

АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Научное издание
к 90-летию Юбилею Кубанского госагроуниверситета
и к 60-летию Юбилею кафедры Электротехники

**Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю.,
Алмазов В.В., Квитко А.В.**

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет»

**О.В. Григораш, С.В. Божко, А.Ю. Попов,
В.В. Алмазов, А.В. Квитко**

АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

М о н о г р а ф и я

К р а с н о д а р
2012

УДК 621.314
ББК 31.261
Г83

Рецензенты: зав. кафедрой «Электротехники» Кубанского ГТУ, заслуженный деятель науки и техники РФ, д.т.н., профессор Б.Х.Гайтов; зав. кафедрой «Электрических машин и электропривода» КубГАУ, д.т.н., профессор Оськин С.В.

Григораш О.В.
Г83 Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы: монография / Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю., Алмазов В.В., Квитко А.В. – Краснодар. 2012. – 174 с.

ISBN 978-5-94672-350-3

В монографии проводится анализ основных эксплуатационно-технических характеристик электромеханических генераторов электроэнергии стационарных и транспортных систем автономного электроснабжения. Рассматриваются перспективы развития и предлагаются новые технические решения автономных источников, выполненных на базе бесконтактных электрических машин.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, специализирующих в области проектирования систем автономного электроснабжения.

Библ. 38, ил. 60, табл. 5.

УДК 621.314
ББК 31.261

ISBN 978-5-94672-350-3

© Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю., Алмазов В.В., Квитко А.В.
© ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
 1 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ...	8
1.1 Автономные источники электроэнергии летатель- ных аппаратов.....	8
1.2 Состав и режимы работы систем электроснаб- жения летательных аппаратов.....	18
1.3 Автономные источники стационарных и транспорт- ных систем электроснабжения.....	28
 2 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	36
2.1 Анализ достоинств и недостатков автономных источников.....	36
2.2 Параметры электроэнергии автономных источников	43
2.3 Синхронные генераторы с постоянными магнитами..	47
2.4 Особенности работы и достоинства асинхронных генераторов.....	54
 3 УСТРОЙСТВА СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	62
3.1 Стабилизаторы напряжения генераторов постоян- ного тока.....	62
3.2 Стабилизаторы напряжения и частоты тока синхрон- ных генераторов.....	67
3.3 Стабилизатор напряжения двухмашинного преобра- зователя.....	74
3.4 Стабилизатор напряжения трехмашинного преобра- зователя.....	82
3.5 Стабилизаторы напряжения синхронного генерато- ра с постоянными магнитами.....	85

3.6 Стабилизаторы напряжения асинхронного генератора	92
4 ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	107
4.1 Основные ограничения для бесконтактных генераторов с приводом от высокоскоростных двигателей.....	107
4.2 Потери и КПД бесконтактных высокоскоростных генераторов.....	111
4.3 Удельная масса и предельная мощность бесконтактных высокоскоростных генераторов.....	117
4.4 Методика расчета массогабаритных показателей и КПД асинхронных генераторов.....	120
4.5 Методика расчета массогабаритных показателей и КПД синхронных генераторов с постоянными магнитами.....	126
4.6 Особенности расчета бесконтактных генераторов постоянного тока.....	136
5 ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	141
5.1 Этапы проектирования автономных систем Электроснабжения.....	141
5.2 Критерии эффективности систем автономного электроснабжения.....	144
5.3 Способы выбора оптимальной структуры автономной системы электроснабжения.....	152
5.4 Структурные решения автономных систем с улучшенными техническими характеристиками.....	159
5.5 Модульное построение автономных систем.....	162
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	169
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	170

ОСНОВНЫЕ ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АГ	- асинхронный генератор;
АИЭ	- автономный источник электроэнергии;
БВГ	- бесконтактные высокоскоростные генераторы;
БЭМ	- бесконтактная электрическая машина;
ВГ	- вентильный генератор;
ВПД	- высокоскоростной приводной двигатель;
ГПТ	- генератор постоянного тока;
ДЭС	- дизель-электрическая станция;
КПД	- коэффициент полезного действия;
ЛА	- летательный аппарат;
МГП	- массогабаритные показатели;
МДС	- магнитодвижущая сила;
НПЧ	- непосредственный преобразователь частоты;
ПД	- приводной двигатель;
ПЭ	- преобразователь электроэнергии;
САЭ	- система автономного электроснабжения;
СБЭ	- система бесперебойного электроснабжения;
СГ	- синхронный генератор;
СГВВ	- СГ с вращающимися выпрямителями;
СГПМ	- СГ с постоянными магнитами;
СПЭ	- статический преобразователь электроэнергии;
СУ	- система управления;
СЭС	- система электроснабжения;
ФУ	- функциональный узел;
ЭДС	- электродвижущая сила;
ЭМГ	- электромеханические генераторы;
ЭМП	- электромашинный преобразователь;
ЭТХ	- эксплуатационно-технические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Важная роль в стационарных и транспортных (бортовых, корабельных и т.п.) системах автономного электроснабжения (САЭ) отводится автономным источникам электроэнергии (АИЭ). Практически от эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) автономных источников зависят ЭТХ передвижных автономных систем в комплексе.

Анализируя основные характеристики дизельных электростанций (ДЭС) и их синхронных генераторов (СГ) можно сделать вывод, что КПД таких систем мощностью до 200 кВт не превышает 35 % (КПД генераторов находится в пределах 90 – 94%), а удельная масса с учетом блоков автоматического управления превышает 20 кг/кВт . Ресурс непрерывной работы ДЭС определяется ресурсом работы дизельных двигателей.

Генераторы постоянного тока (ГПТ), которые применяются в САЭ, как правило, в качестве резервных источников мощностью до 30 кВт имеют КПД ниже КПД, чем у СГ (85 – 90 %), кроме того, ГПТ имеют ниже показатели надежности. Основным их преимуществом являются не сложные технические решения системы стабилизации напряжения.

Отечественной промышленностью освоен выпуск СГ с вращающимися выпрямителями (СГВВ) мощностью 10 – 2500 kVA , частотой вращения ротора 750 - 1800 об/мин , имеющие КПД 0,82 – 0,95 и удельную массу 3,6 – 18 кг/кВт .

Общие недостатки СГВВ связаны с относительно сложной силовой электрической схемой и наличием на роторе обмоток, полупроводниковых приборов, защитных элементов, фильтров и т.п., что снижает надежность его работы, ограничивает предельно допустимые частоты вращения ротора и температуры.

АИЭ бортовых систем имеют улучшенные ЭТХ. Здесь основной причиной является повышенная частота вращения приводного двигателя (ПД). Высокие частоты вращения ПД и соответственно повышенная частота напряжения переменного

тока, позволяет значительно снизить габариты и вес генераторов и преобразователей электроэнергии, повысить качество напряжения постоянного тока и быстродействие систем защиты и стабилизации параметров электроэнергии САЭ.

Однако для существенного улучшения ЭТХ автономных систем электроснабжения (увеличения времени непрерывной и необслуживаемой работы, повышение КПД и показателей надежности, уменьшения массы и габаритов) необходимы новые принципы и методы их конструирования, заключающиеся в внедрении новых технических решений АИЭ и их систем стабилизации параметров.

Перспективным направлением улучшения ЭТХ автономных источников и САЭ является использование в их структуре бесконтактных электромеханических генераторов электроэнергии: синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ), асинхронных генераторов с емкостным возбуждением (АГ) и вентильных генераторов (ВГ).

В монографии рассматриваются типовые структурные схемы САЭ, особенности работы АИЭ, проводится анализ основных технических электромеханических генераторов электроэнергии стационарных и транспортных систем. Предлагаются новые технические решения систем стабилизации параметров электроэнергии АИЭ, выполненных на базе бесконтактных электрических машин и рассматриваются особенности их расчетов и проектирования.

Глава 1

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ В
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ****1.1 Автономные источники электроэнергии летательных аппаратов**

Выбор и использование на борту летательного аппарата (ЛА) определенного типа генератора электроэнергии, а также их количество, зависит от многих факторов, основными из которых являются: используемый тип бортовой системы электроснабжения, суммарная мощность потребителей электроэнергии по переменному и постоянному току, требуемое качество электроэнергии, условия эксплуатации, массогабаритные показатели, а также требования надежности.

В системах электроснабжения (СЭС) современных ЛА нашли применение различные типы авиационных генераторов, в том числе синхронные генераторы типов *СГС*, *СГО*, *ГО*, *СГК*. Большое применение имеют генераторы переменного тока нестабильной частоты: однофазные, серии *СГО* (*СГО – 8*, *СГО – 12*, *СГО – 30*) и трехфазные, серии *СГС* (*СГС – 75*, *СГС – 30*, *СГС – 90*). Основным недостатком этих генераторов является наличие щеточного контакта, что снижает их показатели надежности и КПД.

В связи с этим широкое применение в настоящее время нашли бесконтактные генераторы переменного тока. К ним относятся генераторы с вращающимися выпрямителями (СГВВ), генераторы с внутризамкнутым магнитопроводом (типа «сексин») и магнитоэлектрические генераторы с возбуждением от постоянных магнитов.

Генераторами с вращающимися выпрямителями являются генераторы серии ГТ мощностью 8, 16, 30, 40, 60, 90, 120 кВт·А. Генераторами с внутризамкнутым магнитопроводом типа «сексин» являются генераторы типа *СГС – 30/1,5* и *СГС – 11/1,5*.

Магнитоэлектрические генераторы (с возбуждением от постоянных магнитов) используются в качестве тахогенераторов и генераторов в электромашинных трехфазных преобразователях.

Особое внимание в работе авиационных генераторов отводится вопросу их охлаждения. Основной задачей охлаждения является обеспечение таких нагревов отдельных частей машины, которые допустимы для применения в машине конструктивных, магнитных и изоляционных материалов.

Эффективность охлаждения в значительной мере определяет допустимые удельные электрические нагрузки и, следовательно, влияет на снижение массы генераторов.

В настоящее время можно выделить следующие системы охлаждения: самовентиляция, продув забортного воздуха, продув с самовентиляцией, испарительное и распылительное охлаждение.

Широко применяются в истребительной авиации бортовые генераторы переменного тока - *ГТ30НЖЧ12*. На самолете СУ-27 используется два таких генератора, а на самолете МиГ-29 - один.

Принципиальная силовая электрическая схема генератора *ГТ30НЖЧ12* приведена на рис.1.1. В генераторах этого типа используется двухступенчатая система возбуждения.

Принцип работы *ГТ30НЖЧ12* заключается в следующем. При вращении ротора в рабочей обмотке подвозбудителя (РОП) индуцируется ЭДС, которая выпрямляется в выпрямителе и подается на обмотку возбуждения возбудителя (ОВВ). В рабочей обмотке возбудителя (РОВ) наводится ЭДС, выпрямляемая диодами *VD 1...6*, которая затем поступает на обмотку возбуждения генератора (ОВГ). Созданное ОВГ магнитное поле будет наводить в рабочей обмотке генератора (РОГ) переменную синусоидальную ЭДС. На выходных клеммах генератора снимается трехфазное напряжение $\sim 208/115$ В частотой 400 Гц. Стабилизация выходного напряжения осуществляется изменением тока возбуждения возбудителя в выпрямителе-регуляторе за счет введения отрицательной обратной связи.

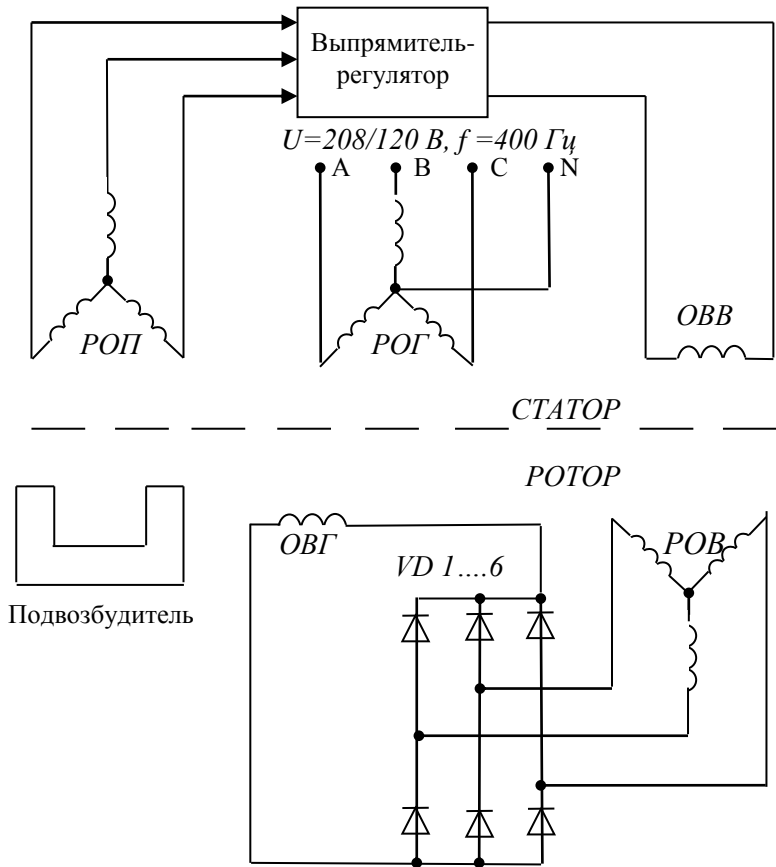


Рисунок 1.1 – Принципиальная электрическая схема Т30НЖЧ12:
РОП – рабочая обмотка подвозбудителя, ОВВ – обмотка возбуждения
возбудителя, РОГ – рабочая обмотка генератора, РОВ – рабочая обмотка
возбудителя, ОВГ – обмотка возбудителя генератора

Система охлаждения генератора представляет собой замкнутую распылительную систему, использующую авиационное

масло ИМП – 10. Масло подается из маслосистемы объединенного привод-генератора и является рабочей жидкостью гидропривода. Объем используемого масла в каждом ГП-21 составляет 4 литра.

Основным достоинством этого типа генераторов является отсутствие щеточно-коллекторного узла, кроме того, они имеют хорошие массогабаритные показатели и высокую надежность.

К недостаткам, в первую очередь, необходимо отнести требование стабильной частоты вращения ротора генератора. Это вызвано зависимостью частоты генерируемого напряжения от частоты вращения ротора. Для стабилизации частоты вращения в СЭС перед ГТ30НЖЧ12 вводят гидропривод лопаточный ППЛ-40 и электромуфту, обеспечивающие постоянную частоту вращения ротора генератора (ППЧВ). Генератор, ППЛ-40 и электромуфта образуют узел ГП-21. И если ГТ30НЖЧ12 отказывает очень редко (7 - 8 %), то ГП-21 имеет низкую надежность и часто выходит из строя (44 - 47%, табл. № 1.1).

