и параметров LC-фильтра.

В статическом режиме выполняются пять тематических исследований, чтобы увидеть разницу между УПМ и ПИД. Трёхфазные симметричные и несимметричные нагрузки могут быть резистивными или индуктивными, и подключаются к инвертору. Кроме того, однофазные нелинейные нагрузки используются для отображения характеристик систем управления в нелинейных условиях. Топология этих нагрузок представлена на рисунке 5.

Сигналы напряжений нагрузки, токов нагрузки и напряжений звена постоянного тока для АИН при условиях нагрузки показаны на рисунке 6. Для оценки разницы между показателями УПМ и ПИД, частота коммутации ( $f_s$ ), коэффициент нелинейных искажений (КНИ), индекс дисбаланса напряжения (ИДН) и пульсация напряжения ( $\% \Delta V_c$ ) в звене постоянного тока для обоих УПМ и ПИД во всех случаях нагрузок представлены в таблице 2.

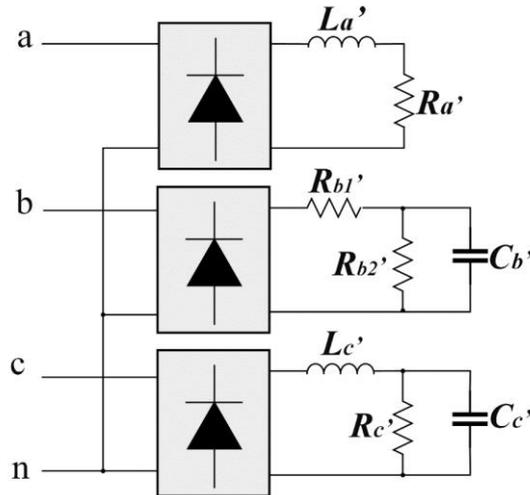


Рис. 5. Топология однофазных нагрузок СЭС, используемых в моделировании.

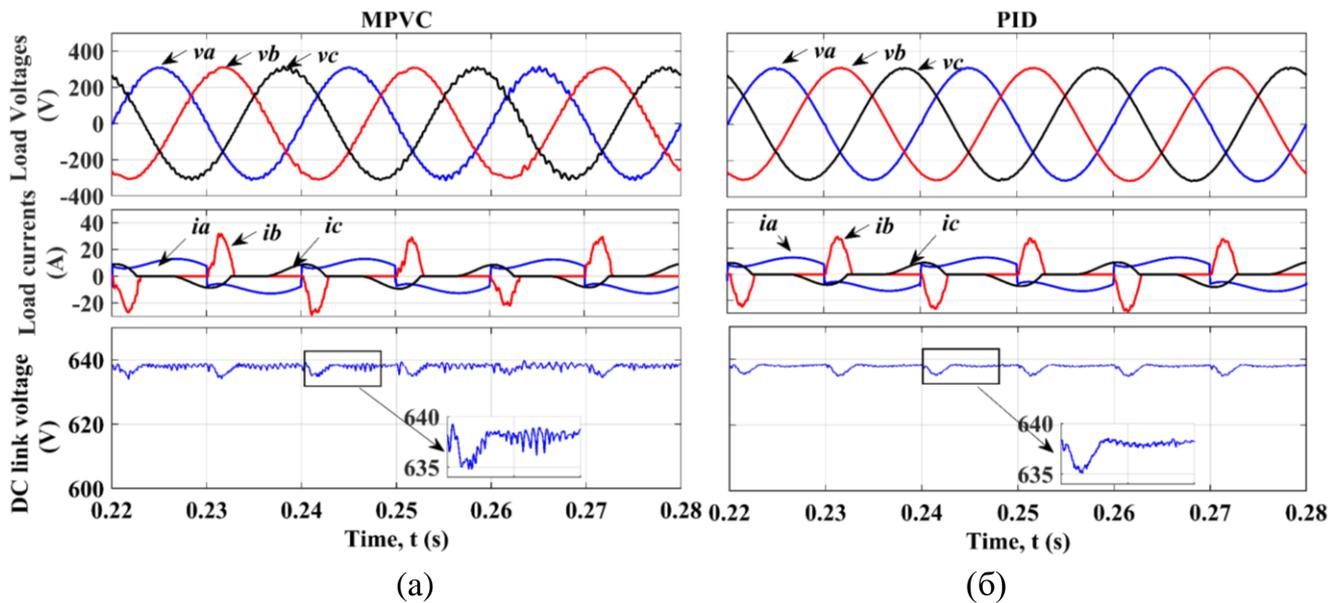


Рис. 6. Результаты моделирования СЭС (несбалансированные нелинейные нагрузки) при (а) УПМ и (б) ПИД

