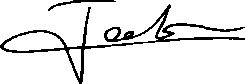
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

На правах рукописи



№20 0.9 08623 “

**Талеб Джабер Гаиб**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОАГРЕГАТНЫХ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ГАЗОТУРБИННЫМ И**

**ДИЗЕЛЬНЫМ ПРИВОДОМ**

Специальность 05.14.02 — Электростанции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Смоловик С.В.**

**Санкт-Петербург**

2009

**СОДЕРЖАНИЕ**

[**Введение : 5**](#bookmark3)

**ГЛАВА 1.**

[**Обзор направлений развития автономной энергетики 14**](#bookmark5)

1. История и перспективы развития дизельных, газотурбинных и газопоршневыхЬлектростанции 14
2. Зоны децентрализованного энергоснабжения 15
3. Дизельные электростанции 16
4. Дизельные электротепловые станции 21
5. [Газодизельные и газопоршневые электростанции 22](#bookmark6)
6. Секционирование генерирующих мощностей на газовом топливе 24

1.2. Г азотурбинные установки 27

1. Достоинства и особенности применения ГТУ

в малой энергетике 28

1. Принцип работы ГТУ в малой энергетике 29
2. Проблемы эксплуатации многоагрегатных дизель-генераторных электростанций : 32
3. Разработка мероприятий по снижению скручивающих моментов газотурбинных агрегатов автономной системы электроснабжения .г 34
4. Задачи диссертации 36

**ГЛАВА 2.**

**Математическое моделирование элементов автономной Энергосистемы 38**

1. [Синхронный генератор 38](#bookmark9)
2. Моделирование переходных процессов асинхронных двигателей 43
3. Моделирование систем возбуждения 47
4. Математическое описание автоматического регулятора возбуждения сильного действия (АРВ-СД) 49
5. Математическое моделирование дизеля и его регулятора частоты вращения 53
6. Математическое моделирование: крутильных; колебаний; валопровода

агрегатові стазотурбиннымшриводом: . 56

2.7 Определение требований к моделированию переходных; процессов с учетом крутильных колебаний^. 58­2:7.1. Єхема\*энергосистемы и расчетные условия. 58#

217.2Переходные процессы при коротких замыканиях. 62

1. Исследованиемероприятий: по снижению скручивающих моментов^

воздействующих на элементы валопровода агрегата. 64

2І7.3 .1. Применение электрического торможения\*

различной интенсивности 64;

1. Использование дополнительного разделительного

трансформатора. 69

[2. 8Шыводы гпо главе 21. 721](#bookmark2)

ГЛАВА 3. . ' . .

Подавление колебаний: мощности и напряжения генераторов с:

дизельным приводом; 73;

3; *V.* Исследование переходных процессов при работе генератора параллельно

с системошболыпошмощности,.... 74‘

3:2. Работа одиночного «генератора на автономную нагрузку 80

*33.* Работа генератора- с: дизельным приводом в составе многоагрегатной

автономной электростанции 82

1. Выводы по главе 3 88

ГЛАВА 4.

Разработка мероприятий по снижению опасных скручивающих моментов генераторов автономных электростанции с газотурбинным приводом 89

* 1. Оценка?, величин скручивающихt моментов и мероприятий? по

их подавлению в автономной ЭЭС с генератором.мощностъю5;4-МВт:. 89

* + 1. Особенности протекания переходных процессов в системе электроснабжения: с синхронной нагрузкой 9-Гг

1. Последовательное электрическое торможение генератора 99

4.1.2. Опыт установки разделительного трансформатора в автономной ЭЭС

1. Опыт отключения части синхронной нагрузки 104
2. Совместное применение различных мероприятий по подавлению крутильных колебаний валопровода 109
   1. Оценка величин скручивающих моментов и мероприятий по