Таблица № 1.1 – Отказы бортовых источников электроэнергии системы электроснабжения ЛА

СУ-27		МиГ-29	
Наименования узлов и агрегатов СЭС	Процент отказов и неисправностей	Наименования узлов и агрегатов СЭС	Процент отказов и неисправностей
ГТ30НЖЧ12	8 %	ГТ30НЖЧ12	7 %
ГП-21	44 %	ГП-21	47 %
ПТС-800БМ	26 %	ГСП-СТ-12/40А	9 %
ВУ-6Б	12 %	ТР-1,5/0,2	6 %
АБ 20НКБН-25	10 %	ПТО-1000/1500	18 %
		АБ 15СЦС-25	13 %

Кроме того, применение ППЧВ увеличивает массу генераторного узла в 2,5 раза, объема в 1,4 раза.

Так же к недостаткам *ГТ30НЖЧ12* относят его сравнительно низкий КПД и высокую себестоимость.

Структурная схема бортового АИЭ переменного тока на базе *СГ - ГТ30НЖ412* самолета *СУ-27*, для *МиГ-29* приведена на рис.1.2.

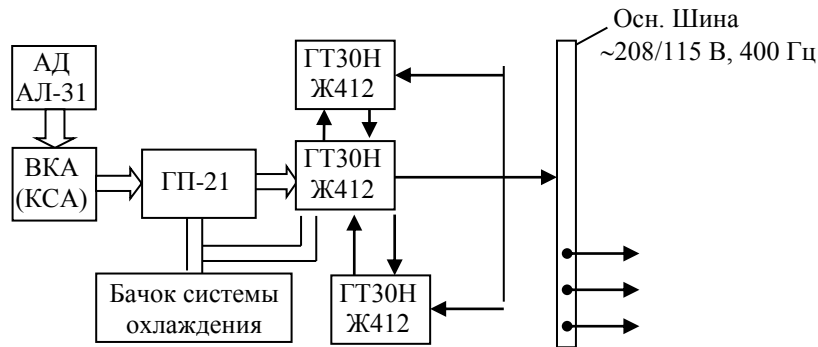


Рисунок 1.2 - Структурная схема АИЭ переменного тока на базе СГ

Крутящий момент от ротора высокого давления АД через выносную коробку привода агрегатов ВКА передается на гидропривод ГП-21. ГП обеспечивает постоянную частоту вращения ротора генератора – 12000 об/мин. , т.к. обороты АД самолета *СУ-27* изменяются от 9300 до 13300 об/мин в зависимости от режима работы двигателя. Бачок системы охлаждения используется для охлаждения генератора во время работы и хранения рабочей жидкости гидропривода. Для управления работой и защиты генератора от КЗ в схеме используется блок *БЗУСП-376Т*. Для регулирования генерируемого напряжения используется блок *БРН-120Т5А*. Блоки имеют следующие МГП. БЗУ: масса – 7 кг , объем – $0,004 \text{ м}^3$; БРН: масса – 5 кг , объем – $0,003 \text{ м}^3$.

Генератор вырабатывает линейное напряжение $U_{\text{л}} = 208 \text{ В}$ и фазное $U_{\text{ф}} = 115 \text{ В}$ частотой 400 Гц , которое по основной шине поступает к потребителям.

Необходимо отметить, что разработка бортового источника электроэнергии повышенной надежности для систем электропитания летательных аппаратов является задачей, требующей, с одной стороны, учета возрастающих требований со стороны бортовых потребителей электроэнергии, с другой стороны, широкого внедрения последних достижений в науке и технике.

Целесообразно рассмотреть распределение отказов и неисправностей узлов и агрегатов в системах электроснабжения летательных аппаратов. Для этого СЭС ЛА разделим на три группы: источники электропитания - 1 группа; аппаратура защиты, регулирования и управления - 2 группа; органы управления, индикации и сигнализации - 3 группа. Отказы в процентах по группам распределяются следующим образом: 1 группа – 26% на самолете *СУ-27* и 28% на *МиГ-29*; 2 группа – 46% и 43% соответственно и 3 группа – 28% и 29% . В 1-й группе наиболее часто отказываемыми являются гидроприводы *ГП-21*: 11% и 10% , во 2-й группе – предохранители: 26% и 29% , в 3-й группе - лампочки индикации и сигнализации (15% и 16%).

Если отказ предохранителей определяется их функциональным назначением, а отказ лампочек в полете абсолютно не влияет на продолжение полета, то низкая надежность ГП-21 в этих условиях существенно снижает безопасность полетов.

Если взять общее количество отказов и неисправностей бортовых источников электроэнергии СЭС ЛА за 100% , то распределение в процентах для самолетов *СУ-27* и *МиГ-29* представлено в табл. № 1.1.

Из табл. 1.1 видно, что отличия для разных самолетов составляют не более 3% . Наименее надежными в группе источников электропитания являются гидроприводы ГП-21 (44% и 47%), а также преобразователи ПТС-800БМ и ПТО-1000/1500 (26% и 18%).

Из вышесказанного следует, что основными направлениями повышения надежности АИЭ систем электроснабжения ЛА являются следующие:

повышение надежности приводов постоянной частоты вращения роторов синхронных генераторов;

переход от синхронных генераторов к асинхронным, не требующим стабилизации частоты вращения ротора, что позволит исключить ППЧВ из схемы СЭС;

повышение надежности коллекторно-щеточных узлов преобразователей электроэнергии;

улучшение характеристик устройств стабилизации параметров электроэнергии.

В табл. 1.2 приводится состав АИЭ самолетов МиГ-29, СУ-27, СУ-25. Как видно из табл. № 1.2 бортовые источники электроэнергии делятся на три группы: первичные, вторичные и аварийные источники питания (ИП). Каждая группа содержит источники постоянного тока и переменного тока, так же указываются типы приводов генераторов.

К первичным ИП относятся генераторы, которые приводятся во вращение авиадвигателями, во вторичных ИП электроэнергия получается преобразованием электроэнергии первичных ИП.

Из табл. № 1.2 видно, что для обеспечения требуемой надежности в электропитании бортового оборудования самолета используется аварийная система электроснабжения.

Наиболее широко применяемыми на современных ЛА среди генераторов переменного тока являются генераторы ГТ30НЖЧ12, среди генераторов постоянного тока ГСР-СТ-12/40А; преобразователи ПТО-1000/1500, ПТС-800 БМ; аккумуляторные батареи 20-НКБН-25, 15СЦС-45Б. Также широкое применение в бортовых СЭС нашли трансформаторно-выпрямительные устройства (Тр-1,5/0,2; ВУ-6Б).

Конструкторское бюро «МиГ» использует в схеме первичной СЭС один генератор по постоянному току (ГСР-СТ) и один генератор по переменному току (ГТ30), в качестве аварийных средств один ПР (ПТО-1000/1500) и две АБ (15СЦС).

Конструкторское бюро «СУ» использует в схеме первичной СЭС только генератор по переменному току (ГТ30), но в ко-

личестве двух штук. В качестве источника постоянного тока используются три выпрямительных устройства (ВУ-6Б). Аварийные источники – один ПР (ПТС-800БМ) и две АБ (20НКБН).

Таблица № 1.2 – Состав АИЭ современных типов ЛА

Тип ЛА	Вид СЭС ЛА	Тип привода генератора	Первичные ИП	Вторичные ИП	Аварийные ИП
			Генератор	Тип источника электроэнергии	
МиГ-29	~I	ГП-21 (1 шт.) или ПГЛ-40	ГТ30НЖЧ12 (1 шт.)	Тр-1,5/0,2 (1 шт.)	ПТО-1500/1500 (1 шт.)
	=I	КСА	ГСР-СТ-12/40А (1 шт.)	-	АБ 15СЦС-45Б (2 шт.)
СУ-27	~I	ГП-21 (2 шт.)	ГТ30НЖЧ12 (2 шт.)	-	ПТС-800БМ (2 шт.)
	=I	-	-	ВУ-6Б (3 шт.)	АБ 20НКБН-25 (2 шт.)
СУ-25	~I	КСА	ГО4ПЧ (2 шт.)	ПТО-1000/1500 (2 шт.)	-
	=I	КСА	ГСР-СТ-12/40А (2 шт.)	-	АБ 20НКБН-25 (2 шт.)

В табл. № 1.3 приводятся основные характеристики источников питания СЭС самолетов СУ-27 и МиГ-29.

Из табл. 1.3 видно, что авиационные генераторы имеют низкий КПД, равный 0,55-0,59. Номинальная мощность $P_{ном}$ авиационных генераторов переменного тока (для истребительной и штурмовой авиации) не превышает 30 кВА, постоянного тока – 12 кВт.

Таблица № 1.3 - Основные ЭТХ АИЭ современных типов самолетов

Генератор			Привод генератора
1	2	3	4
<u>ГТ30НЖЧ12</u> $U_{ном} \sim 208/115$ В $P_{ном} = 30$ кВ·А $I_{ном} = 83,3$ А $F_{вращ} = 12000$ об/мин $f_{ном} = 400$ Гц КПД=0,55-0,59 $m = 13,3$ кг $V = 0,0058$ м ³	<u>ГСП-СТ-12/40 А</u> $U_{ном} = 28,5$ В $P_{ном} = 12$ кВт $I_{ном} = 420$ А $F_{вращ} = 4200-9000$ об/мин КПД=0,55-0,59 $m = 32,5$ кг $V = 0,0106$ м ³	<u>ГО4ПЧ</u> $U_{ном} \sim 120$ В $P_{ном} = 4$ кВ·А $I_{ном} = 34,7$ А $F_{вращ} = 4000$ об/мин $f_{ном} = 400$ Гц КПД=0,55-0,59 $m = 18$ кг $V = 0,01$ м ³	<u>ГП-21</u> (без ГТ30) $m = 24$ кг $V = 0,0137$ м ³ <u>КСА-3</u> $m = 105$ кг $V = 0,12$ м ³ ВКА $m = 79$ кг $V = 0,084$ м ³

Особенностью большинства потребителей электроэнергии на борту ЛА (до 95%) является их одновременная потребность в постоянном и переменном напряжении.

Массогабаритные показатели АИЭ определяются не генераторами, а, в первую очередь, приводами генераторов (электромуфта, гидропривод, коробка самолетных агрегатов и т.п.). Имеет место высокая себестоимость бортовых источников электроэнергии. Особенно это касается генераторов. Так себестоимость одного генератора переменного тока *ГТ30НЖЧ12* составляет около 15 тыс. долларов.

Необходимо отметить, что самолетные генераторы работают в жестких условиях, резко отличающихся от условий работы электрических машин общего назначения. Эти условия обусловлены широким диапазоном высоты и скорости полета, жест-

кими климатическими воздействиями, большими механическими нагрузками от вибраций, ударов, линейных и угловых ускорений. Высота полета современных самолетов достигает нескольких десятков тысяч метров, что соответствует уменьшению давления и плотности воздуха в десятки раз.

Высота полета влияет на теплоотдачу некоторых частей генератора, которая уменьшается по мере увеличения высоты, вследствие чего повышается температура генераторов. Чрезмерное повышение температуры отрицательно отражается на качестве свойств изоляционных материалов и на работе щеточно-коллекторного узла. Механические, вибрационные и ударные нагрузки приводят к разрушению мест пайки проводов и подшипников, к нарушению работы щеточно-коллекторных узлов, к ослаблению затяжки винтов и гаек, вызывают явление резонанса.

Исходя из указанных условий эксплуатации, к электромеханическим генераторам электроэнергии ЛА предъявляются следующие требования

- максимальная надежность и безопасность работы в условиях жестких климатических условий, механических нагрузок и вибраций;
- высокая прочность (механическая, электрическая, термическая) и химическая стойкость;
- большая перегрузочная способность;
- малый вес и габариты на единицу мощности;
- высокие показатели КПД;
- высокая стабильность и точность поддержания параметров электроэнергии (амплитуды, частоты и формы генерируемого напряжения);
- простота и безопасность эксплуатации;
- низкая стоимость.

Эти требования обусловили следующие особенности конструкции современных авиационных генераторов:

- привод генераторов переменного тока осуществляется, как правило, через привод постоянной частоты вращения;

- ротор имеет большую частоту вращения;
- в рабочих обмотках создается большая плотность тока;
- повышенный тепловой режим работы.

1.2 Состав и режимы работы систем электроснабжения летательных аппаратов

На современных ЛА имеются различные источники энергии: механические, гидравлические, пневматические, пиротехнические и электротехнические. Однако работа большинства самолетных систем обеспечивается использованием только электроэнергии как универсального источника энергии, обладающего следующими преимуществами

- легкостью преобразования в другие виды энергии;
- простотой передачи и распределения между приемниками;
- возможностью создания систем высокой надежности и живучести.

Как известно, СЭС летательного аппарата представляет собой совокупность устройств, необходимых для производства, преобразования, передачи и распределения электроэнергии требуемого качества в любых условиях полета. В ее состав входят источники электрической энергии, преобразователи рода тока и уровня напряжения, регулирующая, защитная и коммутационная аппаратура, системы передачи и распределения электрической энергии, приводы генераторов постоянного и переменного тока и другое оборудование.

Структура СЭС бортовых потребителей самолетов и вертолетов зависит от многих факторов: назначения и типа ЛА, требований к надежности электроснабжения, к качеству электроэнергии и др.

Надежность функционирования СЭС в значительной степени влияет на безопасность полетов. Это связано с тем, что работа всех ответственных агрегатов, в том числе авиадвигателей и

органов управления ЛА невозможна без потребления электрической энергии.

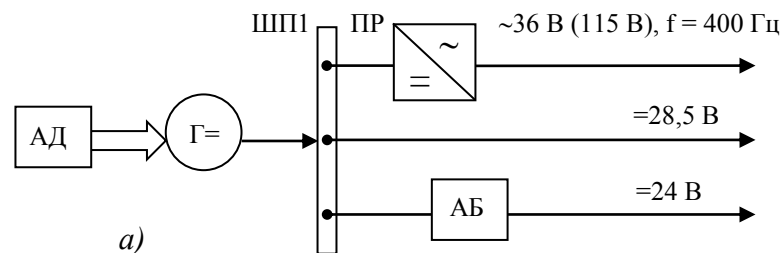
Одним из методов повышения надежности электроснабжения является резервирование основных источников питания. В настоящее время на самолетах и вертолетах в соответствии с существующими требованиями должны предусматриваться не менее двух независимых систем (подсистем) электроснабжения. Для приемников, без которых невозможно обеспечить безопасность полетов, предусматривается двух- и трехкратное резервирование питания от основных источников и питание от специальных аварийных (резервных) источников. В качестве аварийных и резервных источников используют аккумуляторные батареи (АБ), а также генераторы, приводимые во вращение от вспомогательной силовой установки или от выпускаемой в воздушный поток турбины.