Таблица 2 - оценки разницы между показателями УПМ и ПИД

Опыт	УПМ						ПИД					
	$f_s$ (Hz)	$\% \Delta V_{dc}$	%КНИ			% ИДН	$f_s$ (Hz)	$\% \Delta V_{dc}$	%THD			% ИДН
			$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$				$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	
1	3754	0.3248	1.01	1.01	1.01	0.2248	4000	0.2004	1.29	1.3	1.26	0.1815
2	2071	0.6160	3.2	3.2	3.2	0.9592	4000	0.1971	1.4	1.4	1.4	0.1524
3	3968	1.7164	0.76	0.96	0.96	0.2007	4000	1.5411	1.45	1.47	1.44	0.1218
4	2177	1.6084	3.74	3.36	3.74	1.8977	4000	1.0109	1.49	1.48	1.45	0.3219
5	2436	0.8668	2.13	2.06	2.35	0.9426	4000	0.7095	1.62	1.5	1.54	0.0575

Результаты показывают, что УПМ, как и ПИД, способно регулировать напряжение нагрузки с низким гармоническим искажением для сбалансированной и несбалансированной резистивной нагрузки. По сравнению с ПИД-регулированием УПМ обеспечивает более низкое гармоническое искажение в условиях активной нагрузки; общее гармоническое искажение (% КНИ) ниже 1%. % КНИ при УПМ выше в случае индуктивных и нелинейных нагрузок, но не более 4%. Это может быть связано с задержкой поведения индуктивного тока, что снижает точность прогнозирования напряжения нагрузки.

УПМ обеспечивает более высокую пульсацию напряжения ( $\% \Delta V_{dc}$ ) в звене постоянного тока АИН по сравнению с ПИД. Значение ИДН поддерживается ниже 2% во всех тестируемых условиях для обеих стратегий управления. Более того, ИДН ниже при УПМ, чем при ПИД, во всех условиях нагрузки, за исключением случая нелинейной нагрузки.

Однако УПМ работает с переменной частотой коммутации ( $f_s$ ). Изменение частоты коммутации невелико. Диапазон частоты коммутации составляет около 3000 Гц.

В динамическом режиме применяется ступенчатое изменение от холостого хода до сбалансированной резистивной нагрузки ( $R_a = R_b = R_c = 10 \Omega$ ) в 0,2 секунды. Напряжения нагрузки и токи для УПМ и ПИД изображены на рисунке 7, где показан увеличенный вид измеренного напряжения с его опорной величиной при этом изменении. Результаты показывают, что УПМ обеспечивает более быстрый динамический отклик, по сравнению с ПИД. Быстрая динамическая реакция УПМ возможна благодаря устранению стадии модуляции.

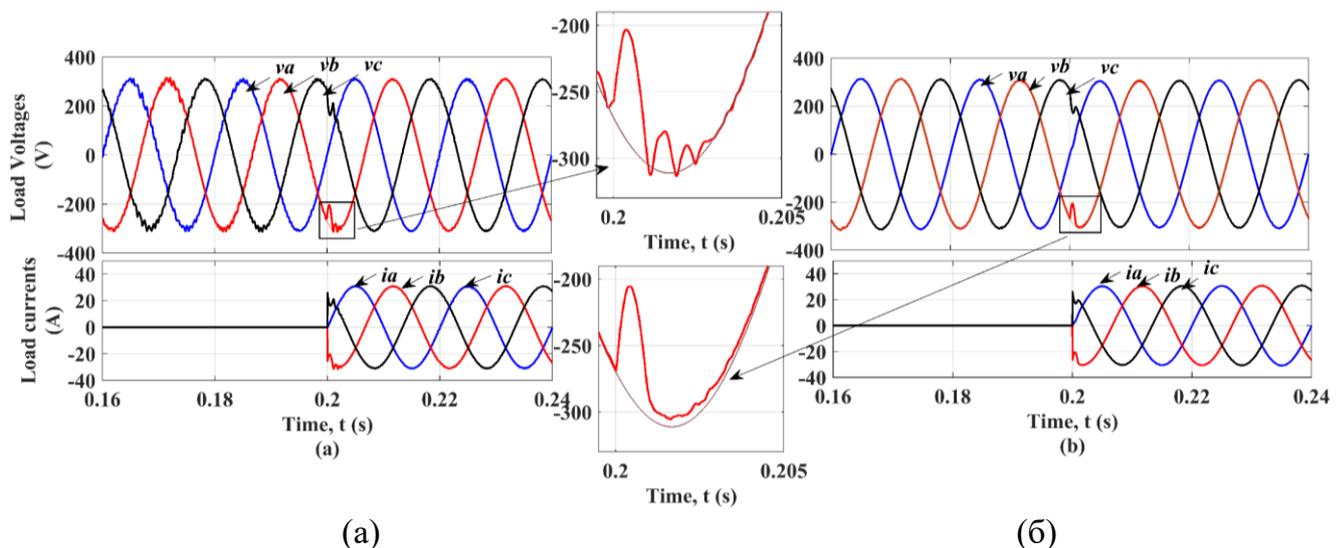


Рис. 7. Напряжения и токи нагрузки СЭС при динамическом режиме для (а) УПМ и (б) ПИД

Также в главе проведён анализ чувствительности управления, чтобы оценить влияние изменения нагрузки и изменения параметров LC-фильтра на характеристики управления УПМ и ПИД. В этом тесте на устойчивость к изменению индуктивность фильтра варьируется от 1,5 до 3,5 мГн с шагом изменения 0,2 мГн, а ёмкость фильтра от 50 до 100 мкФ с шагом изменения 5 мкФ. Можно отметить,

что УПМ и ПИД-регулятор «распознают» стандартное значение параметров LC-фильтра, которые составляют 2,5 мГн и 80 мкФ.

