

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

ПОТАПОВ ГРИГОРИЙ ИГОРЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ**

Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль «Электроснабжение»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Романовская
Инна Анатольевна

Проверено

Зачтено

Библиотека

Комсомольск – на – Амуре

2019

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (КНАГУ).

Научный руководитель

канд. тех. наук, доцент
Сериков Александр Владимирович

Рецензент

Защита состоится «15» марта 2019 года в 09 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681913, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 203/3.

Автореферат разослан __ марта 2019 г

Секретарь ГЭК

Н.Н. Мельникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Автономные источники электроэнергии (АИЭ) становятся все более популярными при решении вопросов электроснабжения потребителей различного назначения. Это может быть связано как с невозможностью подключения к централизованной системе электроснабжения (по разным оценкам, от 60 до 70 % территории России не охвачены централизованными электросетями), так и с экономическими соображениями. Кроме того, микро- и мини-электростанции являются единственно возможным решением при создании надежных систем гарантированного питания.

Широкое распространение АИЭ получили в нефтегазовой промышленности. Большинство объектов отрасли привязано к месторождениям нефти и газа, которые находятся, в основном, в труднодоступных малонаселенных районах. Как следствие, АИЭ должны отвечать целому ряду требований: экономичность, надежность, большой срок службы, простота и удобство эксплуатации, малые масса и габариты. В связи с этим перспективной выглядит замена традиционно используемых в автономных электростанциях синхронных генераторов (СГ) на асинхронные (АГ).

Для электроснабжения технологических комплексов различных производств зачастую более целесообразна выработка электроэнергии на постоянном токе (ПТ). В этом случае актуально применение в составе АИЭ асинхронного вентильного генератора (АВГ), который представляет собой электротехнический комплекс, состоящий из АГ, батареи конденсаторов возбуждения и выпрямительного устройства.

Долгое время считалось, что использование АГ в автономном режиме связано с большими сложностями, а потому не является целесообразным. Если проблема значительной массы и большой стоимости конденсаторов возбуждения в настоящее время решена, благодаря успехам в конденсаторостроении, то вопрос создания простой и надежной системы стабилизации выходного напряжения АГ остается открытым. Все известные на сегодняшний день способы регулирования напряжения АГ имеют определенные недостатки, в результате, область применения таких генераторов ограничена. Для улучшения эксплуатационных характеристик источника питания автономной СЭС необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований АВГ, что обуславливает **актуальность** проводимой работы.

Цель работы заключается в улучшении эксплуатационных характеристик источника питания автономной системы электроснабжения на основе асинхронного вентильного генератора.

Основные задачи

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать целесообразность применения асинхронных вентильных генераторов в составе АИЭ.
2. Провести эксперименты и аналитические расчеты для оценки влияния входных параметров АВГ на выходное напряжение.
3. Разработать способ стабилизации напряжения источника питания автономной системы электроснабжения на основе АВГ и структуру системы, реализующей разработанный способ стабилизации напряжения.
4. Разработать методику выбора параметров источника питания автономной системы электроснабжения на основе АВГ, для реализации дискретно-непрерывного двухканального способа стабилизации напряжения.
5. Проанализировать возможность использования существующих технических устройств для построения источника питания на основе АВГ с предложенной системой стабилизации напряжения.

Методы исследования

Исследования проводились методами теоретического и физического эксперимента с широким использованием математического аппарата, а также основных законов теоретических основ электротехники и теории электрических машин. Для реализации аналитических расчетов и обработки результатов теоретических исследований применялся пакет прикладных математических программ Mathcad 2001..

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для повышения точности стабилизации выходного напряжения АВГ необходимо, наряду с изменением емкости конденсаторов возбуждения осуществлять изменение частоты вращения вала приводного двигателя.
2. Система стабилизации выходного напряжения источника питания на основе АВГ должна состоять из двух контуров, один из которых производит дискретное изменение емкости конденсаторов в зависимости от величины тока выпрямителя, а другой – непрерывное изменение частоты вращения вала приводного двигателя в зависимости от рассогласования между заданным и фактическим значениями выходного напряжения.
3. При определении границ интервала изменения частоты вращения вала приводного двигателя и числа ступеней батареи конденсаторов возбуждения необходимо учитывать возможность перегрузки генератора по току статора.
4. Для выбора параметров источника питания автономной СЭС на основе АВГ необходимо использовать математическую модель АВГ, учитывающую изменение индуктивного сопротивления цепи намагничивания в схеме замещения АВГ в зависимости от частоты вращения ротора генератора.