их подавлению в автономной ЭЭС с генератором Г2(7,8МВт) 115

* 1. Оценка величин скручивающих моментов и мероприятий по их

подавлению в автономной ЭЭС с генераторами Г1 (5,4МВт) и Г2(7,8МВт) 123

* + 1. Особенности протекания переходных процессов 123
    2. Опыт установки разделительного трансформатора в автономной ЭЭС.... 127
    3. Подавление скручивающих моментов с помощью последовательного электрического торможения при предельном времени отключения КЗ 131
    4. Совместное применение различных мероприятий по подавлению крутильных колебаний валопровода при предельном времени отключения двухфазного короткого замыкания 132
  1. Выводы по главе 4 136

Заключение 138

**Список использованных источников** 141

**ВВЕДЕНИЕ**

В России экономический подъем последних лет обусловил рост потребления электрической энергии. В 2004г. выработка электроэнергии отечественными производителями по сравнению с предыдущим годом увеличилась на 1,6%, превысив 1000 млрд. кВтч. Одновременно производство тепловой энергии сократилось на 1,3% до 1402 млн. Гкал, что объясняется мягкими погодными условиями. На долю холдинга РАО "ЕЭС России" в 2004г. приходилось 70% предложения электроэнергии, на долю Росэнергоатома 15,4%. Суммарный удельный вес независимых производителей был примерно равен выработке АЭС[69].

В проекте "Энергетической стратегии России на период до 2020 года", разработанном Министерством топлива и энергетики РФ, определено, что развитие мощностей на работающих и вновь вводимых электростанциях должно осуществляться благодаря использованию новых технологий. Переход от паротурбинных к парогазовым и газотурбинным электростанциям обеспечит постепенное повышение КПД установок. За счет высокого КПД газотурбинная установка позволяет использовать энергию топлива с высокой эффективностью [12,80].

В электроэнергетике к малым электростанциям принято относить электростанции мощностью до 100-150 МВт с агрегатами единичной мощностью до 20-25 МВт [55]. Обычно такие электростанции разделяют на три подкласса потребления.

* микроэлектростанции мощностью до 100 кВт;
* миниэлектростанции мощностью от 100 кВт до 1 МВт;
* малые электростанции мощностью более 1 МВт.

По статистике РАО "ЕЭС России", потери при передаче электроэнергии равны 12% от объема производства [68], а потери при передаче тепла по существующим теплотрассам достигают 70%. Таким образом, избегая передачи электроэнергии на дальние расстояния (а тепло может

производиться рядом с потребителем), можно не только сократить потери, но и снизить риск зависимости от магистральных сетей. Поэтому малая энергетика характеризуется не столько уровнем мощности и степенью износа оборудования, сколько близостью к потребителям. Произошла техническая революция: малые и большие газовые турбины сегодня могут работать с одинаковым КПД. По статистике потери большой генерации при передаче и трансформации энергии составляют до 10% на 1000 км, тогда как при передаче газа - 1%. Следовательно, когенерирующие (производящие одновременно и электричество, и горячую воду) газовые установки эффективнее строить в непосредственной близости от потребителей: в таком случае КПД использования газа будет на 30-40% выше. Но это сложный и дорогой рынок, требующий серьезных инвестиций в инжиниринг [69].

Несмотря на относительно скромную долю малой энергетики в энергобалансе страны ее значение огромно. В 2004г. 4,8% электроэнергии произведено на малых станциях, еще 11,5% - на собственных станциях крупных потребителей и около 61% - на больших ТЭС. По разным оценкам, от 50 до 70% территории России не охвачено централизованным электроснабжением и до 80% - централизованным теплоснабжением. По данным Российской академии наук, суммарная мощность малых электростанций на сегодняшний день равна 17 ГВт. Около 26% от общего производства тепла в РФ вырабатывается в малых котельных и на индивидуальных отопительных установках, моральный и физический износ которых составляет порядка 80%. Если начать сейчас строить малые ТЭЦ на замещение выбывающих генерирующих ресурсов, то к 2010 г. размер рынка малой энергетики может достичь 115-130 млн. кВт установленной мощности.

На модернизацию существующей инфраструктуры потребуется от 120 до 600 млрд. долл. (при цене 600 долл. за установленный кВт), т. е. в среднем 8 млрд. ежегодно [49].