В настоящее время на ЛА используются следующие виды СЭС

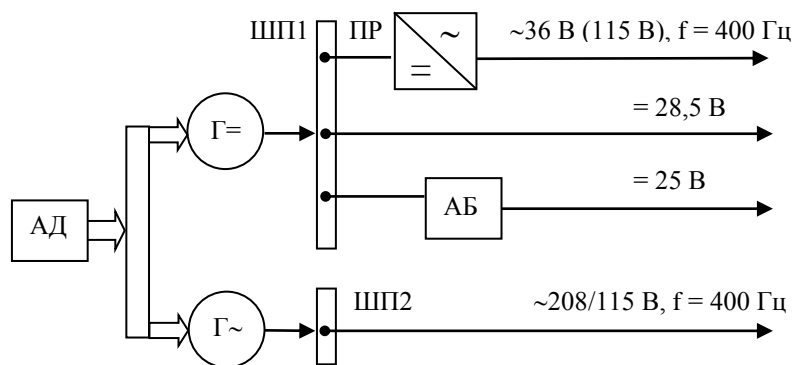
- постоянного тока с номинальным напряжением 28,5 В;
- переменного трехфазного тока стабильной частоты с номинальным напряжением 208 В;
- вторичная система переменного однофазного тока стабильной частоты с номинальным напряжением 115 В;
- переменного трехфазного тока нестабильной частоты с номинальным напряжением 208 В;
- вторичная система переменного трехфазного тока стабильной частоты с номинальным напряжением 208 В.

По схеме построения и параметрам электроэнергии СЭС могут быть сведены к пяти основным типам.

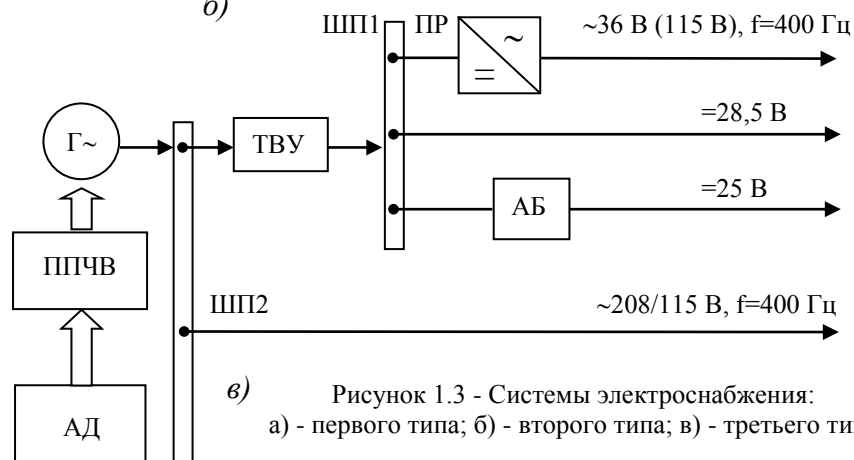
В системах первого типа (рис.1.3, а) в качестве основного источника электрической энергии используется генератор (Г) постоянного тока, приводимый во вращение непосредственно от авиационного двигателя (АД).



а)



б)



в)

Рисунок 1.3 - Системы электроснабжения:
а) - первого типа; б) - второго типа; в) - третьего типа

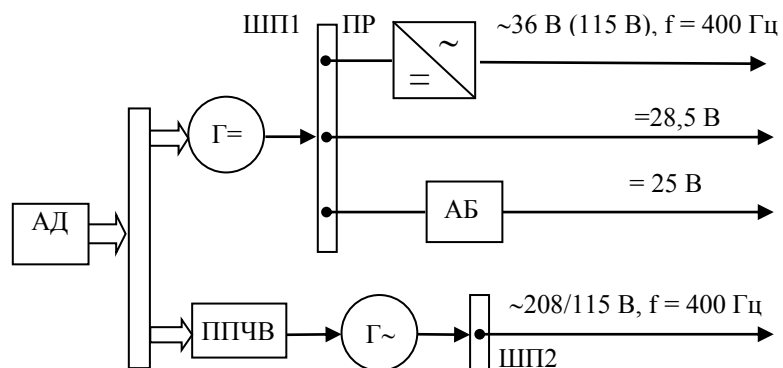
Выходное напряжение генератора постоянного тока равно $28,5 \text{ В}$. Переменный ток стабильной частоты 400 Гц различных уровней напряжения получается преобразованием постоянного тока в переменный с помощью статических или электромашинных преобразователей. Аварийным источником электрической энергии, как и в остальных типах систем, является аккумуляторная батарея, которая включается в сеть постоянного тока.

Второй тип систем (рис.1.3, б) – это смешанные системы, имеющие низковольтную систему постоянного тока, аналогичную СЭС первого типа, и систему переменного тока нестабильной частоты, предназначенную для питания приемников, работа которых не зависит от частоты тока. Источником переменного тока нестабильной частоты является генератор «Г~».

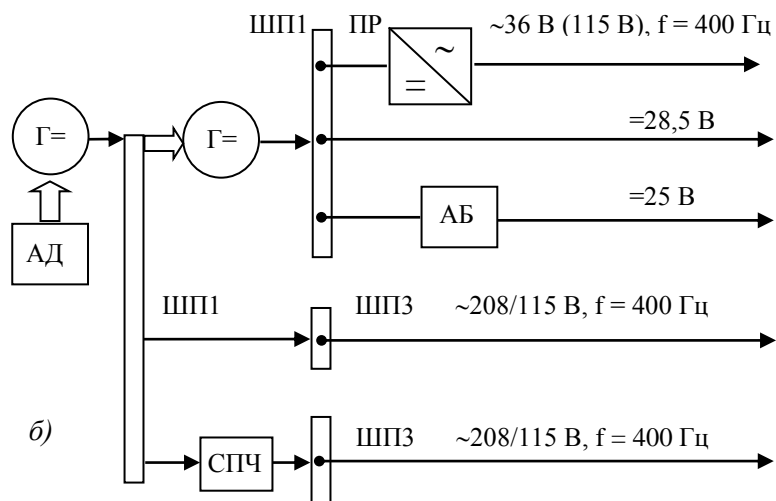
В системах третьего типа (рис.1.3, в) основой СЭС является система переменного тока стабильной частоты. Для стабилизации частоты тока генератор приводится во вращение от АД через специальное промежуточное устройство – привод постоянной частоты вращения (ППЧВ), выходной вал которого вращается с постоянной частотой независимо от частоты вращения вала АД. Постоянный ток напряжением $28,5 \text{ В}$ вырабатывается трансформаторно-выпрямительным устройством (ТВУ), подключаемым к сети переменного тока. Преобразователь ПР и АБ являются аварийными источниками электроэнергии.

В системах четвертого типа (рис.1.4, а) основными источниками электроэнергии являются генератор постоянного тока низкого напряжения «Г=» и генератор переменного тока стабильной частоты «Г~», приводимый во вращение от ППЧВ.

В пятом типе систем (рис.1.4, б) основным источником электроэнергии является генератор переменного тока нестабильной частоты «Г~». Переменный ток стабильной частоты вырабатывается с помощью статического преобразователя частоты (СПЧ), получающего электроэнергию от генератора «Г~». От этого генератора непосредственно получают питание и приемники переменного тока нестабильной частоты. Для получения постоянного тока напряжением $28,5 \text{ В}$ используются ТВУ.



а)



б)

Рисунок 1.4 - Системы электроснабжения:
а) - четвертого типа; б) - пятого типа

Аварийными источниками электроэнергии являются преобразователь СПЧ и АБ.

Первая и вторая группы СЭС в настоящее время применяются на небольших и средних самолетах (в частности первая группа применяется на самолетах Л-39).

На современных ЛА, особенно на тяжелых самолетах и вертолетах, а также на самолетах ГА, широкое применение нашла смешанная СЭС (типы третий, четвертый, пятый). Основным недостатком таких СЭС является их сложность и наличие большого числа коллекторных машин, а так же автономных сетей постоянного и переменного тока стабильной и изменяющейся частоты.

В связи с тем, что на современных типах ЛА мощность приемников переменного тока стабильной частоты продолжает возрастать, и поскольку 85% приемников электроэнергии можно перевести на питание переменным током, в настоящее время все большее распространение получают СЭС, обеспечивающие бесперебойное и качественное электроснабжение потребителей.

Бесперебойность электроснабжения предполагает такое обеспечение потребителей электроэнергией, при котором в случае аварийных режимов в системе электроснабжения потребителей не нарушается или имеется на время включения резерва перерыв, не влияющий на продолжение полета и выполнение задания.

Качество электрической энергии характеризуется стабильностью показателей, длительностью и характером переходных процессов. Оно зависит от многих факторов: принятой структуры и режимов работы системы, характеристик ее отдельных элементов, мощности и характера подключаемой нагрузки и др. Улучшая параметры качества электроэнергии, повышается эффективность работы многих приемников, увеличивается их срок службы, уменьшаются массогабаритные характеристики. В контексте этого вопроса остро встает проблема электромагнитной совместимости большого количества электро и радиотехнических систем на борту самолета. Исключение воздействия различных

электромагнитных помех, большая часть которых распространяется по цепям питания, является одной из первоочередных задач.

Энергетические показатели, как правило, оцениваются значением КПД. КПД определяет эффективность преобразования энергии и потери, по которым рассчитывается система охлаждения основных функциональных узлов, блоков и элементов СЭС.

При проектировании перспективных СЭС необходимо учитывать, что затраты на изготовление и эксплуатацию системы в течение заданного времени работы при заданной надежности должны быть минимальными. Требования по стоимости обычно находятся в противоречии с остальными требованиями к СЭС, и решение этой проблемы требует компромисса.

Если рассматривать основные режимы работы источников питания и СЭС в целом необходимо отметить следующее. Режимы работы АД (малый газ, крейсерский, максимал, форсаж) соответствуют нормальному (рабочему) режиму работы генераторов. Режим холостого хода составляет несколько секунд (после включения генератора летчик последовательно включает все оборудование). Помимо основного (нормального) режима генератор может работать в аварийном режиме в случае отказа в работе второго ИП (СЭС самолета СУ-27). В этом случае происходит перераспределение электроэнергии от рабочего генератора (преобразователя) между потребителями по их приоритету, причем второстепенные отключаются от питающей шины. Отключение генератора от бортсети осуществляется в случаях: а) КЗ; б) частота генерируемого напряжения выходит за пределы $396-404$ Гц; в) значение напряжения отличается от номинального более чем на 4 В.

Для анализа бортовых СЭС в качестве основных типов современных летательных аппаратов выбраны самолеты МиГ-29, СУ-27, СУ-25. Наиболее характерными целесообразно рассмотреть структурные схемы систем электроснабжения самолетов МиГ-29 и СУ-27.

СЭС самолета МиГ-29 (модификация «СЭ») (рис.1.5) предназначена для обеспечения питания бортовых потребителей

электроэнергией переменного 3-х фазного тока напряжением $36, 208/115$ В, $f = 400$ Гц и электроэнергией постоянного тока напряжением 28 В. СЭС состоит из левого и правого каналов. В каждом канале установлены основные и аварийные источники электроэнергии, коммутационная и регулирующая аппаратура на схеме не показана.

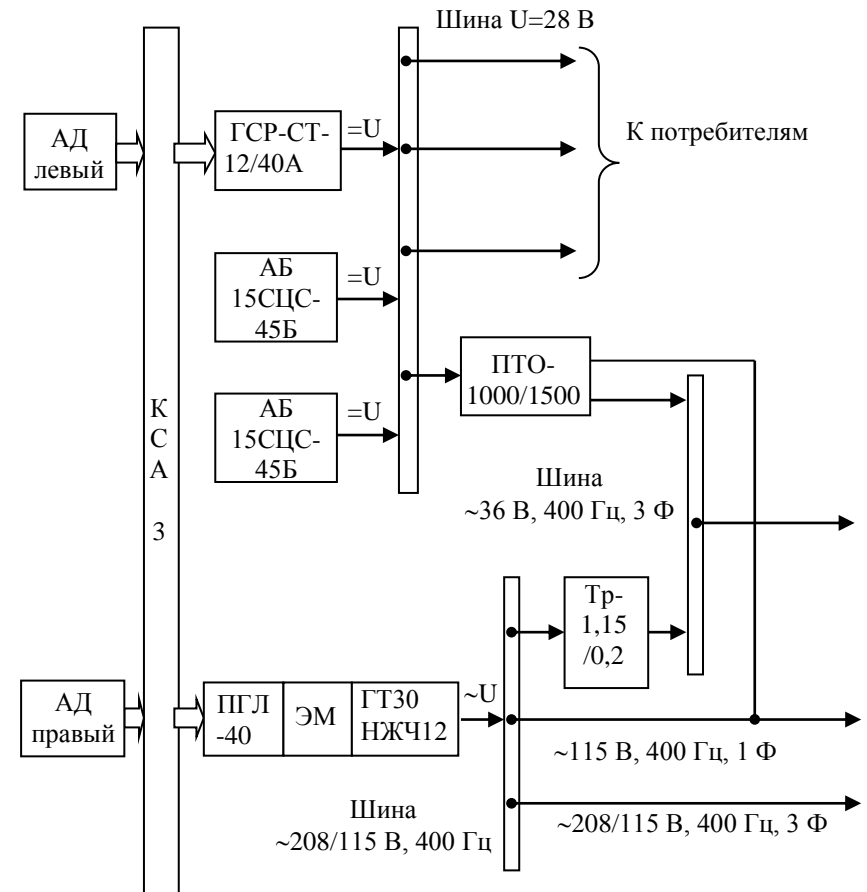


Рисунок 1.5 - Структурная схема системы электроснабжения самолета МиГ-29СЭ

Для генерирования постоянного и переменного токов используется вращение валов обоих (правого и левого) авиадвигателей. В качестве основного источника переменного тока используется генератор *ГТ30НЖЧ12*, а в качестве основного источника постоянного тока используется стартер-генератор *ГСП-СТ-12/40А*.

ГТ30НЖЧ12 представляет собой четырехполюсный бесщеточный синхронный генератор со встроенным трехфазным возбудителем переменного тока и вращающимся блоком выпрямителей, соединенных в мостовую схему, и предназначенных для питания обмотки возбуждения генератора постоянным током.

Так как нормальная работа генератора переменного тока *ГТ30НЖЧ12* возможна при условии постоянной частоты вращения ротора генератора с $n = 12000 \text{ об/мин.}$, а обороты АД изменяются в зависимости от режима его работы ($4340 - 8680 \text{ об/мин.}$), то в схему СЭС перед *ГТ30* вводят гидропривод лопаточный *ПГЛ-40* и электромуфту (ЭМ), обеспечивающие постоянную частоту вращения ротора генератора.

ГТ30НЖЧ12 генерирует $U \sim 208/115 \text{ В}$, 400 Гц , поэтому для получения $U \sim 36 \text{ В}$, 400 Гц , 3Φ в схеме используется трехфазный понижающий трансформатор (ТР) *Тр-1,5/0,2*.

Коробка самолетных агрегатов *КСА-3* выполняет функцию передаточного звена от АД к приводам генераторов *ГТ30НЖЧ12* и *ГСП-СТ12/40А*.