Достоверность научных результатов подтверждается сравнением результатов, полученных расчетно-аналитическими методами, с результата-

ми экспериментов на физической модели, а также корректным использованием математического аппарата теории электрических машин.

Научная новизна

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность дискретно-непрерывной двухканальной стабилизации напряжения на шинах автономной системы электроснабжения, источник питания которой построен на основе АВГ.

2. Предложена структура системы управления, реализующая разработанный дискретно-непрерывный двухканальный способ стабилизации напряжения источника питания автономной системы электроснабжения на основе АВГ.

3. Разработана методика выбора параметров источника питания автономной системы электроснабжения на основе АВГ, для реализации дискретно-непрерывного двухканального способа стабилизации напряжения.

Практическая ценность работы

Разработанный дискретно-непрерывный двухканальный способ стабилизации напряжения улучшает эксплуатационные характеристики источника питания автономной СЭС на основе АВГ и позволяет расширить область его применения.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы использованы предприятием ООО МПП «Энерготехника» при разработке и проектировании электроэнергетического оборудования для предприятий магистрального транспорта газа, в филиале ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» в г. Сызрани при чтении курса лекций по дисциплинам «Электрические машины» и «Производство, передача и распределение электроэнергии». Экспериментальная установка используется для проведения лабораторных занятий.

Структура и объем диссертации

Работа включает в себя введение, 4 главы, заключение, список использованной литературы из 20 наименований. Объем диссертации – 90 страниц, включая 38 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность и новизна работы, определены её цели и задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор областей применения АИЭ, рассмотрена их классификация. На примере электротехнического комплекса буровой установки рассмотрены типовые схемы автономных СЭС и проведен анализ их особенностей. На основе результатов анализа сделан вывод о

целесообразности использования для электроснабжения технологического комплекса с частотно-регулируемыми приводами автономной СЭС с источником электроэнергии постоянного тока. Рассмотрена возможность использования в составе АИЭ асинхронного генератора и, в частности, АВГ, представляющего собой электротехнический комплекс, состоящий из генератора АГ, батареи конденсаторов возбуждения БК и выпрямителя В (рис. 1).

Также отмечено, что единственным сдерживающим фактором в расширении области применения АВГ на сегодняшний день остается отсутствие простой и надежной системы стабилизации напряжения, поскольку проведенный обзор выявил определенные недостатки у существующих систем управления напряжением АГ.

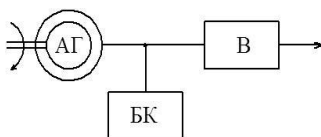


Рисунок 1 – Структурная схема асинхронного вентильного генератора

В заключение главы сформулированы задачи исследования, из которых основной является совершенствование источника питания автономной СЭС на основе АВГ с целью улучшения его эксплуатационных характеристик.

Вторая глава посвящена построению математической модели АВГ, работающего в автономном режиме.

АВГ, по сути, представляет собой асинхронный генератор с конденсаторным возбуждением, работающий на выпрямительную нагрузку. Поэтому на первом этапе рассмотрена математическая модель автономного АГ с конденсаторным возбуждением. При расчете установившихся режимов асинхронной машины обычно используют Т-образную схему замещения, которой соответствует следующая система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{1\phi} &= -\underline{E}_r + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1; \\ 0 &= \underline{E}_r - \underline{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right); \\ \underline{I}_\mu &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\underline{U}_{1\phi}$ – фазное напряжение статора; \underline{I}_1 – ток статора; \underline{I}'_2 – ток ротора, приведенный к обмотке статора; R_1 и X_1 – активное и реактивное сопротивления статора, R'_2 и X'_2 – приведенные активное и реактивное сопротивления ротора; \underline{I}_μ – ток холостого хода или намагничивающий ток; $s = (\omega \pm \omega_2) / \omega$ – скольжение (ω – угловая скорость поля статора, ω_2 – угловая скорость ро-

тора); $\underline{E}_\mu = -jX_\mu \underline{I}_\mu - \text{ЭДС холостого хода}$; X_μ – индуктивное сопротивление взаимоиндукции.