Малая электроэнергетика России сегодня - это примерно 49000 электростанций (98,6% от их общего числа) общей мощностью 17 млн. кВт (8% от всей установленной мощности электростанций России), работающих как в энергосистемах, так и автономно [51]. Общая годовая выработка электроэнергии на этих электростанциях достигает 5% от выработки всех электростанций страны. Средняя мощность малых электростанций составляет примерно 340 кВт.

В настоящее время, повышенное внимание уделяется развитию систем автономного электроснабжения, которые не только дополняют стационарные электрические станции, но и во многих случаях обеспечивает решение важных технических проблем электроснабжения в труднодоступных районах. Автономная энергетика позволяет потребителю не зависеть от централизованного энергоснабжения и его состояния, использовать оптимальные для данных условий источники производства энергии. Закономерно, что такие технологии находят себе место и в промышленно развитых, и в развивающихся районах с различным климатом.

Вместе с тем во многих регионах России (до 40% территории страны) отсутствует централизованное электроснабжение от единой энергосистемы. В таких регионах получили широкое развитие системы автономного электроснабжения (САЭ) на базе дизельных, газопоршневых и газотурбинных электростанций, способные, при отсутствии связи с внешней энергосистемой, длительно обеспечивать электроснабжение и теплоснабжение объектов различного назначения.

К таким объектам относятся поселки нефтяников и газовиков, строителей, моряков и пограничников, буровые по добыче нефти и газа, промышленные объекты перекачки и переработки нефти и газа, стартовые комплексы космической отрасли, а также многие другие объекты в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Кроме того, у нефтегазодобывающих компаний имеется возможность использования доступного природного газа с низкой себестоимостью в качестве топлива для электростанции [4].

Однако современный этап развития автономной энергетики требует перехода к созданию быстровозводимых блочно-модульных электростанций на базе модулей контейнерного исполнения и стационарных зданий в легко возводимых строительных конструкциях общей мощностью от 3 до 50 МВт в формате «под ключ».

В настоящее время усиливается направление создания стационарных и блочно-модульных электростанций контейнерного исполнения с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии (коогенерационные электростанции или мини-тэц). Поэтому в состав электростанций вводятся источники тепловой энергии (газо-водяные и водо­водяные утилизаторы) и системы утилизации тепла на их основе, позволяющие довести коэффициент полезного действия автономных энергоисточников до 75-85%.

Среди наиболее существенных причин, побуждающих потребителей принять решение о строительстве собственных автономных источников энергии (АИЭ), можно выделить следующие: \*

1. Себестоимость электроэнергии от собственных АИЭ (особенно работающих на природном или попутном нефтяном газе) значительно ниже стоимости покупаемой у энергосистемы электроэнергии.
2. Стоимость строительства таких электростанций для многих

предприятий соизмерима со стоимостью ущерба от перерыва в

электроснабжении длительностью более 2 часов, а для некоторых (например, космическая отрасль) - со стоимостью ущерба от перерыва в

электроснабжении длительностью 15-30 минут.

1. Надежность электроснабжения от АИЭ значительно выше, чем от энергосистемы, особенно если для АИЭ предусмотрен режим параллельной работы с внешней энергосистемой.
2. Наличие АИЭ позволяют предприятиям обеспечить энергетический суверенитет, а как следствие - экономическую независимость от рынка электроэнергии.

Большую роль играет малая энергетика в обеспечении надежности электроснабжения и энергетической безопасности (ЭБ) потребителей электроэнергии, которая является важной компонентой национальной безопасности страны и трактуется как состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от обусловленных внутренними и внешними факторами угроз дефицита всех видов энергии и энергетических ресурсов [77].

За рубежом тоже уделяется большое внимание развитию малой энергетики. В зарубежной практике до 10% (в США, Германии до 20-25%, включая возобновляющиеся источники энергии) энергомощностей падает на долю малой энергетики, в России лишь 0,5% [45].