Стартер-генератор *ГСП-СТ-12/40А* – коллекторно-щеточный генератор, является основным источником постоянного тока. В двигательном режиме ГСП-СТ используется в качестве стартера для запуска газотурбинных авиационных двигателей.

Преобразователь тока *ПТО-1000/1500* является аварийным источником переменного тока (115 В , 400 Гц , 1Φ ; 36 В , 400 Гц , 3Φ).

Две аккумуляторные батареи *15СЦС-45* являются аварийными источниками по постоянному току ($= 24 \text{ В}$).

При отказе генератора постоянного тока *ГСП-СТ-12/40А* автоматически отключается система управления вооружением, режим «Посадка» системы навигации (СН) не включается, за-

крылки и тормозные щитки выпустить невозможно, может не выпуститься тормозной парашют и может не сработать система автоматического растормаживания колес, также пропадает радиосвязь, снижается яркость ламп. В этой ситуации выполнение полетного задания прекращается, в качестве источника постоянного тока ($U = 24 \text{ В}$) используются *АБ*. Время безопасного полета $15 - 25$ минут. При $U < 18 \text{ В}$ не обеспечивается индикация крена, тангажа и курса.

При отказе привод-генератора переменного тока (*ПГЛ*, *ЭМ*, *ГТ30*) в работу включается преобразователь *ПТО-1000/1500*. Однако выполнение полетного задания необходимо прекратить и следовать на аэродром посадки.

При отказе двух генераторов (*ГСП-СТ*, *ГТ30*) питание по постоянному и переменному току осуществляется от *АБ* и *ПТО*. Выполнение полетного задания прекращается. Время безопасного полета 15 минут.

Основные технические характеристики источников питания СЭС самолетов МиГ-29 и СУ-27 см.табл.1.2, 1.3.

СЭС самолета СУ-27 (рис.1.6) предназначена для обеспечения питания бортовых потребителей электроэнергией переменного трехфазного тока напряжением $208/115 \text{ В}$, $f = 400 \text{ Гц}$ и электроэнергией постоянного тока напряжением 28 В . СЭС состоит из левого и правого каналов. В каждом канале установлены основные и аварийные источники электроэнергии.

СЭС самолета СУ-27 состоит из системы генерирования электроэнергии переменного тока, вторичной системы генерирования постоянного тока и системы распределения электроэнергии постоянного и переменного тока.

В качестве основного ИП в обоих каналах установлены генераторы переменного тока *ГТ30НЖЧ12*.

Гидропривод *ГП-21* предназначен для обеспечения постоянной частоты вращения ротора генератора *ГТ30НЖЧ12*.

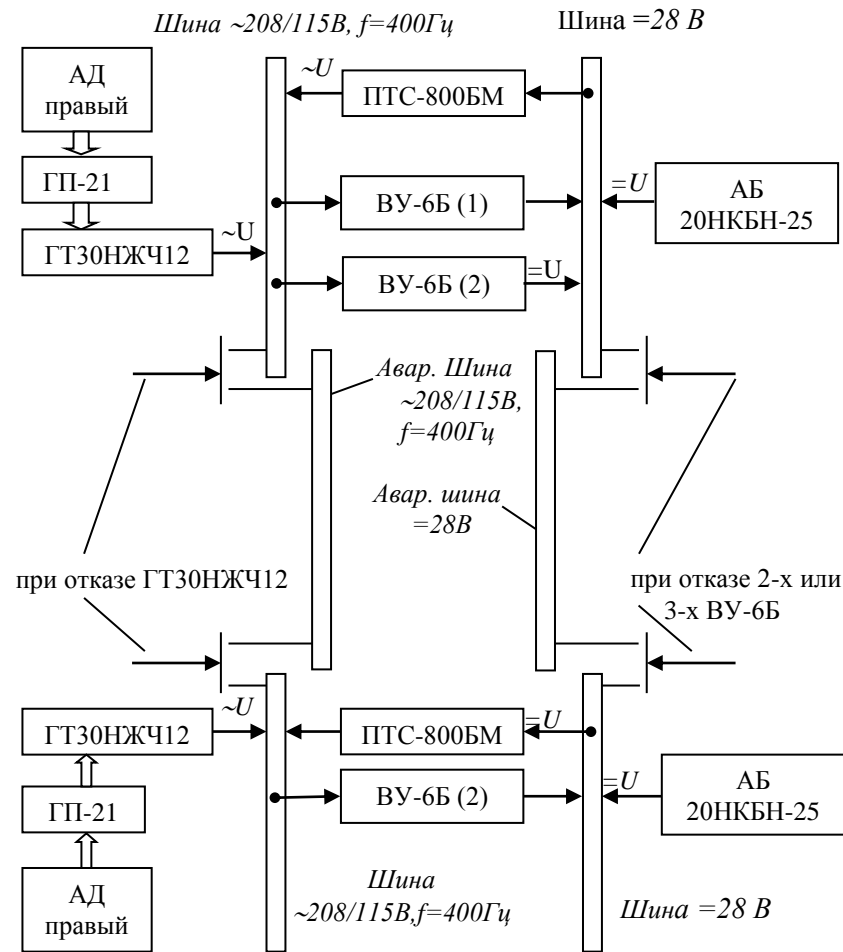


Рисунок 1.6 - Структурная схема системы электроснабжения самолета СУ-27

Для получения постоянного тока ($U=28В$) в схеме используются выпрямительные устройства (ВУ-6Б – 3 штуки, $P_{ном} = 6$

кВт каждый), конструктивно представляющие собой силовые 3-хфазные понижающие трансформаторы с блоком выпрямительных диодов каждый. В качестве аварийных ИП используются 2 преобразователя тока статических ПТС-800 БМ ($U = 200/115В, 400Гц, P_{ном} = 800ВА$) и аккумуляторные батареи 20НКБН-25 ($U=24В$). При отказе одного привод-генератора переменного тока (ГП-21, ГТ30) всю нагрузку на себя берет второй привод-генератор путем коммутации основной и аварийной шин. Задание прекращается, посадка осуществляется на ближайший аэродром.

При отказе двух привод-генераторов переменного тока питание по постоянному току осуществляется от АБ, по переменному току от ПТС- 800БМ. Время полета 10 минут. При $U < 20В$ возможен отказ некоторых потребителей. Отказ одного выпрямителя ВУ-6Б не влияет на выполнение полетного задания. Его функции выполняют остальные два выпрямителя.

При отказе двух выпрямителей ВУ-6Б отключается часть потребителей. Всю нагрузку на себя берет оставшийся выпрямитель. Задание прекращается, посадка осуществляется на ближайший аэродром. При отказе трех выпрямителей ВУ-6Б потребители переключаются на аварийные шины, которые получают питание от АБ. Время полета 20 минут. При $U < 20В$ возможен отказ некоторых потребителей.

1.3 Автономные источники стационарных и транспортных систем электроснабжения

В настоящее время известно большое число структурных решений САЭ. На рис.1.7 представлена обобщенная структурная схема стационарных и транспортных САЭ, где обозначены: дизель-электрическая станция - ДЭС; аккумуляторные батареи - АБ; статические преобразователи - выпрямители В1 и В2, инвертор И, конвертор К; электромашинные преобразователи – двухмашинный, выполненный на базе двигателя постоянного тока М1 и синхронного генератора СГ1 и трехмашинный преобразователь, выполненный на базе двигателя

переменного и постоянного тока соответственно $M2$ и $M3$, и синхронного генератора $CG2$; шины гарантированного электроснабжения переменного $III1$ и постоянного $III2$ токов.

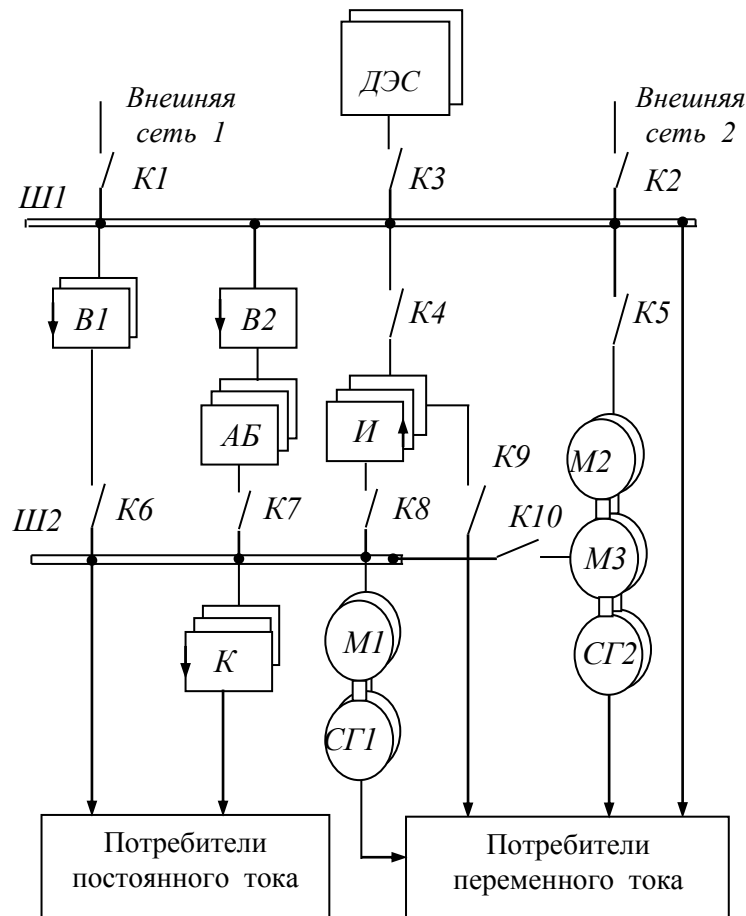


Рисунок 1.2 - Обобщенная структурная схема САЭ

В основном режиме работы стационарных САЭ питание потребителей электроэнергией обеспечивается по основному вводу «Внешняя сеть 1» или дополнительному вводу «Внешняя сеть 2», как правило, передвижные системы также имеют аналогичные входы. Дизель-электрическая станция ДЭС является резервным источником электроэнергии, аккумуляторные батареи АБ - аварийный источник. Для повышения надежности электроснабжения резервные источники, полупроводниковые и электромашинные преобразователи имеют резерв однотипных источников и преобразователей.

Когда источниками питания для потребителей электроэнергии является внешняя сеть или ДЭС (включены контакторы $K1$ или $K2$ или $K3$), и соответственно, контактор $K6$. Потребители постоянного тока получают питание от шины $III2$, а переменного от шины $III1$. В этих режимах аккумуляторные батареи АБ находятся в режиме непрерывного подзаряда от выпрямителя $B2$. Для обеспечения бесперебойности электроснабжения, при исчезновении напряжения на двух внешних вводах, на время запуска ДЭС (30 – 50 с) потребители переменного тока получают питание от двухмашинного преобразователя электроэнергии $M1 - CG1$, питание которого, как и потребителей постоянного тока, осуществляется от аккумуляторных батарей АБ. Длительность перерыва электроснабжения потребителей переменного тока в этом случае определяется временем запуска двухмашинного преобразователя и находится в пределах 2 – 3 с.

Если же потребители электроэнергии не допускают разрыва кривой питающего напряжения, то применяются структуры САЭ с использованием трехмашинных преобразователей. Потребители переменного тока в этом случае получают питание от постоянно вращающегося трехмашинного преобразователя $M2 - M3 - CG2$. При этом, в нормальном режиме работы привод синхронного генератора $CG2$ осуществляется асинхронным двигателем $M2$, а при прекращении электроснабжения от шины $III1$ привод $CG2$ осуществляется

двигателем постоянного тока $M3$ источником питания которого являются аккумуляторные батареи $АБ$.

Иногда в САЭ с двухмашинными преобразователями используются инерционные маховики, которые размещаются на валу между электрическими машинами. В этом случае при прекращении электроснабжения от внешней сети за счет массы маховика обеспечивается непрерывное электроснабжение потребителей в интервале времени необходимом для запуска ДЭС.

Системы бесперебойного электроснабжения (СБЭ) на базе статических преобразователей превосходят САЭ на базе электромашинных преобразователей по многим показателям. Источниками электроэнергии для потребителей переменного тока в таких системах являются инверторы (см. рис.1.7).

Типовые структурные схемы передвижных САЭ, выполненных на базе статических преобразователей электроэнергии представленные на рис.1.8, где обозначено: $ПД$ – приводной двигатель; $Г$ – генератор электроэнергии; $ШГП1$ и $ШГП2$ – шины гарантированного питания переменного и постоянного тока соответственно; $ТВБ$ – трансформаторно-выпрямительный блок; $ИТБ$ – инверторно-трансформаторный блок; $ПНП$ – преобразователь напряжения постоянного тока; $АБ$ – аккумуляторные батареи. Особенностью конструкции данных схем является отсутствие вводов электроснабжения от внешних источников электроэнергии, но они могут быть предусмотрены. Надежность работы таких систем повышается за счет дополнительных резервных АИЭ и ПЭ (на рис.1.3 не показаны).

АИЭ САЭ (рис.1.8, а) генерирует переменный ток промышленной частоты, резервным источником электроэнергии является генератор постоянного тока $Г$, привод которого, как правило, осуществляется от коробки отбора мощности ходового двигателя. Инверторно-трансформаторный блок $ИТБ$ работает при отключении АИЭ, т.е. когда источником электроэнергии являются аккумуляторные батареи $АБ$ или генера-

тор постоянного тока $Г$. $ТВБ2$ выполняет функции зарядного устройства.

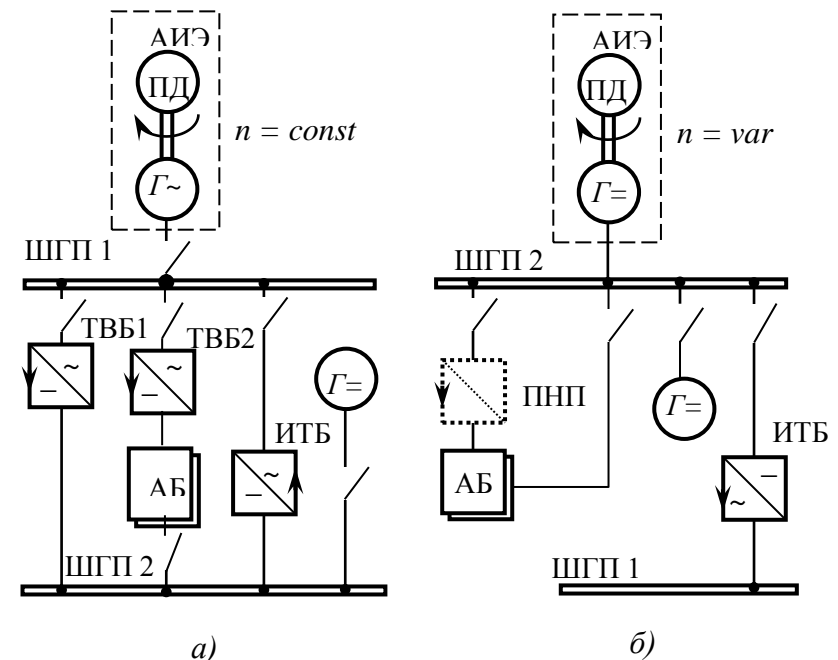


Рисунок 1.8 - Структурные схемы передвижных САЭ

АИЭ САЭ (рис.1.8, б) является источником напряжения постоянного тока. В зависимости от величины генерируемого напряжения постоянного тока САЭ может иметь преобразователь напряжения постоянного тока $ПНП$, выполняющего функции зарядного устройства.