При работе асинхронной машины в качестве автономного генератора, она включается не на сеть, а на нагрузку, которая в общем случае является активно-индуктивной $\underline{Z}_н = R_н + jX_н$. Кроме того, в автономном режиме для создания изменяющегося во времени магнитного поля, необходима реактивная мощность, источником которой в самом простом случае является батарея конденсаторов с фазной емкостью C . Схема замещения автономного генератора с конденсаторным возбуждением представлена на рисунке 2.

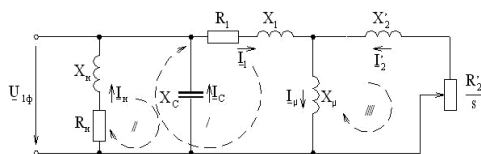


Рисунок 2 – Схема замещения автономного асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением

В отличие от АГ, работающего на мощную сеть, для автономного АГ остаются неопределенными частота тока статора f_1 (то есть скольжение s и реактивные сопротивления АГ) и фазное напряжение $\underline{U}_{1\phi}$ (то есть ток нагрузки $\underline{I}_н$). Кроме того, возникают трудности с определением значения индуктивного сопротивления цепи намагничивания X_μ и, как следствие, зависимости ЭДС холостого хода от тока холостого хода $\underline{E}_\mu = f(\underline{I}_\mu)$.

Таким образом, математическая модель АВГ представляет собой систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\pi}{6} \sqrt{Z_d(Z_d - 6f_1 L)} + j \frac{\pi}{6} \sqrt{6f_1 L Z_d} \right) \underline{I}_a &= \frac{-j \underline{I}_\mu}{a + b \underline{I}_\mu} - \underline{I}_1 (R_1 + j2\pi f_1 L_1); \\ 0 &= \frac{-j \underline{I}_\mu}{a + b \underline{I}_\mu} - \underline{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + j2\pi f_1 L'_2 \right); \\ \underline{I}_\mu &= \underline{I}_1 + \underline{I}'_2; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_a + \underline{I}_c; \\ \underline{U}_{1\phi} &= \left(\frac{\pi}{6} \sqrt{Z_d(Z_d - 6f_1 L)} + j \frac{\pi}{6} \sqrt{6f_1 L Z_d} \right) \underline{I}_a = \frac{1}{j2\pi f_1 C} \underline{I}_c. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На основании анализа математической модели АВГ сделан вывод, что на выходное напряжение АВГ на практике можно влиять изменением скорости вращения ротора n , емкости конденсаторных батарей C , сопротивления нагрузки Z_d . АВГ как объект управления можно представить в виде, изображенном на рисунке 3.

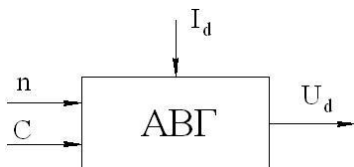


Рисунок 3 – АВГ как объект управления

Внешними воздействиями являются следующие величины: частота вращения n ротора АГ; емкость батареи конденсаторов возбуждения C ; ток нагрузки I_d . При этом первые две величины относятся к входным задающим воздействиям, а ток нагрузки является возмущающим.

В третьей главе осуществлена проверка адекватности полученного математического описания АВГ.

На рис. 4 изображена схема экспериментальной установки.

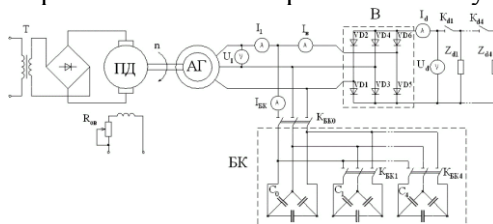


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

В результате экспериментов построены внешние характеристики АВГ для различных значений емкости возбуждения. Аналитический расчет внешних характеристик по математической модели АВГ, полученной во второй главе, для условий, соответствующих проведенным экспериментам, выполнен при помощи пакета прикладных математических программ Mathcad. В результате сравнения результатов максимальная погрешность составила 6,6 % (рисунок 5), что позволяет сделать вывод о достаточной адекватности построенной математической модели АВГ.