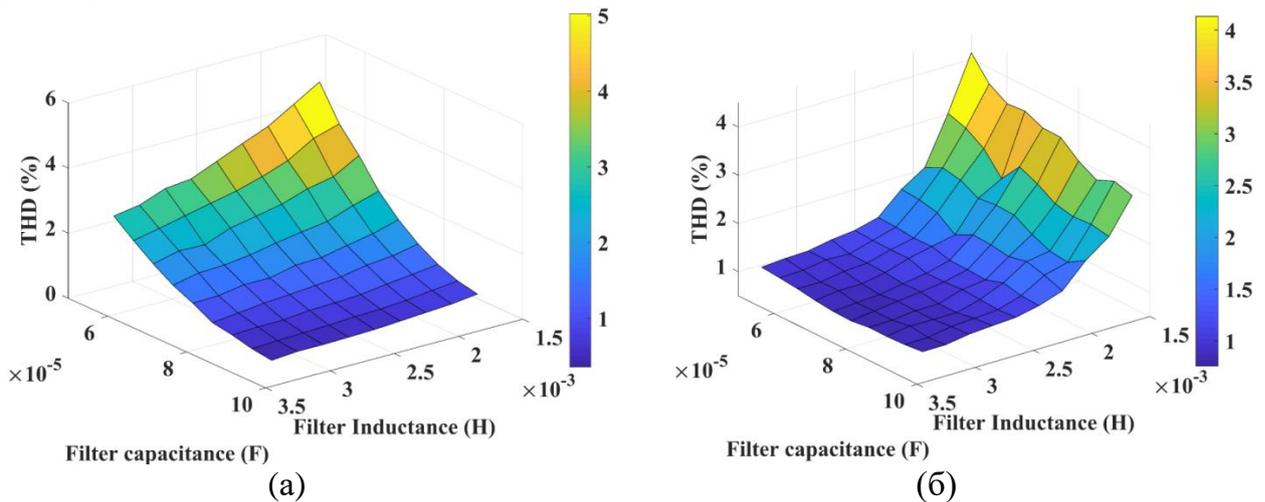


Рис. 8. Изменение %КНИ при вариациях параметров LC-фильтра (а)УПМ (б) ПИД.

На рисунке 8а показан %КНИ УПМ при вариациях параметров LC-фильтра. %КНИ поверхности ниже, чем 5%, и среднее значение вариации %КНИ составляет 2,0288%, что очень близко к среднему значению %КНИ при ПИД, которое составляет 1,495% (рис. 8б).

Однако хорошо известно, что частота коммутации ( $f_s$ ) при УПМ ограничено частотой дискретизации из-за того, что алгоритм управления повторяется в каждом периоде дискретизации. В работе был проведен анализ, чтобы показать, как изменяется  $f_s$  в соответствии с параметрами LC-фильтра (рис. 9). Отклонение  $f_s$  от более низких к более высоким параметрам LC-фильтра составляет от 1500 до 5500 Гц. Можно наблюдать, что изменение индуктивности фильтра оказывает меньшее влияние на  $f_s$ , чем изменение ёмкости фильтра.

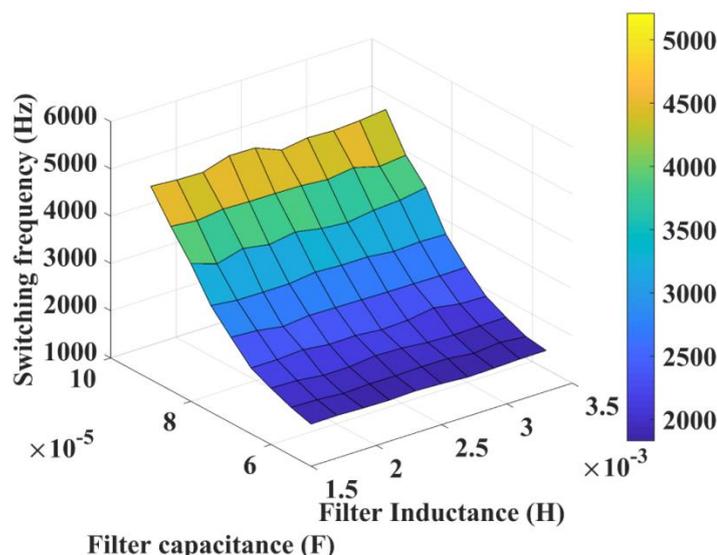


Рис. 9. Изменение  $f_s$  УПМ при вариациях параметров LC-фильтра.