Основным классификационным признаком принято назначение САЭ: для стационарных и передвижных объектов. Другими классификационными признаками являются типы

используемых основных, резервных и аварийных источников, преобразователей электроэнергии. Кроме того, САЭ могут классифицироваться по схемам подключения к потребителям электроэнергии (централизованные, децентрализованные и комбинированные), разделению их по роду тока, перерывам в электроснабжении, типу коммутационной аппаратуры и т.д.

Централизованная схема подключения САЭ (рис.1.9, а) обеспечивает централизованное преобразование, стабилизацию и распределение электроэнергии для питания потребителей. Такое подключение САЭ применяется при большом разнообразии потребителей электроэнергии, которые отличаются по потребляемой мощности, величине напряжения, роду тока, в том числе наличии ответственных потребителей, и для которых важным показателем является обеспечение надежного функционирования.

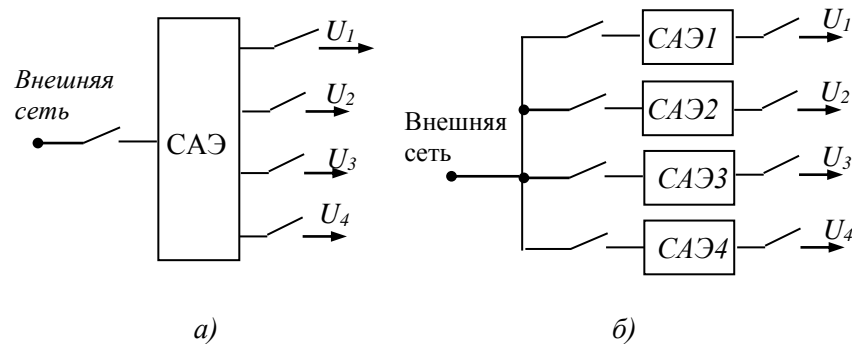


Рисунок 1.9 - Централизованная (а) и децентрализованная (б) схемы подключения САЭ к потребителям электроэнергии

К достоинствам такой системы электроснабжения следует отнести: возможность оптимизации структуры системы электроснабжения потребителей как при нормальной, так и

при аварийной работе, в том числе обеспечивать электроэнергией ответственных потребителей в ненормальных режимах работы путем адаптивного изменения структуры цепей питания и постепенного отключения групп потребителей согласно заданного приоритета нагрузок; возможность проведения технического обслуживания и ремонтных работ без перерыва в электроснабжении; возможность без дополнительных монтажных работ увеличить отдаваемую мощность.

К недостаткам централизованной схемы подключения САЭ следует отнести несколько большой объем монтажных работ при установке, большую длину кабельных линий передач, и как следствие, меньшую защищенность от воздействия электромагнитных помех.

Децентрализованная схема подключения САЭ значительно упрощает конструкцию системы автономного гарантированного электроснабжения и предполагает ее установку возле каждого потребителя (рис.1.5, б). Такие схемы подключения применяются при электроснабжении потребителей не имеющих постоянного расположения, а также при большом удалении их друг от друга.

К достоинствам децентрализованного подключения САЭ следует отнести: возможность наращивать мощность путем параллельного включения однотипных систем; возможность установки САЭ непосредственно в месте расположения потребителя, что в свою очередь несколько упрощает вопросы наладки и регулировки; меньше длина кабельных линий. Основными недостатками рассмотренного способа подключения САЭ являются: большие эксплуатационные расходы и большая общая стоимость.

Комбинированное подключение САЭ к потребителям занимает промежуточное положение между выше рассмотренными способами.

Глава 2

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**2.1 Анализ достоинств и недостатков автономных источников**

Анализ научной и технической литературы показал, что в настоящее время электромеханические генераторы (ЭМГ) являются наиболее универсальными источниками электроэнергии как переменного, так и постоянного тока с широким диапазоном мощностей и напряжений. Кроме того, бесконтактные ЭМГ имеют хорошие массогабаритные показатели, КПД, а также хорошую отработанность технологий изготовления. Однако из-за наличия вращающихся частей они характеризуются средним уровнем ресурса. Электрохимические генераторы (ЭХГ) характеризуются высоким КПД и ресурсом работы. Их основные недостатки: большая масса и габариты, сложность регулирования параметров электроэнергии.

Анализируя основные показатели АИЭ и результаты исследований перспектив их развития можно сделать вывод о том, что в настоящее и в ближайшее время ЭМГ будут широко использоваться как в стационарных так и, в особенности, в бортовых системах автономного электроснабжения.

Если от приводов в основном зависят ресурс работы, МГП и КПД АИЭ, то основные энергетические характеристики АИЭ, прежде всего показатели качества электроэнергии, определяются их генераторами электроэнергии. Кроме того, автономная электроэнергетика предъявляет ряд специфических требований к генераторам источников электроэнергии, основными из которых являются:

1) высокая стабильность и точность поддержания параметров электроэнергии (амплитуды, частоты и формы генерируемого напряжения) в условиях действия таких дестабилизи-

рующих факторов, как переменная частота вращения турбины АД, изменяющаяся величина и характер нагрузки, параллельная работа с другими источниками;

2) минимальная масса и габариты при растущей потребности увеличения установленной (расчетной) мощности;

3) высокая надежность работы и КПД;

4) минимальная стоимость и низкие эксплуатационные расходы.

Перспективными источниками электроэнергии для бортовых СЭС являются бесконтактные электрические машины – асинхронные генераторы.

Во всем мире интенсивно развиваются компьютерные системы связи обработки информации, автоматические системы управления технологическими процессами и целыми производственными комплексами, медицинское оборудование и т.п. Все это, так называемые ответственные потребители электрической энергии. Цена нарушений нормальных режимов работы ответственных потребителей, связанных с отклонением показателей качества электроэнергии, с внезапными перерывами электроснабжения, из-за аварийных ситуаций чрезвычайно высока. Поэтому в настоящее время важная роль отводится стационарным и передвижным (транспортным, бортовым и т.д.) системам автономного электроснабжения (САЭ), являющимися источниками электроэнергии ответственных потребителей. В таких системах важная роль отводится АИЭ.

Основные показатели АИЭ представлены в табл.2.1.

Электрохимические генераторы (ЭХГ) имеют высокий КПД и ресурс, основные их недостатки: плохие МГП и сложность регулирования параметров электроэнергии.

Аккумуляторные батареи (АБ) применяются в САЭ в основном как резервные или аварийные источники, как и ЭХГ имеют средний уровень ресурса и относительно высокую стоимость.

Предпочтительнее характеристики имеют электромеханические генераторы (ЭМГ). В настоящее время они являются

наиболее универсальным источником электроэнергии как переменного, так и постоянного тока с широким диапазоном мощностей и напряжений. Кроме того, ЭМГ имеют хорошие МГП, КПД, а также высокую степень отработанности технологий изготовления. Из-за наличия вращающихся частей они характеризуются средним уровнем ресурса.

Таблица 2.1 - Основные показатели АИЭ

Тип АИЭ	Диапазон мощности, кВт	Напряжение, В	КПД	Удельная масса, кг/кВт
ЭМГ	1-10 ⁴	10-10 ⁴	0,8-0,9	0,2-12
ЭХГ	1-100	10-100	0,4-0,7	5-50
АБ	0,1-10	10-100	0,6-0,9	0,002-0,01 (кг/кДж)

В основном приводные двигатели ЭМГ определяют основные эксплуатационно-технические характеристики АИЭ, в том числе и ресурс работы.

Общий обзор разработок ведущих отечественных и зарубежных фирм показывает, что главными направлениями развития двигателестроения в ближайшее время остаются совершенствование и оптимизация рабочего процесса повышающего эксплуатационно-технические характеристики дизельных двигателей (ДД), которые осуществляют привод ЭМГ. Кроме того, значительное внимание уделяется совершенствованию газотурбинных двигателей (ГТД), развитию и внедрению двигателей Стирлинга (ДС) и адиабатных двигателей (АД).

В настоящее время в США налажен серийный выпуск ДС, КПД которых достигает 0,35. Показатели ДС – экономичность, компактность и удельная мощность – практически такие же, как у современных ДД. Кроме того, ДС имеет ряд

преимуществ: практически полное отсутствие вибрации и шума вследствие непрерывности (а не вспышками, как в ДД) процесса горения топлива в ДС и хорошей сбалансированностью цилиндров; возможность использования в ДС любого источника энергии, включая солнечную энергию, ядерного реактора и даже радиоизотопов. Основными недостатками ДС является относительная сложность конструкции, высокая стоимость производства и более сложная система регулирования, чем у ДД.

Весьма перспективны АД, экономическая эффективность работы которых может быть повышена до уровня, практически недостижимого для ДД. Расчетные исследования на физических моделях показывают, что КПД АД может достигать до 0,59, а анализы патентов прогнозируют его до 0,64, при этом ожидаемый расход топлива – не более 150 г/кВт ч. Кроме того, показатели удельной массы АД на 15 – 20% лучше, чем у ДД. Однако создание АД ставит перед конструкторами многочисленные проблемы, которые исходят с их основных недостатков: низкая надежность керамических материалов (хрупкость), высокая токсичность отработавших газов, высокая стоимость.

Основные энергетические характеристики АИЭ определяют их генераторы электроэнергии. Автономная электроэнергетика предъявляет ряд специфических требований к генераторам АИЭ, основными из которых являются:

1) высокая стабильность и точность поддержания параметров электроэнергии (амплитуды, частоты и формы генерируемого напряжения) в условиях действия таких дестабилизирующих факторов, как переменная частота вращения приводного двигателя (ПД), изменяющаяся величина и характер нагрузки, параллельная работа с другими источниками;

2) минимальная масса и габариты при растущей потребности увеличения установленной (расчетной) мощности;

3) высокая надежность работы и КПД;

4) минимальная стоимость и эксплуатационные расходы.

В последние годы в автономной энергетике нашли применение весьма перспективные ЭМГ переменного тока – асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ), представляющие собой синтез собственно электрической машины и силовых статических преобразователей электроэнергии.

АСГ могут устойчиво работать во всех требуемых по условиям эксплуатации режимах, в том числе и переменных частотах вращения ПД. При этом требования к приводам АСГ по точности стабилизации частоты вращения значительно снижены в сравнении с требованиями, предъявляемыми к приводам традиционных СГ. Области устойчивости АСГ, при прочих равных условиях, всегда больше областей устойчивости СГ, особенно в режимах глубокого потребления реактивной мощности.

Обмотка фазного ротора АСГ питается от преобразователя частоты током, изменяющимся с частотой, пропорциональной скольжению, при этом АСГ, являясь индуктивной нагрузкой для преобразователя частоты, существенно ослабляет токи высших гармоник преобразователя, а изменение частоты вращения ротора не приводит к изменению частоты вращения магнитного поля и, соответственно, частоты тока выходного напряжения генератора.

Форма кривой выходного напряжения АСГ искажена и отличается от синусоидальной, что обусловлено пространственной несинусоидальностью кривой поля в воздушном зазоре, несинусоидальностью тока возбуждения и сильными электромагнитными помехами из-за коммутаций полупроводниковых приборов преобразователя частоты.

Кроме того, АСГ имеет следующие недостатки: невозможность установки демпферных контуров на роторе; большая установленная масса; сложность СУ, и соответственно пониженные значения показателей надежности генератора в целом.

Перспективным бесконтактным ЭМГ является синхронный генератор с вращающимися выпрямителями (СГВВ). В отличие от традиционных генераторов, у которых ток в обмотку возбуждения подается через кольцевой щеточный контакт, в СГВВ питание обмотки возбуждения осуществляется от специального возбудителя, обеспечивающего бесконтактную передачу энергии от ротора к статорной обмотке генератора электромагнитным путем. При этом на обмотку ротора передается электрическая энергия переменного тока, и возбудитель питает обмотку возбуждения через установленный на роторе вращающийся выпрямитель. В качестве возбудителя могут использоваться вращающийся трансформатор, асинхронный или синхронный возбудитель.

Отечественной промышленностью освоен выпуск СГВВ мощностью $10 - 2500 \text{ кВА}$, частотой вращения ротора $750 - 1800 \text{ об/мин}$, имеющие КПД $0,82 - 0,95$ и удельную массу $3,6 - 18 \text{ кг/кВт}$.

Общие недостатки СГВВ связаны с относительно сложной силовой электрической схемой и наличием на роторе обмоток, полупроводниковых приборов, защитных элементов, фильтров и т.п., что снижает надежность его работы, ограничивает предельно допустимые частоты вращения ротора и температуры.

Для существенного улучшения характеристик САЭ необходимы новые методы и принципы их конструирования. Одно из перспективных направлений позволяющим значительно улучшить характеристики САЭ является применение в составе АИЭ высокоскоростных приводных двигателей (ВПД) ГТД или комбинированных свободно-поршневых двигателей (КСПД), частота вращения которых находится в пределах $6000 - 24000 \text{ об/мин}$.

Высокие частоты вращения ВПД и соответственно повышенная частота напряжения переменного тока, позволяет значительно снизить габариты и вес генераторов и ПЭ, повысить качество напряжения постоянного тока и повысить

быстродействие систем защиты и стабилизации параметров электроэнергии САЭ. Кроме того, уменьшение числа полупроводниковых приборов ПЭ приведет к повышению надежности и КПД САЭ, а также уменьшению уровня электромагнитных помех.

Современные ГТД имеют КПД не превышающее значение 0,25, а удельную массу $1 - 3 \text{ кг/кВт}$. Развитие ГТД зависит от уровня разработки отдельных его элементов с применением новых материалов. Можно предположить, что успехи в совершенствовании металлокерамических и керамических материалов будут способствовать дальнейшему развитию.

Одним из перспективных направлений является использование в САЭ комбинированных свободно-поршневых двигателей (КСПД). КСПД относят к классу ГТД, так как они содержат свободно-поршневой генератор газа (компрессор) и газовую турбину.

В сравнение с эксплуатируемыми в настоящее время дизельными двигателями КСПД согласно литературным источникам имеет следующие преимущества:

- работают на любых сортах топлива, включая мазут и сырую нефть;
- обладают способностью экономичной работы на малых нагрузках;
- отсутствие кривошипно-шатунного механизма и механизма газораспределения повышает их надежность и ремонтопригодность;
- имеет относительно высокий КПД (до 40%, а при изготовлении поршней на керамической основе может достигнуть до 50%);
- имеет хорошие МГП, удельная масса равна $3,5 - 5,5 \text{ кг/кВт}$ (при генерируемой мощности генератором 100 кВт диаметр компрессора не превышает 700 мм , а длина 1800 мм);
- имеет большой ресурс работы (более 50000 ч).