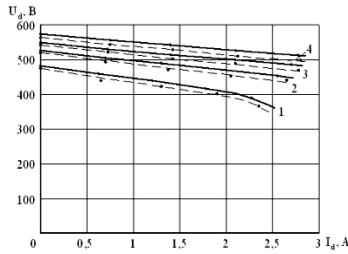


Рисунок 5 – Внешние характеристики АВГ:
 1 – при $C=8$ мкФ; 2 – при $C=10$ мкФ; 3 – при $C=12$ мкФ; 4 – при $C=14$ мкФ;
 - - - - экспериментальные кривые; — — — — расчетные кривые

В третьей главе также приводится полученное в ходе эксперимента и расчетным путем семейство кривых, соответствующих стабилизированному выходному напряжению $U_d = 515$ В при изменяющихся значениях мощности нагрузки P_d , емкости конденсаторов возбуждения C и частоты вращения генератора n (рисунок 6). Пунктирная кривая соответствует номинальному току статора $I_{с ном}$, то есть режимы работы АВГ на характеристиках, расположенных выше этой кривой, приводят к перегрузке генератора и не могут являться длительными.

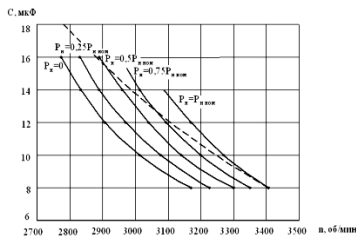


Рисунок 6 – Кривые зависимостей для $U_d = 515$ В при $C=\text{var}$, $n=\text{var}$, $P_d=\text{var}$

Полученные зависимости показывают, что стабилизированное напряжение может быть получено посредством изменения в различных комбинациях емкости конденсаторов возбуждения C и частоты вращения ротора генератора n .

В **четвертой** главе сформулированы принципы дискретно-непрерывного двухканального способа стабилизации напряжения источника питания автономной СЭС на основе АВГ.

На основании проведенных исследований сделан вывод, что дискретно-непрерывный двухканальный способ стабилизации выходного

напряжения источника питания на основе АВГ позволяет добиться высокой точности поддержания заданного значения напряжения.

На рисунке 7 приведена функциональная схема системы, реализующей дискретно-непрерывный двухканальный способ стабилизации выходного напряжения источника питания на основе АВГ. В ее состав входят два основных контура управления – контур частоты вращения n ротора АГ и контур емкости C батареи конденсаторов возбуждения БК, а также два вспомогательных контура – контур контроля тока статора I_1 и контур включения АВГ на нагрузку.

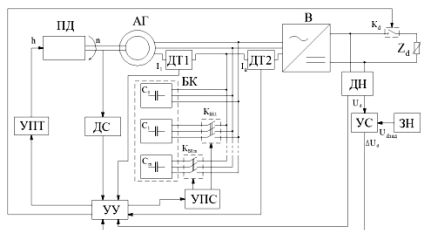


Рисунок 7 – Функциональная схема системы, реализующей дискретно-непрерывный двухканальный способ стабилизации выходного напряжения источника питания на основе АВГ

Контур частоты вращения ротора АГ построен по принципу непрерывной системы. Датчик частоты вращения передает в УУ информацию о значении n , который после оценки сигнала рассогласования $\Delta U_d = U_{d \text{ зад}} - U_d$, поступающего с устройства сравнения УС, формирует соответствующий сигнал управления для устройства подачи топлива УПТ. Сигнал $U_{d \text{ зад}}$ вырабатывается задатчиком напряжения ЗН. Контур частоты вращения обеспечивает плавное изменение U_d в некотором диапазоне, при этом значение частоты вращения ротора генератора не должно выходить за пределы заданного интервала $\Delta n_{\text{опт}}$.

Контур емкости батареи конденсаторов изменяет выходное напряжение U_d дискретно. Значение дискретности определяется емкостью ступеней батареи $C_0 - C_m$. Общая емкость БК определяется положением контактов $K_{BK1} - K_{BKm}$, которые включаются и отключаются под устройства переключения ступеней УПС. УПС получает управляющие сигналы от УУ, которое реагирует на значение тока выпрямителя I_b , получаемое с ДТ2. Контур емкости построен по принципу системы релейного действия.