**В четвертой главе** предложен новый алгоритм УПМ для работы не только в нормальных условиях, но и в аварийных условиях и коротких замыканиях (КЗ). Цель предлагаемого алгоритма автоматически изменяется в зависимости от ре-

жима системы, независимо от того, нормальный он или ненормальный, с учётом типа неисправности в аварийном состоянии. Основной задачей этого алгоритма управления является управление АИН для обеспечения сбалансированных напряжений нагрузки с низкими гармоническими искажениями в нормальных условиях. С другой стороны, предлагаемый алгоритм ограничивает токи короткого замыкания, не влияя на напряжение нагрузки исправных фаз.

Целевая функция предлагаемого алгоритма может быть определена как:

$$g = \overline{Y_{ia}} \left[ v_a^* - v_a(k+1) \right]^2 + \overline{Y_{ib}} \left[ v_b^* - v_b(k+1) \right]^2 + \overline{Y_{ic}} \left[ v_c^* - v_c(k+1) \right]^2 + Y_{ia} \left[ i_{oa}^* - i_{oa}(k+1) \right]^2 + Y_{ib} \left[ i_{ob}^* - i_{ob}(k+1) \right]^2 + Y_{ic} \left[ i_{oc}^* - i_{oc}(k+1) \right]^2 + F_{v_{lim}} + F_{i_{lim}} \quad (4)$$

где  $i_{oa}^*$ ,  $i_{ob}^*$  и  $i_{oc}^*$  - опорные токи инвертора, их амплитуда - максимальное значение тока, которое может протекать в полупроводниковых переключателях инвертора.  $i_{oa}(k+1)$ ,  $i_{ob}(k+1)$  и  $i_{oc}(k+1)$  - прогнозируемые выходные токи инвертора. Предлагаемый алгоритм управления преследует две цели: управление напряжением нагрузки с помощью отслеживания сигнала эталонного напряжения в нормальных условиях, и управление током с помощью отслеживания эталонного сигнала тока в аварийных режимах. Весовые коэффициенты в целевой функции используются для выбора между двумя целями в соответствии с обнаружением короткого замыкания (КЗ) и могут быть определены в соответствии с рисунком 10.

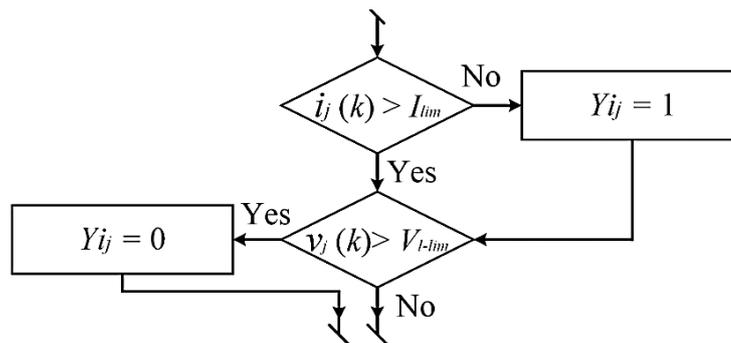


Рис. 10. Часть алгоритма обнаружения КЗ в предлагаемом алгоритме УПМ

На рисунке 10 показана часть алгоритма обнаружения КЗ в предлагаемом алгоритме УПМ, где  $j = a, b$  и  $c$ .  $i_{lim}$  - порог срабатывания ограничителя тока, который используется для индикации аварийных режимов в системе управления. Значение порога срабатывания ограничителя тока может быть установлено вплоть до значений в три раза превышающих номинальное значение тока преобразователя.  $v_{l\_lim}$  - порог выхода из аварийного режима по заданному уровню напряжения нагрузки, и это можно назвать нижним предельным значением напряжения, которое равно 0,75 амплитуды опорного напряжения. Ясно, что во время КЗ напряжение нагрузки очень низкое, в то время как напряжение нагрузки увеличивается при устранении повреждения, потому что импедансы нагрузки, «видимые» от инвертора, внезапно возрастают.

Весовые коэффициенты  $Y_{ia}$ ,  $Y_{ib}$  и  $Y_{ic}$  рассматриваются как индукции неисправностей (флаги КЗ) для каждой фазы соответственно. Например, если КЗ возникает в фазе а, значение  $Y_{ia}$  будет изменено с 0 на 1, а если неисправность устранена, значение  $Y_{ia}$  будет возвращено к нулю.

При уменьшении времени выборки  $T_s$  алгоритм УПМ показывает лучшую производительность. Чтобы уменьшить  $T_s$ , высокоскоростные микроконтроллеры должны выполнять большое количество вычислений за меньшее время, что приводит к высокой стоимости. Поэтому в данной главе предложенный УПМ разумно оптимизирован следующим образом. Этот алгоритм оптимизирован за счёт удаления повторных вычислений. Более того, предложенный алгоритм делится на два алгоритма: алгоритм нормального режима и алгоритм режима КЗ (рисунок 11).