Однако, предельно допустимая частота вращения вала (турбины) ВПД и соответственно ресурс работы АИЭ в основном ограничены показателями подшипников и механической прочностью ротора генератора электроэнергии. Поэтому с ВПД должны использоваться бесконтактные электрические машины (БЭМ), обладающие повышенной надежностью и имеющие улучшенные характеристики в сравнении с контактными генераторами электроэнергии.

БЭМ в перспективе составляют основу развития автономной электроэнергетики в диапазоне мощностей от десятков ватт до сотен киловатт. К таким электрическим машинам относятся СГ с постоянными магнитами (СГПМ) и асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением (АГ).

2.2 Параметры электроэнергии автономных источников

Повышение автономности функционирования САЭ, улучшение их массогабаритных показателей (МГП) при жестких требованиях по качеству электроэнергии и надежности электроснабжения потребителей возможно на основе использования малогабаритных систем с рациональной структурой построения и оптимальными параметрами электроэнергии по сравнению с существующими, что во многом зависит от правильного выбора генераторов и их параметров электроэнергии.

При выборе рода тока и соответственно источника необходимо учитывать следующие факторы.

Системы переменного тока имеют компактные электрические машины, преобразователи электроэнергии и коммутационные устройства. Число фаз в системах переменного тока САЭ обычно равно $m = 3$, но в преобразовательных блоках используются как одно – так и многофазные системы. Трехфазная система обладает высокой симметрией и позволяет создавать вращающееся магнитное поле, необходимое для

электрических машин и специальных трансформаторов, при минимальной числе проводников. Трехфазные системы выполняются трех – или четырехпроводными (с учетом нулевого провода). Для обеспечения требуемой надежности САЭ число проводов может дублироваться. Основные их недостатки – относительная сложность параллельной работы генераторов и преобразователей, повышенные значения токов и сечения проводов при заданной активной мощности (из-за $\cos\varphi < 1$), дополнительные потери электроэнергии на реактивных элементах, повышенные помехи.

Системы постоянного тока имеют относительно малые значения сечения проводов, пониженные значения падения напряжения в системе, достаточно просто реализуются системы стабилизации напряжения генераторов и их параллельная работа, невысокий уровень помех. Однако основными их недостатками являются: усложненная коммутация цепей и преобразование электроэнергии. Системы постоянного тока выполняются двух – или однопроводными с использованием корпуса установки для замыкания тока. В последнем случае уменьшается расход материалов, но надежность однопроводных систем относительно низкая.

Выбор номинального напряжения U_n определяется рядом факторов. Низкие значения U_n приводят к большим токам (при постоянных значениях мощности) и потерям, сопровождаются трудностями регулирования и стабилизации параметров электроэнергии. При высоких значениях напряжения возникают проблемы с изоляцией проводников, с технической безопасностью и т.п.

Значение U_n оказывает значительное влияние на массу распределительных устройств и относительно слабо – на массу электрических машин и трансформаторов. Рост номинального напряжения в цепи снижает рабочие токи и массу проводов, но в электрических машинах он приводит лишь к увеличению числа витков обмоток при сохранении объема проводников. Так, рабочее значение электродвижущей силы

(ЭДС) и ток в машине (трансформаторе) определяются по формулам

$$E \approx WfB_m \Pi_c, \quad I = j\Pi_{np}, \quad (2.1)$$

где W – число витков обмотки; f – частота тока; B_m – магнитная индукция; Π_c – сечение стального магнитопровода; j – плотность тока; Π_{np} – сечение провода.

Поскольку активное сечение обмотки

$$\Pi_{об} = W\Pi_{np}, \quad (2.2)$$

то расчетная мощность

$$S = mEI \approx fjB_m \Pi_c \Pi_{об}, \quad (2.3)$$

где m – число фаз, не зависит от числа витков W и соответственно напряжения U_n , если объем изоляции сохраняется.

В настоящее время активно исследуются системы постоянного тока повышенного напряжения ($U_n > 400 \text{ В}$), обеспечивающие улучшение характеристик, в том числе массы цепи примерно на 70%, но не решены проблемы с коммутационными устройствами цепи.

Определяющим фактором при выборе частоты тока АИЭ, являются требования потребителей электроэнергии, однако, необходимо учитывать, что с одной стороны при больших значениях частоты f возрастают потери в электротехнической стали генераторов, трансформаторов и дросселей, а с другой стороны уменьшается их масса. Кроме того, известно, что частота тока зависит от частоты вращения вала приводного двигателя n и числа пар полюсов генератора p .

$$f = \frac{pn}{60}. \quad (2.4)$$

И, как видно из уравнения машинной постоянной (постоянной Арнольда), чем больше частота вращения ротора электрической машины, тем меньше габаритные размеры ее активной части (D^2l).

$$D^2l = \frac{S}{\pi\alpha AB_\delta n}, \quad (2.5)$$

где D – диаметр активной части статора генератора; l – длина активной части машины; S – расчетная мощность; $\alpha = 0,8 - 0,9$ – коэффициент учитывающий особенности конструкции магнитной системы; A – линейная нагрузка; B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре; n – частота вращения вала ротора.

Повышение частоты тока целесообразно осуществлять не за счет увеличения числа пар полюсов p , потому, что в этом случае увеличиваются габариты генератора электроэнергии, а за счет повышения частоты вращения n . Но в этом случае предъявляются высокие требования к подшипникам электрической машины, от которых зависит ресурс работы генератора.

Хотя в настоящее время потребители переменного тока стационарных и передвижных САЭ требуют электроэнергию с частотой 50 Гц , но возможны варианты применения АИЭ генерируемых напряжение с частотой тока $400 - 1200 \text{ Гц}$ (из практики эксплуатации бортовых (авиационных) САЭ) с последующим преобразованием параметров электроэнергии за счет преобразовательных устройств. В этом случае значительно улучшаются характеристики САЭ в особенности, если в основу составляют потребители постоянного тока.

Выбор мощности АИЭ при изменяющейся нагрузке САЭ обычно осуществляется с учетом графика нагрузки $S(t)$. За расчетную мощность принимают максимальное среднеквадратичное значение S_p за время T , равное периоду выхода АИЭ на установившийся режим, т.е.

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt}. \quad (2.6)$$

Мощность САЭ определяется по S_p с учетом потерь и требуемого резервирования. Предельные значения мощности АИЭ и соответственно САЭ оцениваются с учетом ограничений, диктуемых прочностными характеристиками материалов, технологическими факторами, МГП.

При совместной работе нескольких АИЭ необходимо согласование их характеристик. Если параллельную работу источников напряжения постоянного тока реализовывать относительно просто, то параллельная работа СГ требует большое число согласованных каналов регулирования.

2.3 Синхронные генераторы с постоянными магнитами

Предельно допустимая частота вращения вала (турбины) высокоскоростных ПД и соответственно ресурс работы АИЭ в основном ограничены показателями подшипников и механической прочностью ротора генератора электроэнергии. Поэтому с такими двигателями должны работать бесконтактные электрические машины (БЭМ), обладающие повышенной надежностью и имеющие улучшенные характеристики в сравнении с контактными генераторами электроэнергии. БЭМ в перспективе составляют основу развития автономной электроэнергетики в диапазоне мощностей от десятков ватт до сотен киловатт. К таким бесконтактным высокоскоростным генераторам (БВГ) относятся СГ с постоянными магнитами (СПМ) и асинхронные генераторы с емкостным возбуждением (АГ).

Стандартные подшипники качения, применяемые в авиационных АИЭ, рассчитаны на $n = 6000 - 12000 \text{ об/мин}$. Однако, значительное повышение ресурса работы БВГ соответственно возможно при переходе к бесконтактным опорам - газовым и магнитным.

Газовые опоры делятся на газостатические и газодинамические. Газостатические опоры основаны на непрерывном поддуве сжатого газа под цапфу вращающегося вала, благодаря чему цапфа удерживается в подвешенном состоянии силами давления газа (принцип «газовой подушки»). Для реализации таких опор требуется специальная система сжатого газа.

В газодинамических опорах, применяемых в малых машинах, используется самозасасывание газа из окружающей среды за счет аэродинамических профилей на вращающихся торцах опор. Под небольшим избыточным давлением газ направляется под цапфу и удерживает ее в подвешенном положении. Однако при неподвижном роторе цапфа ложится на твердую опору, поэтому при пусках и остановках возникают большие силы трения.

Газовые опоры могут выполняться комбинированными – при пуске опора работает как газостатическая, а при достижении необходимой частоты вращения переходит в газодинамический режим. Рабочие зазоры в газовых опорах составляют $0,001 - 0,1$ мм.

Магнитные опоры, называемые так же магнитными подшипниками, основаны на взаимодействии постоянных магнитов или электромагнитов. На валу и на статоре размещаются магниты, создающие такую комбинацию силы отталкивания (для однополярных полюсов) и притяжения (для разнополярных полюсов), что ротор удерживается в подвешенном состоянии и не касается статора. Особый импульс развития таких опор получен в связи с созданием высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов. Часть магнитов в опорах обычно выполняется в виде электромагнитов с обмотками, позволяющими регулировать силы подвеса.

На рис.2.1 показана упрощенная схема магнитного подшипника. На статоре 2 консольно закреплены три катушки: кольцевая 4 и две сегментные 5 и 6. На конце вала ротора размещена обойма, внутри которой имеются магнитопровод и кольцевой радиально намагниченный постоянный магнит 3, создающий радиальное магнитное поле в области обмотки 4 и аксиальное поле в области обмоток 5 и 6. Благодаря этому на катушки статора действует осевая и радиальные силы. Они обеспечивают магнитный под-

вес ротора, характеристики которого можно изменять, регулируя токи в обмотках 4,5,6.

В реальных конструкциях магнитных подшипников применяется несколько постоянных магнитов и кольцевых катушек, а также дополнительные сегментные катушки (обычно сдвинутые на 90° относительно основных), обеспечивающие устойчивость ротора при боковых перегрузках.

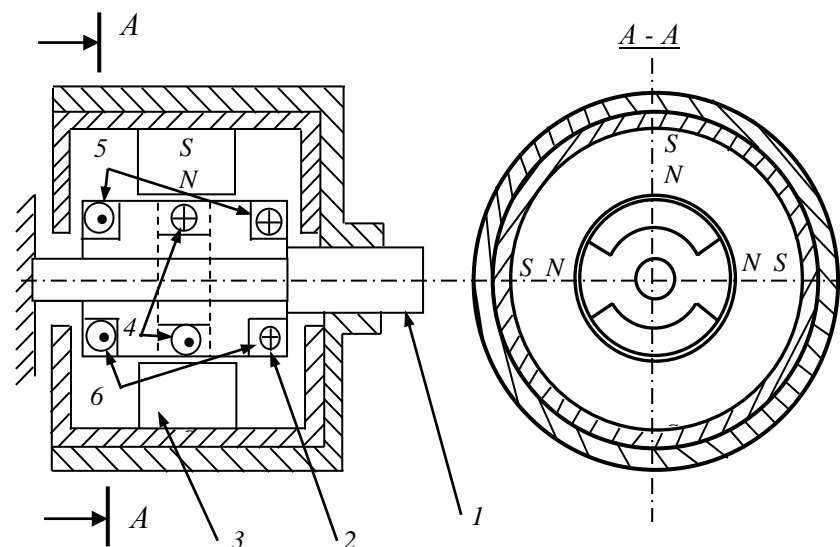


Рисунок 2.1 – Конструкция магнитного подшипника: 1 – вал; 2 – статор; 3 – постоянный магнит; 4 – кольцевая обмотка; 5, 6 – сегментные обмотки

Газовые и магнитные опоры обеспечивают частоту вращения $n = 30000 - 100000$ об/мин при пренебрежимо малых потерях и больших сроках службы. К их недостаткам относится малая жесткость подвески, плохая работоспособность при динамических нагрузках, относительно низкая грузо-

подъемность (до 100 Н/см^2), возможность появления неустойчивых колебаний ротора, сложность регулирования и стабилизации. Однако достоинства бесконтактных опор стимулирует их применение в БЭМ малой мощности и в энергетических установках работающих в сложных окружающих условиях. Так, например, при разработке в США проектов газотурбинных установок для космических станций с электрическими мощностями от 10 до 100 кВт предлагается использование газовых подшипников в главном блоке, содержащем генератор, компрессор, турбину вращающуюся с частотой до 40000 об/мин .

СГПМ просты в конструкции, имеют высокий КПД, надежны в возбуждении, малоинерционны в переходных процессах, имеют хорошие выходные характеристики.

В настоящее время известно большое разнообразие конструкций СГПМ. Среди них следует отметить торцовую конструкцию (ротор с тангенциальным намагничиванием), которая помимо прочих достоинств СГПМ имеет следующие: жесткий и короткий ротор, выдерживающий высокие скорости вращения; небольшая масса вращающихся частей при достаточном моменте инерции (за счет большего диаметра); простота и технологичность конструкции; удобство встраивания в конструкцию первичного двигателя (постоянные магниты (ПМ) расщепляются на вращающихся частях двигателя, а статор располагается рядом с ними). По оценкам, для торцовой конструкции СГПМ достижима окружная скорость до 400 м/с и расчетная мощность до 100 кВт и более.

Особенностью конструкции торцового СГПМ (рис.2.2, а) является наличие вращающихся вокруг неподвижного полого вала 1 дисковых роторов 2, на которых расположены полюса системы возбуждения 3, представляющие собой кольцевые секторы, изготовленные из материала ПМ. Полюса располагаются на ярме 4 – тонком кольце, из электротехнической стали, предназначенном для замыкания силовых линий магнитного потока полюсов. Рядом с ротором расположен тороидальный статор 5,

отделенный от ротора аксиальным (торцовым) воздушным зазором. На торцевой поверхности статора находятся радиальные пазы, в которых укладываются трехфазные обмотки статора 6. Статор жестко связан с неподвижным валом 1, на котором посредством подшипников 7 крепятся роторы генератора.