На рисунке 8 изображена структурная схема описанной системы стабилизации без учета вспомогательных контуров. Основу системы стабилизации составляет устройство УУ, реализующее заданный алгоритм.

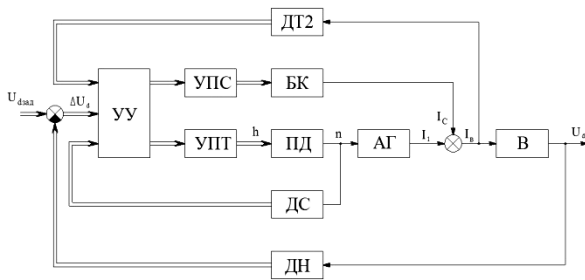
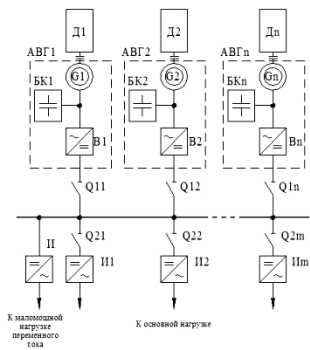


Рисунок 8 – Структурная схема системы дискретно-непрерывной двухканальной стабилизации напряжения источника питания на основе АВГ

Применение разработанного дискретно-непрерывного двухканального способа стабилизации напряжения позволяет значительно расширить область применения источников питания автономных СЭС на основе АВГ, поскольку для его реализации используются уже существующие технические устройства с большим диапазоном номинальных мощностей. Из источников питания на основе АВГ с разработанным способом стабилизации напряжения можно построить силовой блок электротехнического комплекса с частотно-регулируемыми приводами, например буровой установки. Схема такой автономной СЭС показана на рисунке 9.



Рисунке 9 – Упрощенная схема автономной СЭС с источниками на основе

асинхронных вентильных генераторов: Д – приводной двигатель; Г – асинхронный генератор; Q – выключатель; В – выпрямитель; И – инвертор; БК – батарея конденсаторов возбуждения; АВГ – асинхронный вентильный генератор

Предлагаемая схема автономной СЭС включает в себя n силовых агрегатов – АИЭ, состоящих из приводного двигателя Д и АВГ. Силовые агрегаты подключены к общей шине через выключатели Q11 – Q1n. Со стороны потребителей по сравнению с вариантом получения питания от автономных СЭС, построенных по традиционной схеме, изменения имеют направленность на упрощение структуры. В асинхронных частотно-регулируемых приводах отпадает необходимость в промежуточном выпрямительном звене. Для электроснабжения потребителей переменного тока устанавливается инвертор И, мощность которого незначительна по сравнению с мощностью основной нагрузки. Кроме того, внутренние сети автономной СЭС такой структуры будут работать в более экономичном режиме, поскольку электроэнергия передается на постоянном токе.

Заключение

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. На основе анализа схем автономных СЭС обоснована целесообразность применения асинхронных вентильных генераторов (АВГ) в составе автономных источников электроэнергии СЭС с частотно-регулируемым приводом. Установлено, что расширению области применения источников питания на основе АВГ препятствует несовершенство существующих систем стабилизации напряжения АГ.

2. Построена математическая модель АВГ, учитывающая изменение индуктивного сопротивления цепи намагничивания статора генератора в зависимости от частоты вращения ротора. Адекватность модели подтверждена физическим экспериментом на установке с асинхронной машиной. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что регулировать выходное напряжение АВГ целесообразно путем изменения емкости конденсаторов возбуждения и частоты вращения генератора.

3. Предложен дискретно-непрерывный двухканальный способ стабилизации напряжения источника питания автономной системы электроснабжения на основе АВГ и разработана структурная схема системы, реализующей разработанный способ стабилизации напряжения. Разработана методика выбора параметров источника питания автономной системы электроснабжения на основе АВГ, для реализации дискретно-непрерывного двухканального способа стабилизации напряжения.

4. Применение предложенного способа стабилизации напряжения источника питания на основе АВГ позволяет уменьшить погрешность поддержания заданного значения напряжения и повысить экономичность приводного двигателя.