В главе представлены результаты экспериментальных исследований предлагаемого алгоритма управления. Система управления реализована на базе микропроцессорного модуля STM32F769BIT6 (216 МГц). Фотографии системы и электрическая схема показаны на рисунке 12.

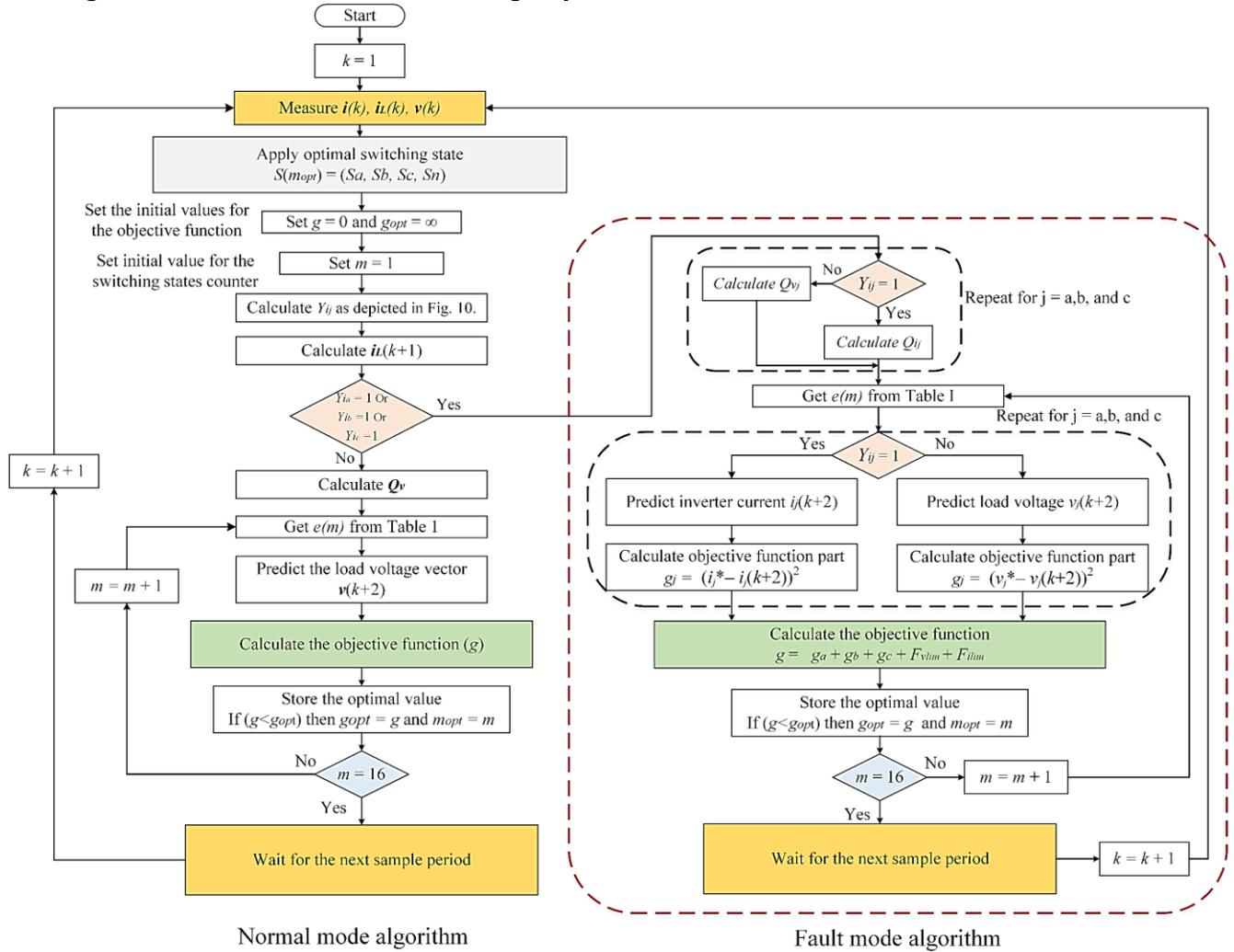