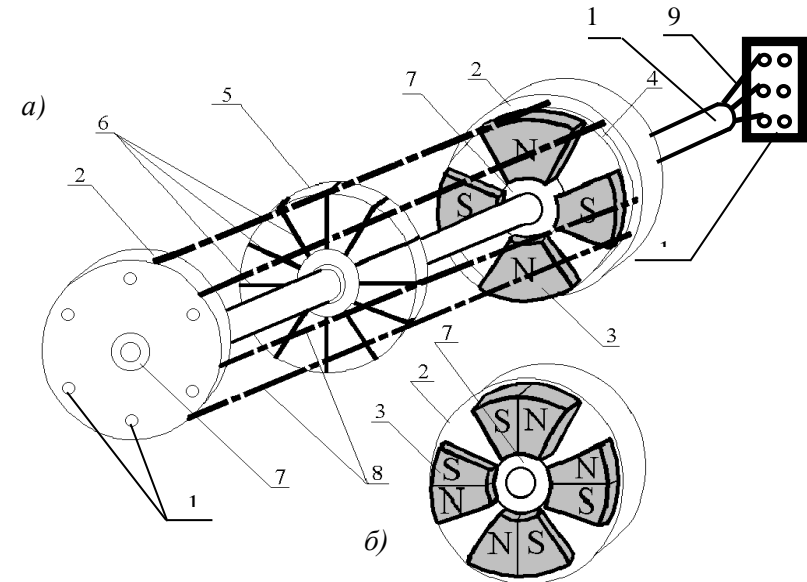


Рисунок 2.2 – Конструкция магнитной системы торцового СГПМ: 1 – вал; 2 – ротор; 3 – полюса системы возбуждения, 4 – ярмо, 5 – статор; 6 – обмотка; 7 – подшипник; 8 – силовые шпильки; 9 – вывод обмотки; 10 – распределительная коробка; 11 – пазы крепления к приводному двигателю

Дисковые роторы связаны между собой силовыми шпильками 8. Выводы обмоток статора 9 проходят через полый вал на распределительную коробку СГ 10. Привод роторов осуществляется через специальные пазы 11, размещенные на одном из них. Вал приводного двигателя, соответственно имеет специальные крепления, обеспечивающие зацепление с ротором через

пазы 11. На рис.2.2, *a* расстояние между роторами 2 и статором 5 увеличено, с целью рассмотрения конструкции магнитной системы торцевых СГПМ.

Возможно применение одно - и многопакетных конструкций статора торцевых СГПМ (когда ротор с открытыми с двух сторон полюсами расположен между пакетами статора). Если применить в торцевых СГПМ с двумя роторами кольцевую (тороидальную) одно - или многофазную обмотку (как на рис.2.2, *a*), то улучшается использование обмоточной меди по сравнению с ранее известными конструкциями торцевых СГПМ. В частности, для применения в составе АИЭ перспективен торцовый СГПМ с трехфазной симметричной распределенной обмоткой. Расчетно-конструктивные проработки показывают, что суммарная длина лобовых частей кольцевых обмоток примерно в 4 - 6 раз меньше длины активных частей, в то время как у известных конструкций СГ это отношение имеет значения порядка 2-3.

Рассмотренная конструкция генератора имеет более простую технологию изготовления и сборки, чем другие СГПМ и позволяет легко получать системы с любым количеством фаз и с большим количеством полюсов, что особенно важно для источников электроэнергии повышенной частоты (порядка 400 Гц и выше). Следует учесть, что возможно применение ПМ в форме кольцевых секторов как с аксиальным намагничиванием (рис.2.2, *a*), так и с тангенциальным намагничиванием (рис.2.2, *b*). В последнем случае при равном количестве магнитов в системе возбуждения частота тока будет вдвое выше, следовательно, масса статора будет уменьшаться.

Широкие перспективы в создании СГПМ открывает промышленное освоение производства магнитотвердых материалов интерметаллических соединений редкоземельных элементов с кобальтом, используемых для ПМ систем возбуждения СГПМ, размещаемых на роторе генератора. Использование редкоземельных материалов улучшает МГП генераторов. Однако сдерживающим фактором в применении указан-

ных материалов является их относительно высокая стоимость.

В настоящее время основным материалом для магнитов систем возбуждения СГПМ служат металлокерамические сплавы типа альни, альнико и, реже, бариевые ферриты, механическая прочность которых в 3 – 6 раз выше литых роторов из магнитотвердых ферритов.

Таким образом, особенностью СГПМ является зависимость их мощности от объема (массы) и качества (энергетических показателей) материала ПМ, используемых в системе возбуждения. На рис.2.3 приведены зависимости $S = f(V)$, рассчитанные для материалов типа альнико марки ЮНДК35Т5АА (1, 4), редкоземельных марки КС37 (2, 5), сплава фенебор $Nd_2Fe_{14}B$ (3, 6) при коэффициенте мощности нагрузки 0,8, числе пар полюсов $p = 4$, частоте вращения ротора $n = 6000$ об/мин (прямые 1 – 3) и 10000 об/мин (прямые 4 – 6). При изменении частоты вращения в пределах 8000 – 12000 об/мин и мощностях 20 – 60 кВА имеют КПД 0,89 – 0,91 и удельную массу 1,2 – 1,6 кг/кВт. В США разработаны СГПМ мощностью 110 кВА с удельной массой 0,15 кг/кВА.

Одно из перспективных направлений в разработке бесконтактных генераторов электроэнергии связано с отказом от традиционного выполнения электрической машины в виде самостоятельного конструктивного агрегата. Так, к примеру, ПМ СГПМ крепят непосредственно на валу компрессора турбореактивного авиадвигателя, а якорь размещают на корпусе авиадвигателя в наиболее удобном для этой цели месте. По расчетам подобный СГПМ при мощностях 60 – 120 кВА, частоте вращения $n = 6000$ об/мин и канальном охлаждении якоря будет иметь удельную массу не более 0,3 кг/кВА. Такая компоновочная схема СГПМ является перспективной, целесообразной и экономически обоснованной.

Важная особенность СГПМ в сравнении с СГ с электромагнитным возбуждением – сложность регулирования и стабилизации выходного напряжения.

Один из возможных способов стабилизации напряжения СГПМ – введение во внешнюю электрическую цепь генератора емкостных элементов, способствующих появлению продольно намагничивающей реакции якоря.

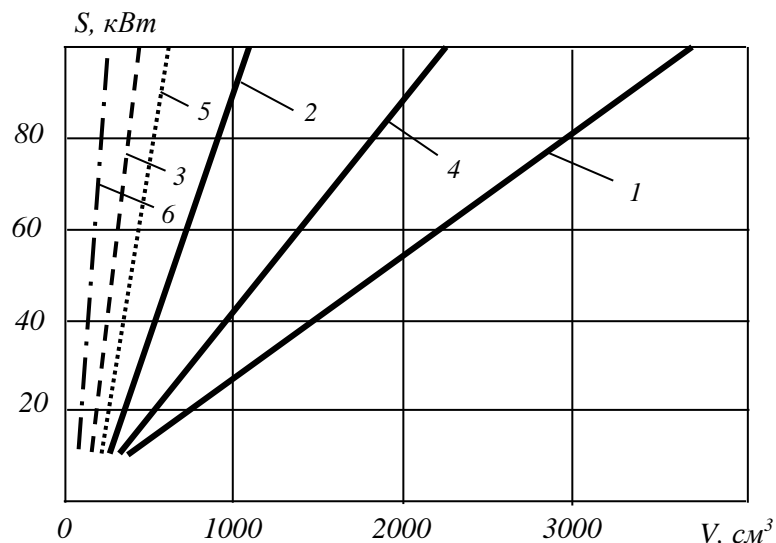


Рисунок 2.3 – Зависимость мощности СГПМ (S) от объема (V) постоянных магнитов

2.4 Особенности работы и достоинства асинхронных генераторов

Принципы и технические решения регуляторов напряжения АГ аналогичны с СГПМ, т.е. стабилизация напряжения осуществляется за счет регулирования реактивной мощности, поступающей в АГ от конденсаторов. Изменение реактивной мощности конденсаторов осуществляется за счет изменения реактивного тока, протекающего через конденсаторы, пропорционально изменению напряжения. Величина реактивного тока изменяется изменением времени открытого со-

стояния силовых полупроводниковых ключей, которые к конденсаторам подключаются последовательно или параллельно. Широкий диапазон требований потребителей электроэнергии обуславливает многообразие вариантов структурных схем САЭ. Практический интерес представляют три структурно-схемных решения автономных систем АИЭ которые выполнены на базе высокоскоростных ПД и АГ с емкостным возбуждением (рис.2.4). В схемах рис.2.4 применяются аккумуляторные батареи (АБ) предназначенные для обеспечения бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей. Кроме того, на рис.2.4 обозначено: АИЭ – автономные источники электроэнергии; ВПД – высокоскоростной приводной двигатель; АГ – асинхронный генератор; БВ и БК – блоки конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности нагрузки соответственно; ШГП – шина гарантированного питания; К – конверторы; И – инвертор; НПЧ – непосредственный преобразователь частоты; В – выпрямители; 1...4 – выводы для подключения нагрузки

В схеме рис.2.4, а АИЭ является источником напряжения постоянного тока. Здесь функции стабилизации напряжения выполняет трехфазная хема управляемого выпрямителя В. Применяемые в САЭ конверторы с промежуточным высокочастотным преобразованием К1 и К2 имеют хорошие показатели удельной массы и качества выходного напряжения. Целесообразность применения рассмотренной схемы, с точки зрения основных критериев ее эффективности (КПД, МГП), будет в том случае когда потребляемая энергия постоянного тока будет составлять 70% и более от установленной мощности САЭ.

АИЭ является источником напряжения переменного тока промышленной частоты. В схеме АИЭ отсутствует блок конденсаторов, обеспечивающий компенсацию реактивной мощности нагрузки, так как непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) выполняет функции, как стабилизации напряжения так и частоты.

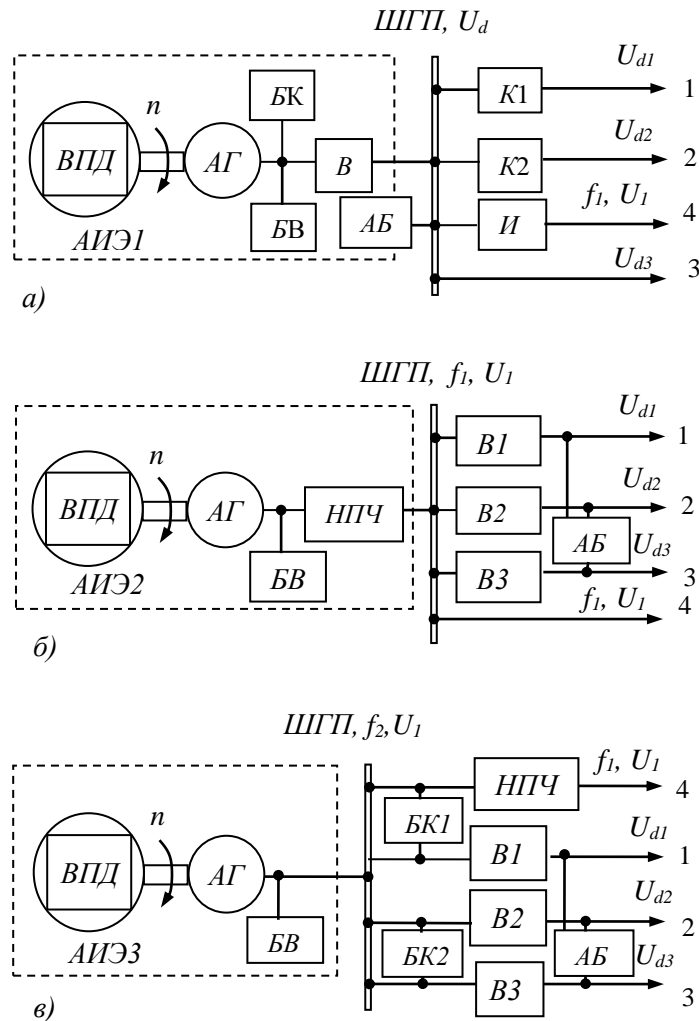


Рисунок 2.4 - Структурные схемы САЭ на базе АГ

Компенсация реактивной мощности нагрузки в схеме на рис.2.4, б осуществляется за счет изменения угла сдвига фаз на входе НПЧ с искусственной коммутацией силовых вентилялей.

Критерии эффективности САЭ повышаются, когда потребляемая энергия переменного тока составляет основную долю от ее установленной мощности.

АИЭ рис.2.4, в является источником напряжения переменного тока повышенной частоты. Блоки компенсации БК1 и БК2 кроме функции обеспечения компенсации реактивной мощности нагрузки выполняют функции входных фильтров ПЭ. Повышенная частота генерируемого напряжения позволяет значительно улучшить МГП выпрямителей, улучшить качество напряжения постоянного тока и быстродействие систем защиты и стабилизации параметров электроэнергии, как преобразователей, так и АИЭ.

Основной недостаток схем САЭ рис.2.4, б, в это не реализовано техническое решение по обеспечению гарантированного электроснабжения потребителей электроэнергии переменного тока. Схемы АИЭ на рис.2.4, а, б имеют ниже КПД и худшие МГП в сравнении с схемой АИЭ на рис.2.4, в. Однако это не является основными аргументами ради которых необходимо отказываться от тех или иных рассмотренных технических решений АИЭ. Здесь определяющим фактором являются критерии эффективности САЭ в целом определяемые требованиями потребителей и прежде всего к качеству электроэнергии, непрерывности электроснабжения и мощности потребляемой электроэнергии на постоянном и переменном токе.

Современные системы регулирования напряжения АГ обеспечивают стабильное значение выходного напряжения даже при значительных изменениях частоты вращения приводного двигателя (1 : 2). Кроме того, АГ имеют следующие преимущества в сравнении с СГ:

а). При КЗ в цепи нагрузки происходит развозбуждение АГ, что не требует установки дополнительной защиты генератора.

б). При работе АГ на несимметричную нагрузку, короткозамкнутая стержневая система магнитосимметричного ротора, выполняет роль полной демпферной обмотки, вследствие чего качество электроэнергии вырабатываемой АГ обеспечивается на достаточно высоком уровне и в несимметричных режимах нагрузки. Результаты испытаний при по-фазной несимметрии нагрузки, показывают, что АГ мощностью 75 кВт ($n=12000 \text{ об/мин}$), достигающей до 25% от номинального тока, максимальная несимметрия линейных напряжений не превышает 2,6% номинального значения. Для АГ мощностью 75 кВт и при частоте вращения 8000 об/мин – 4%. Время восстановления напряжения после короткого замыкания равно $0,98 \text{ с}$.

в). Для АГ повышенной частоты, у которых увеличение частоты тока достигнуто за счет увеличения частоты вращения ротора, более устойчиво возбуждаются после потери возбуждения. Кроме того, самовозбуждение таких генераторов происходит даже при наличии определенной нагрузки подключенной к зажимам генератора. Так, время самовозбуждения АГ мощностью 75 кВт ($n=12000 \text{ об/мин}$), до номинального напряжения составляет $0,7 \text{ с}$. Точность поддержания напряжения при изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения, равно $0,66\%$. От АГ работающего на холостом ходу можно запустить асинхронный двигатель мощностью 11 кВт , максимальное понижение напряжения при этом до 20%, время пуска – $0,8 \text{ с}$. При набросе и сбросе номинальной нагрузки с коэффициентом мощности $0,8$, величина максимальной просадки равна $8,6\%$, а всплеск – $9,2\%$ – номинального напряжения. Коэффициент нелинейных искажений напряжения АГ мощностью 160 кВт , под нагрузкой равен $0,66\%$.