В Дании строительство объектов малой энергетики признано одним из перспективных направлений развития энергетики и объявлено государственной программой. В Германии количество действующих, строящихся и планируемых малых ТЭЦ достигает двух тысяч. В Японии каждый строящийся объект обязательно оснащается малой ТЭЦ. После энергетических кризисов в Соединенных Штатах, Великобритании, Италии и других странах доля генерации на малых станциях непрерывно увеличивается [69].

Для Ирака развитие малой энергетики тоже считается актуальным, так как большинство иракских электростанции было повреждено или полностью разрушено в течение войны 1991г. [91].

Ирак имеет одну из самых больших электрических сетей в регионе. До войны в Персидском Заливе 1990г. общая установленная мощность достигала 10000 МВт, что составляло около 10 % генерирующих мощностей арабских стран, как показывает рис.ВІ. Всего работало 120 тепловых, газотурбинных и гидротурбинных блоков. В 1990 максимум нагрузки энергосистемы достигал приблизительно 7 500 МВт [97].

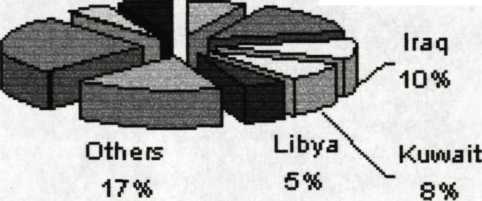
***%*** of Arab Installed Capacity

**5%**

6%

**7%**

**15%**



Syrja UAE Algeria

Saudi Arabia **27%**

**Рис.ВІ. Установленные мощности арабских стран.**

Электрические станции Ирака получили серьезные повреждения в течение войны 1991г. В табл. В1 показан объем вывода из строя электростанций.

**Таблица В1.**

Проценты уничтожения электростанции

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Электростанции** | **У ничтоженные блоки** | **Объем уничтожения *%*** | **У н ичтоженные мощности МВт** |
| **Тепловые** | **32** | **96%** | **5215** |
| **Газотурбинные** | **45** | **82%** | **1476** |
| **Гидро** | **18** | **84%** | **1894** |

С 1991г. Ирак сумел восстановить и подключить к сетям около 4 800 МВт генерирующих мощностей. Новые газотурбинные блоки были введены в строй благодаря реализации программы ОІР под управлением UNDP. В 2003 г. военный конфликт привел к снижению установленной мощности и выработки электроэнергии до 3 137 МВт [100].

**. Таблица В2.**

Установленная мощность электростанций к лету 2003 г.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Станции** | **Количество**  **блоков** | **Проектная' мощность, МВт** | **Фактическая**  **мощность,**  **■ МВт** |
| **Паровые** | **8** | **5415'** | **1600** |
| **Газовые Турбины** | **14** | **2181** | **800'** |
| **Гидро** | **7** | **2518** | **650** |
| **Дизельные** | **■. 3** | **87** | **87** |
| **Обіцее количество -** | **32** | **10206** | **3137** |

В 2003г. новый военный конфликт осложнил ситуацию в энергосистеме. . Электрическая компания? (СоЕ), немедленно начала восстановление линий и подстанций,\* поврежденных в течение этого конфликта, или разукомплектованных мародерами в конце войны [97]^

Большинство; электростанций работает значительно! ниже: их

номинальной! мощности. Страна, известна\* как экспортер нефти, есть все основания опираться на собственные запасы нефти и возможности строительства автономных источников электроэнергии, дизельных,. газопоршневых и газотурбинных. Эти?электростанции обычно расположены! в непосредственной близости от потребителя. В Ираке строительство объектов малой энергетики признано; одним из перспективных направлений; развития энергетики и объявлено государственной программой. Правительство -Ирака утвердило; программу строительства малых автономных, электростанций, призванную решить проблему дефицита: электроэнергии во всех городах страны [2].

Таким образом, несмотря на относительно скромную долю малой энергетики в общем энергобалансе страны по сравнению с большой энергетикой; которой: уделяется основное внимание нашей наукой^ и промышленностью, значимость малой энергетики! в жизни, страны трудно переоценить.