Рис. 11. Блок-схема оптимизированного предложенного алгоритма УПМ

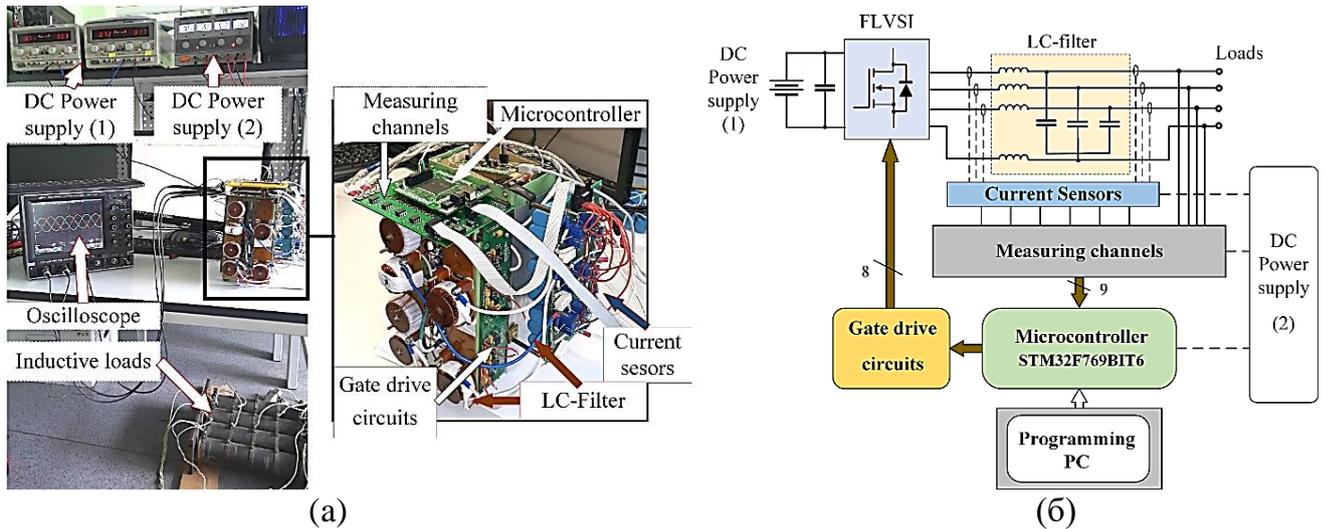


Рис. 12. Экспериментальная установка (а) и ее функциональная схема (б)

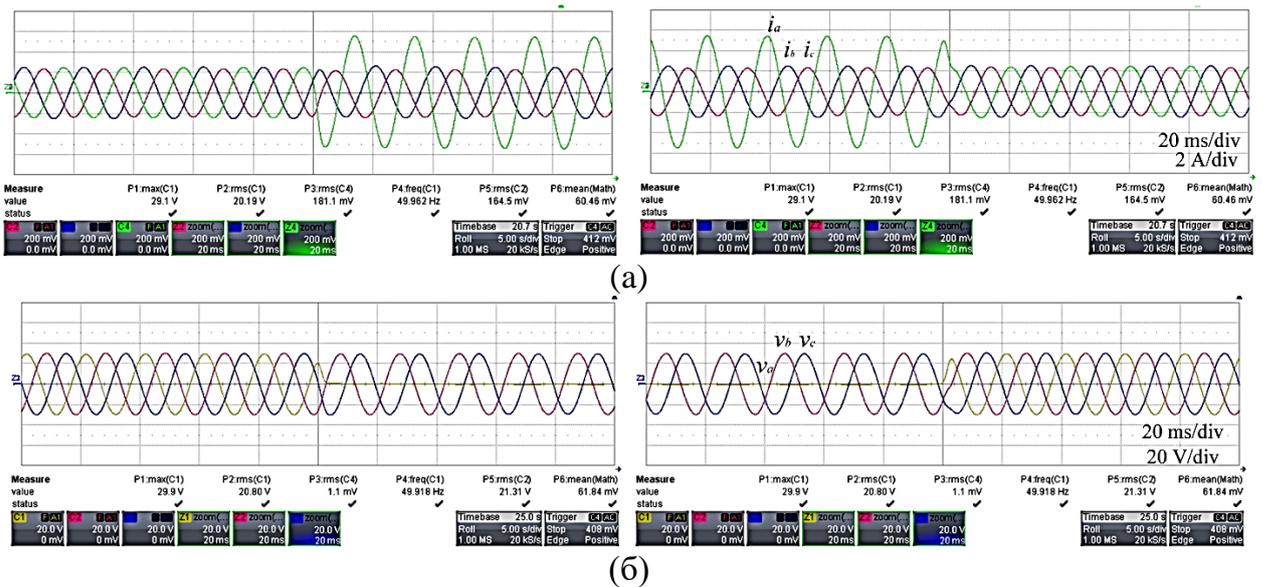


Рис 13. (а)Ток и(б) напряжение нагрузки до однофазного КЗ, в течение однофазного КЗ и после.