Основной задачей диссертации являлось исследование особенностей работы автономных электростанции с газотурбинным и дизельным приводом и разработка мероприятий, обеспечивающих их надежную эксплуатацию.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы.

В первой главе рассказывается о перспективах развития систем автономного электроснабжения, приводится ряд научно-технических и методологических проблем систем энергоснабжения на основе многоагрегатных дизель-генераторных электростанций, и газотурбинных установок. Рассматриваются вопросы методов подавления колебаний мощности и напряжения, параллельно работающих синхронных генераторов с дизельным приводом и снижения скручивающих моментов газотурбинных агрегатов автономной системы электроснабжения.

Вторая глава посвящена вопросам комплексного математического моделирования элементов автономной энергосистемы для определения составляющих электромагнитного момента, расчета опасных скручивающих моментов в системе привода, а также для обеспечения качества электроэнергии системы автономного электроснабжения.

Математическая модель для анализа электромеханических переходных процессов разработана на основе уравнений синхронного генератора Парка- Горева. Реализованы математические модели автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и регуляторов частоты вращения.

Отработаны приемы математического моделирования и анализа переходных процессов агрегатов с газотурбинным приводом с учетом крутильных колебаний. '

В третьей главе приведены результаты расчетов колебаний мощности и напряжения при стационарном возмущении момента первичного двигателя и регулировании возбуждения для выбора закона управления, обеспечивающего сохранение приемлемого качества напряжения в условиях автономной электрической станции с разнотипными генераторами с

дизельным приводом. Предложено использование дополнительных сигналов в законе регулирования возбуждения генераторов.

В четвертой главе рассмотрены способы снижения скручивающих моментов газотурбинных агрегатов автономной системы электроснабжения и выполнена разработка мероприятий по снижению скручивающих моментов, воздействующих на участок вала, между генератором и редуктором приводного двигателя при коротких замыканиях в электрической сети.

В результате выполнения работы сформулированы рекомендации по снижению колебаний электромагнитной мощности генератора автономной ЭС с дизельным приводом в условиях стационарного возмущения момента первичного двигателя, а также рекомендации по исключению опасных скручивающих моментов, возникающих при авариях вблизи генераторов автономной ЭС с приводом от газовых турбин.

Основные научные и практические результаты ,полученные в работе заключается в следующем.

1. На языке Modelica реализована математическая модель дизель — генератора и системы его регулирования, позволяющая воспроизвести требуемые режимы системы автономного электроснабжения.
2. Выполнено математическое описание элементов автономной

энергосистемы, в том числе, разработаны математические модели регулятора частоты вращения изодромного типа и регулятора частоты вращения фирмы «Вудвард».

1. Рассмотрены условия демпфирования колебаний, вызванных

неравномерностью вращающего момента первичного двигателя (дизеля) в условиях ЭЭС различной структуры. Определены особенности колебательных процессов при параллельной работе с системой бесконечной мощности и при работе многоагрегатных систем автономного электроснабжения.

1. Установлена высокая эффективность использования канала

регулирования возбуждения по производной тока статора. Показано, что подавление колебаний электромагнитной мощности генератора за счет регулирования возбуждения приводят к увеличению колебаний напряжения на шинах приемной станции. Даны рекомендации по выбору настройки канала регулирования по производной тока статора, обеспечивающих удовлетворение всех ограничений.

1. Выполнено исследование переходных процессов автономной системы электроснабжения, оснащенной генераторами с газотурбинным приводом. Поскольку в практике эксплуатации имели место случаи разрушения муфт между редуктором газовой турбины и генератором (одновременно на обоих агрегатах), то рассмотрены процессы при изолированной работе каждого из генераторов на нагрузку и при их параллельной работе. Именно этот

последний случай является наиболее тяжелым с точки зрения величин скручивающих моментов, воздействующих на валопроводы в аварийных и послеаварийных режимах.

6. Показано, что наиболее эффективным мероприятием, снижающим скручивающие моменты, является установка разделительного трансформатора 6/6 кВ. Реализация указанного мероприятия уменьшает аварийные и послеаварийные величины скручивающего момента между ротором генератора и турбиной в 1.375/0.9128 - 1.5064 и 1.65/1.342 = 1.2295 раз, соответственно, при одиночной работе генератора Г1 (5,4 МВт) и в 1.828/0.956 = 1.9121 и 2.092/1.457 = 1.4358 раз, соответственно, при одиночной работе генератора Г2 (7,8 МВт),

1. Установка устройства последовательного электрического торможения практически не влияя на величину скручивающего момента в аварийном режиме уменьшает послеаварийную величину скручивающего момента между ротором генератора и турбиной для генератора Г1 в 1.65/1.389 = 1.19 раз; а для Г2 в 2.092/1.438 = 1.455 раз;
2. Показано, что отключение части синхронной нагрузки практически не влияет на величину скручивающего момента в аварийном режиме, но уменьшает послеаварийную величину скручивающего момента между ротором генератора и турбиной для Г1 в 1.65/1.454 = 1.135 раз; для Г2 в 2.092/1.923 = 1.088 раз;
3. При совместном применениям различных мероприятий по подавлению крутильных колебаний валопровода показано, что при параллельной работе генераторов эффективность демпфирования аварийной величины скручивающего момента между ротором генератора и турбиной определяется, главным образом, установкой разделительных

трансформаторов 6/6 кВ и при *хт—* 0,12 снижение составляет для Г1 порядка 33%; а для Г2 снижение составляет порядка 30%,.

1. Максимальная эффективность снижения величины скручивающего момента достигается за счет совместного применения разделительного трансформатора, последовательного электрического торможения и отключения 15% синхронной нагрузки, *для* Г1 снижение составляет около 35%; а для Г2 снижение составляет около 38%.
2. Несмотря на значительно большие исходные величины скручивающего момента для генератора Г2, за счет применения рассмотренных противоаварийных мероприятий конечные значения момента практически идентичны полученным для генератора Г1.
3. Алексеев, Б. А. Актуальные вопросы создания и эксплуатации электрических машин : (сессия СИГРЭ, 28 августа 2004 г., Париж) / Бк А. Алексеев, JL Г. Мамиконянц, Ф. А. Поляков // Электричество. - 2005. - №8. - С. 55-62.
4. Аль Азави Раад Сальман. Ориентирование развития электроэнергетики Ирака на использование возобновляемых источников энергии / Аль Азави Раад Сальман , В. И. Виссарионов - М., 2007. - 23 с. - Деп. в ВИНИТИ 27.09.2007, № 913. '
5. Баланцев, А. Р. Влияние насыщения стали синхронных генераторов средней мощности на переходные процессы при регулировании возбуждения : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / А. Р. Баланцев; Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т. - СПб., 1992. - 207 с.
6. Баринов, А. В. Малая энергетика : проблемы и перспективы [Электронный ресурс] / А. В. Баринов, К. Б. Черновец, А. В. Орлов. — Электрон, текстовые дан. (1 файл : 106 Кб) // Материалы межвузовской науч.-техн. конф. 24 - 29 ноября 2003 г., Неделя науки (32; 2003; Санкт-Петербург); Санкт- Петербургский государственный политехнический университет. — СПб.,
7. - Электрон. версия печ. публикации. —

[ftp://ftp.unilib.neva.ru/dl/004159.pdf.](ftp://ftp.unilib.neva.ru/dl/004159.pdf)

5.Обоснование надежности автономных газотурбинных электростанций / И. В. Белоусенко [и др.] // Теплоэнергетика. - 2004. -№ 11. — С. 27-32.

1. Беркович, М. А. Автоматика энергосистем / М. А. Беркович, В. А. Гладышев, В. А. Семенов\* - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 238 с.
2. Богомолов, В. С. Судовые электроэнергетические установки подчинённого уровня. - Калининград, 1996.

Важнов, А. И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. - 312 с.