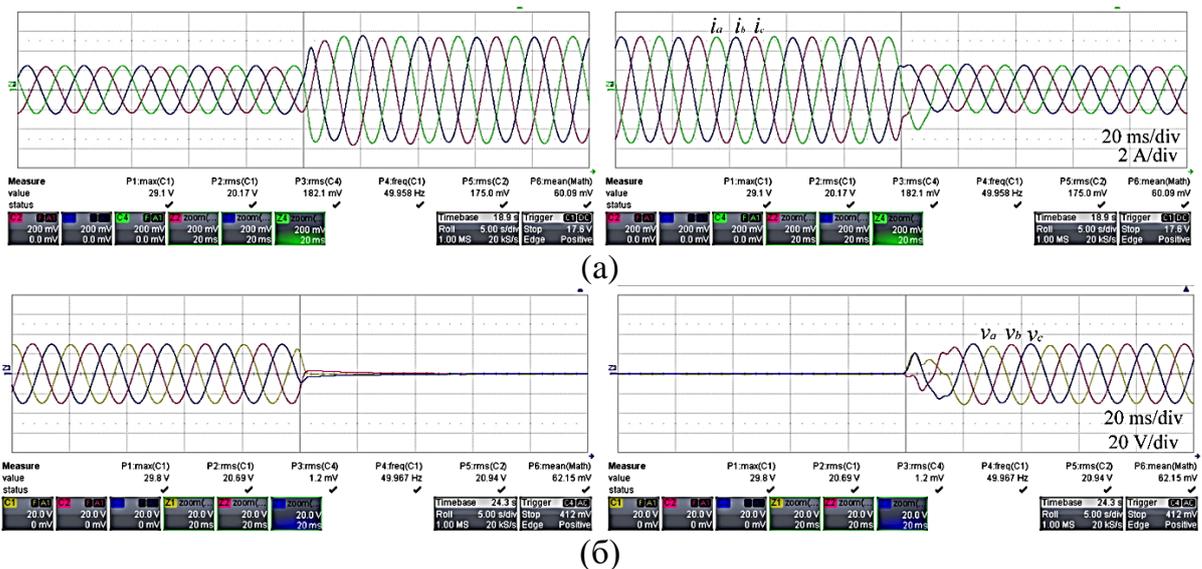


Рис 14. (а)Ток и(б) напряжение нагрузки до трёхфазного КЗ, в течение трёхфазного КЗ и после.

Для оценки производительности алгоритма он был протестирован в трёх режимах: установившийся статический режим работы, переходные процессы и режим короткого замыкания. Каждый из режимов работы был проверен при различных параметрах нагрузки.

Работа алгоритма управления была проверена экспериментально на всех типах аварийных ситуаций, чтобы показать эффективность работы алгоритма и возможность ограничения тока.

Токи нагрузки в течение однофазного замыкания на фазе А показаны на рисунке 13. Как видно на рисунке, ток в фазе А ограничен на уровне 7 ампер и имеет синусоидальную форму в соответствии с эталонным сигналом задания тока, в то время как другие фазы работают независимо в режиме регулирования напряжения. Короткое замыкание в фазе А никак не влияет на их работу. После выхода из состояния КЗ, напряжение в фазе приходит в нормальное состояние без перенапряжений во время переходного процесса.

Одной из самых опасных аварийных ситуаций в трёхфазных СЭС является трёхфазное симметричное замыкание. Разработанный алгоритм управления позволяет эффективно защитить систему электроснабжения от броска тока, изменив цель управления с регулирования напряжения на регулирование тока. Рисунок 14 показывает, что инвертор, на основе которого построена СЭС, формирует в нагрузке заданный ток во всех фазах в течение короткого замыкания. В момент, когда СЭС выходит из состояния КЗ, и во время, когда осуществляется регулировка по току, возможно возникновение перенапряжений. Поэтому алгоритм так же, как и в предыдущих экспериментах отслеживает возможность появления перенапряжений и избегает состояний переключения инвертора, которые приводят к появлению напряжения выше, чем пороговое значение. Такая защита от перенапряжений может привести к некоторым колебаниям напряжения при выходе инвертора из состояния КЗ, как показано на рисунке 14.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе выполнены исследования режимов работы полупроводниковой трехфазной СЭС на базе полупроводникового преобразователя (инвертора), реализующей алгоритм прогнозирующего управления. Проведенные исследования показали реализуемость, эффективность и перспективность применения вышеуказанного алгоритма для достижения требуемого качества выходного напряжения. В результате проделанных в диссертационной работе исследований:

1. Изучены и проанализированы особенности применения и построения автономных полупроводниковых СЭС при работе на различные виды нагрузок и в составе автономных сетей, в частности, microgrid.
2. Разработаны математические модели СЭС на основе АИН с нулевым проводом (четвертой стойкой) и выходным фильтром при реализации алгоритма ее управления на основе ПИД-регулятора, ПР-регулятора, скалярной ШИМ и при компенсации взаимной связи между осями D и Q в системе координат DQ0.

3. Разработан алгоритм прогнозирующего управления выходным напряжением АИН с нулевым проводом (четвертой стойкой), минимизирующий ошибку между выходным и опорным напряжениями

4. В пакете *Matlab Simulink* разработана имитационная модель СЭС при управлении АИН с нулевым проводом (четвертой стойкой) на основе трёх методов управления: с ПР-регулятором, ПИД-регулятором и с прогнозирующей моделью.

5. Проведены исследования по особенностям применения метода прогнозирующего управления в структуре полупроводниковой СЭС и разработаны алгоритмы управления СЭС при ее работе на активную, реактивную и нелинейную нагрузки как симметричного, так и несимметричного (несбалансированного) типа в соответствии с показателями качества управления.

6. Проведены сравнительные исследования СЭС с прогнозирующим управлением с СЭС, функционирующих на основе алгоритмов пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) и пропорционально-резонансного (ПР)-регуляторов.

7. Проведен анализ чувствительности управления и оценки влияния изменения нагрузки и параметров LC-фильтра на характеристики управления СЭС при УПМ- и ПИД-алгоритмах. Показано, что УПМ обладает хорошей устойчивостью и низкой чувствительностью к изменениям параметров фильтров, а также незначительно влияет на пульсацию напряжения в звене постоянного тока инвертора.

8. Разработаны алгоритмы аварийной защиты полупроводниковой СЭС с прогнозирующим управлением по току нагрузки.

9. Для проверки теоретических исследований и выводов изготовлен макетный образец полупроводниковой СЭС с нулевым проводом (четвертой стойкой), на котором проведены физические эксперименты. Результаты экспериментов подтвердили правильность теоретических исследований и выводов диссертационной работы.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

*Статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК РФ, в которых изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту:*

1. Гарганеев А.Г. Система электроснабжения на основе управления автономным инвертором с прогнозирующей моделью / А.Г. Гарганеев, Р.С. Абуэлсауд // Доклады ТУСУР – 2018. – Т. 21, № 1 – С. 106-111.

2. Абуэлсауд Р. С. Управление выходным напряжением автономной системы электроснабжения на основе ПИД-регуляторов в условиях несбалансированных и нелинейных нагрузок / Р.С. Абуэлсауд, А.Г. Гарганеев // Электропитание – 2018. – № 3.

3. Абуэлсауд Р.С. Управление напряжением трёхфазного автономного инвертора напряжения с нулевым проводом на основе пропорционально-Резонансных регуляторов / Р. С. Абуэлсауд, А. Г. Гарганеев // Практическая силовая электроника – 2019. – № 1.

4. Абуэлсауд Р.С. Устранения мёртвого времени для трёхфазных автономных инверторов напряжения / Р. С. Абуэлсауд, А. Г. Гарганеев // Электропитание – 2019. – № 1.

5. Абуэлсауд Р. С. Результаты экспериментов автономной системы электроснабжения на основе управления с прогнозирующей моделью / Р. С. Абуэлсауд, И. В. Александров, Г. С. Леус // Электропитание – 2019. – № 3.

*Статьи в рецензируемых периодических изданиях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, в которых изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту:*

1. Aboelsaud R. Review of three-phase inverters control for unbalanced load compensation / Raef Aboelsaud, A. Ibrahim, and A. G. Garganeev // Int. J. Power Electron. Drive Syst. – Vol. 10, No. 1– 2019 – С. 242–255.

2. Aboelsaud R. S. Assessment of Model Predictive Voltage Control for Autonomous Four-Leg Inverter / Raef Aboelsaud, Ameena Saad Al-Sumaiti, Ahmed Ibrahim, Ivan V. Aleksandrov, Alexander G. Garganeev, Ahmed A. Zaki Diab // IEEE Access - 2020.

3. Aboelsaud R., Ibrahim A, Ivan V., Garganeev A.G., Aleksandrov I.V. Improved dead-time elimination method for three-phase power inverters/ Raef Aboelsaud, A. Ibrahim, and A. G. Garganeev // Int. J. Power Electron. Drive Syst, 2020 – Vol.11-№4.- С.1759-1766.

*Материалы конференций, в том числе статьи в сборниках конференций, входящих в базу данных Scopus, по теме диссертации:*

1. Garganeev, A. G. A Novel Predictive Control Algorithm For Autonomous Power Supply Systems / A. G. Garganeev, Raef Aboelsaud, and A. Ibrahim // Proceedings of the 4th International Conference on Frontiers of Educational Technologies (ICFET), 2018, С. 170–175.

2. Aboelsaud R. S. Comparative Study of Control Methods for Power Quality Improvement of Autonomous 4-Leg Inverters / Raef Aboelsaud, A. Ibrahim, and A. G. Garganeev // 2019 Proceedings of the International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering.

3. Aboelsaud R. S. Voltage Control of Autonomous Power Supply Systems Based on PID Controller Under Unbalanced and Nonlinear Load Conditions / Raef Aboelsaud, A. Ibrahim, and A. G. Garganeev // 2019 Proceedings of the International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering.

4. Garganeev, A. G. Voltage Control of Autonomous Three-Phase Four-Leg VSI Based on Scalar PR Controllers / A. G. Garganeev, R. Aboelsaud, and A. Ibrahim // 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) – 2019–С. 558–564.