г). Включение на параллельную работу СГ сложная и ответственная операция, требуются при одинаковом порядке чередования фаз, равенство напряжений на зажимах генерато-

ров и частоты вырабатываемого тока. Если разность вращения валов приводных двигателей достаточно велика, то даже при наличии большого синхронизирующего момента вращающийся ротор может не втянуться в синхронизм в первом после включения цикле качаний без проворота. Толчки уравнивающего тока и уравнивающей мощности сопровождаются провалами напряжений и могут оказать отрицательное воздействие, как на работу самих генераторов, так и на работу потребителей, а иногда привести к нарушению устойчивости и выпадению СГ из синхронизма.

В тоже время включение АГ на параллельную работу, такой же мощности, носит устойчивый характер, не требует сложной дополнительной аппаратуры, а синхронизация генераторов сводится только к выравниванию их частот и напряжений. Даже при значительных рассогласованиях частот вращения роторов генераторов в системе устанавливается частота тока, равная среднему значению частот токов генераторов включенных на параллельную работу. При этом, конденсаторы возбуждения играют роль фильтров и способствуют исчезновению биений напряжений и длительных переходных процессов после включения на параллельную работу.

В многоагрегатных системах простыми и надежными структурно-схемными решениями, возможно оптимизировать систему по МГП, ресурсу, надежности и другим технико-экономическим показателям. Эта возможность обусловлена тем, что с одной стороны блок возбуждения АГ на холостом ходу может быть функционально разобщен с блоком компенсации реактивной мощности нагрузки, а с другой стороны, эти блоки простыми переключениями могут быть подключены к любому АГ многоагрегатной системы САЭ резервируя друг друга. (На рис.2.5 приведены варианты схем включения на параллельную работу АГ).

Однако достоинства АГ могут быть потеряны при использовании в генераторном режиме асинхронных двигателей

промышленного исполнения. Такие машины имеют низкий КПД, большую массу и габариты.

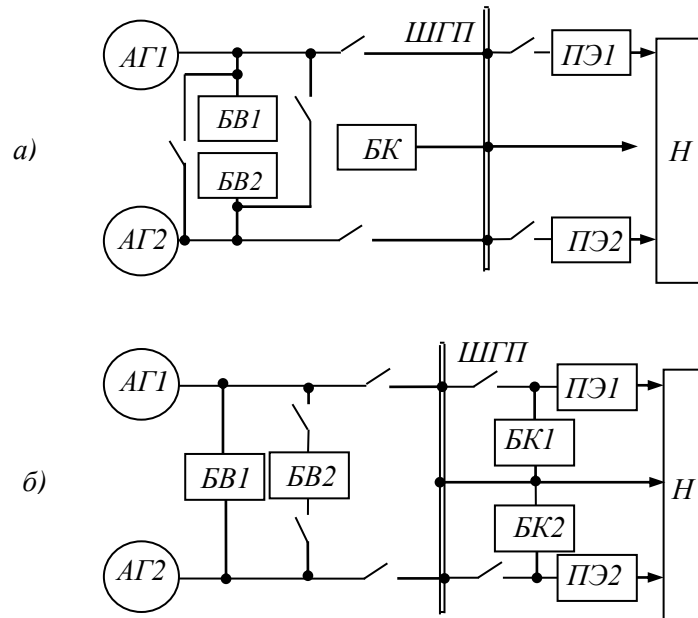


Рисунок 2.5 – Структурные схемы включения АГ на параллельную работу: АГ – асинхронные генераторы; БВ – блоки конденсаторов обеспечивающих самовозбуждение генераторов; БК – блоки конденсаторов обеспечивающих компенсацию реактивной мощности нагрузки; ПЭ – преобразователи электроэнергии; ШГП – шина гарантированного питания; Н – нагрузка

Вернуть АГ конкурентоспособность, как АИЭ может асинхронная машина специально проектируемая для работы в генераторном режиме на высоких частотах вращения приводного двигателя. Так, например, коэффициент насыщения магнитной цепи высокоскоростного АГ должен находиться в пределах 2,8 – 4, что позволит повысить его КПД и улучшить рабочие ха-

рактеристики. Повышение коэффициента насыщения может быть обеспечено за счет изменения размеров зубцов и ярма ротора, а также за счет использования новых материалов для магнитной системы. Стабилизация и качество напряжения АГ зависят не только от коэффициента насыщения, но и от обмоточных данных электрической машины. Параметры обмоток рассеяния АГ должны быть в пределах $X1=X2' < 0,08 - 0,1$, а величина активных сопротивлений обмоток должна составлять $R1 = R2 = 0,01 - 0,03$.

Улучшение МГП АГ можно обеспечить за счет повышенных электромагнитных нагрузок с применением высокоэффективных систем охлаждения, исходя из опыта эксплуатации авиационных АГ линейная нагрузка генератора должна находиться в пределах $A = 30000 - 40000 \text{ А/м.}$ а магнитная индукция в воздушном зазоре $B_\delta = 0,5 - 0,7 \text{ Тл.}$ Кроме того, высокоскоростные АГ должны иметь относительное значение длины статора $\lambda = 0,5 - 0,55$ для обеспечения малых значений номинального скольжения.

Таким образом, широкие перспективы раскрываются перед бесконтактными генераторами электроэнергии переменного тока АГ и СГПМ, обладающих повышенной надежностью, высокими динамическими качествами, малыми массами и габаритными размерами за счет повышенных механических, электромагнитных и тепловых нагрузок, возможностью работать в нестандартных окружающих условиях. Поэтому их значимость в электроэнергетике быстро возрастает. Существенно улучшить характеристики рассмотренных генераторов можно за счет применения систем интенсивного охлаждения, новых материалов (на основе редкоземельных материалов, высокопрочных сплавов, сверхпроводников), бесконтактных опор в виде магнитных и газовых подшипников.

УСТРОЙСТВА СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ

3.1 Стабилизаторы напряжения генераторов постоянно- го тока

Для стабилизации напряжения генераторов постоянного тока при изменениях величины, характера нагрузки и частоты вращения ПД, применяются автоматические регуляторы напряжения.

Как известно, напряжение генератора постоянного тока определяется следующим уравнением

$$U = kn\Phi - R_{я}I_n, \quad (3.1)$$

где k – постоянная машины, учитывающая особенности конструкции; n – частота вращения якоря; Φ – магнитный поток машины; $R_{я}$ – сопротивление якорной обмотки генератора; I_n – ток нагрузки.

Поскольку значения k и $R_{я}$ для каждой машины являются величинами постоянными, то регулирование напряжения генератора может осуществляться путем изменения параметров n или Φ . Стабилизация (регулирование) напряжения путем изменения частоты вращения ротора приводного двигателя связано с большими трудностями и поэтому практически не применяется. На практике широко используется регулирование напряжения генератора путем управления величиной магнитного потока, которое осуществляется за счет изменения тока возбуждения.

В зависимости от характера изменения тока возбуждения различают два способа регулирования напряжения генератора постоянного тока: непрерывный и дискретный. Непрерывный способ регулирования заключается в плавном изменении величины сопротивления, дополнительно введенного в цепь обмотки возбуждения. Дискретный способ основан на

периодическом прерывании тока возбуждения и регулировании его средней величины за счет изменения длительности импульса тока в этой обмотке.

Полупроводниковые стабилизаторы напряжения, в сравнении с известными угольными и вибрационными, изменение тока в обмотке возбуждения, у которых осуществляется посредством изменения сопротивления угольного столба, включенного последовательно в цепь обмотки возбуждения генератора, имеют лучшие характеристики и, прежде всего массогабаритные, КПД и высокое быстродействие. Причем полупроводниковые регуляторы могут работать в непрерывном и дискретном (релейном или импульсном) режимах.

Принципиальная электрическая схема полупроводникового стабилизатора напряжения непрерывного действия показана на рис.3.1.

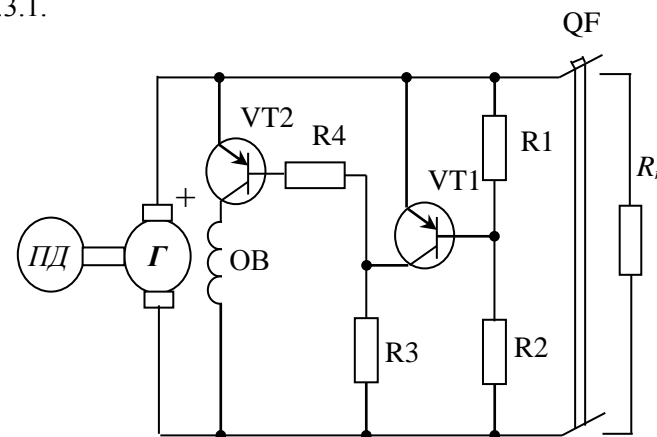


Рисунок 3.1 – Принципиальная электрическая схема полупроводникового стабилизатора напряжения непрерывного действия

Стабилизатор напряжения состоит из измерительного органа, выполненного на резисторах $R1$, $R2$, $R3$ и транзистора $VT1$, и исполнительного органа, в качестве которого используется транзистор $VT2$.

Стабилизатор работает следующим образом. Когда напряжение генератора равно номинальному, то в цепи резисторов $R1$ и $R2$ протекают токи пропорциональные напряжению генератора. При этом падение напряжения на резисторе $R1$ прикладывается к управляющим электродам транзистора $VT1$, что обеспечивает неполное его открытие. Через резистор $R3$ протекает коллекторный ток транзистора $VT1$. Падение напряжение эмиттер-коллекторного перехода транзистора $VT1$ приложено к эмиттер-базе транзистора $VT2$, приоткрывая его. Коллекторный ток транзистора $VT2$ является током обмотки возбуждения генератора обеспечивающий номинальное напряжение на выходе источника электроэнергии.

Если, к примеру, напряжение генератора увеличится (вследствие уменьшения нагрузки) возрастет ток в цепи резистора $R1$, увеличится соответственно падение напряжения на резисторе и базовый ток транзистора $VT1$. В результате уменьшится сопротивление коллекторного перехода и увеличится коллекторный ток транзистора $VT1$. Уменьшение сопротивления коллекторного перехода транзистора $VT1$ вызовет перераспределение падения напряжения между резистором $R3$ и участком эмиттер-коллектор транзистора $VT1$, т.е. падение напряжения на резисторе $R3$ увеличится, а на коллекторном переходе транзистора $VT1$ – уменьшится. При этом уменьшится базовый ток транзистора $VT2$ и увеличится сопротивление его коллекторного перехода, что приведет к уменьшению коллекторного тока, т.е. уменьшится ток возбуждения генератора, следовательно, уменьшится напряжение на выводах генератора.

В рассмотренной схеме полупроводникового стабилизатора непрерывного действия транзистор $VT2$ выполняет функции регулируемого сопротивления и рассеивает большие потери энергии. Это является существенным недостатком стабилизатора. Поэтому стабилизаторы непрерывного действия применяются с генераторами постоянного тока мощностью до 3 кВт .

Принципиальная электрическая схема полупроводникового стабилизатора дискретного действия показана на рис.3.2. Схема такого стабилизатора обеспечивает работу транзистора, включенного последовательно с обмоткой возбуждения в ключевом (импульсном) режиме, что значительно уменьшает потери мощности на этом транзисторе.

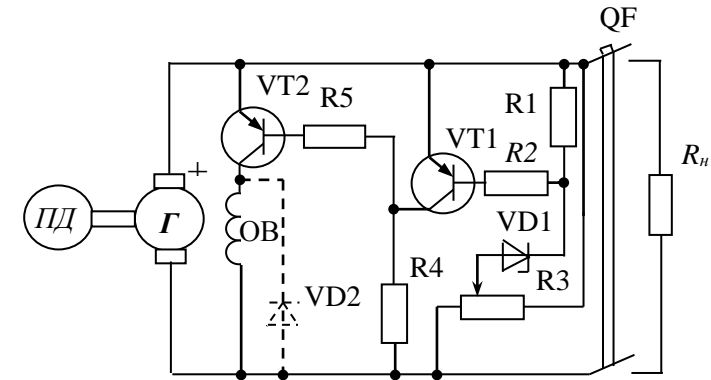


Рисунок 3.2 – Принципиальная электрическая схема полупроводникового стабилизатора дискретного действия

Ключевой режим работы схемы обеспечивается применением стабилитрона $VD1$. В номинальном режиме работы стабилитрон находится в закрытом состоянии и в цепи резистора $R1$ ток не протекает, транзистор $VT1$ закрыт. Падение напряжения на эмиттер-коллекторном переходе транзистора $VT1$ максимальное и оно обеспечивает открытое состояние транзистора $VT2$. Сопротивление цепи обмотки возбуждения $ОВ$ минимальное, ток возбуждения и напряжение генератора нарастают примерно по экспоненциальному закону.

Как только напряжение генератора станет больше напряжения пробоя стабилитрона, последний пробивается и ток в цепи резистора $R1$ резко возрастает. Скачком откроется тиристор $VT1$. Транзистор $VT2$ скачком перейдет в закрытое

состояние, что будет соответствовать разрыву цепи обмотки возбуждения генератора. Напряжение генератора будет уменьшаться до тех пор, пока напряжение на выводах генератора не станет меньше напряжения пробоя стабилитрона. Когда стабилитрон закроется, транзистор $VT1$ закроется, а транзистор $VT2$ снова откроется. Ток возбуждения генератора будет возрастать, что приведет к возрастанию напряжения генератора.

Таким образом, напряжение генератора будет пульсировать около некоторого среднего значения с частотой, определяемой параметрами измерительного органа и постоянной времени цепи возбуждения.

В случае уменьшения тока нагрузки и увеличения напряжения генератора увеличивается напряжение в цепи $R1 - VD1$. Это приведет к тому, что время открытого состояния транзисторам $VT2$ уменьшится, уменьшится до требуемого уровня и напряжение генератора, но частота пульсаций его увеличится. При увеличении тока нагрузки происходят обратные процессы.

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей или повышения установленной мощности источника электроэнергии САЭ, как правило, имеют резервные источники, которые работают совместно на общую шину. Такими резервными источниками являются аккумуляторные батареи или генераторы постоянного тока. Здесь необходимо учитывать, что при параллельной работе генераторов постоянного тока необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

- 1) полярность генераторов должна быть одинаковой;
- 2) напряжения генераторов должны быть равны;
- 3) генераторы должны нагружаться по возможности равномерно, пропорционально их номинальной мощности или должны иметь равную мощность.

3.2 Стабилизаторы напряжения и частоты тока синхронных генераторов

Стабилизация напряжения синхронных генераторов (СГ), так же как и стабилизация напряжения генераторов постоянного тока, осуществляется за счет изменения тока возбуждения генератора.

В качестве регуляторов напряжения СГ могут использоваться полупроводниковые стабилизаторы непрерывного и дискретного действия, которые применяются для стабилизации напряжения генераторов постоянного тока. Основное отличие заключается в том, что измерительные органы полупроводниковых регуляторов должны подключаться к зажимам СГ через трехфазный выпрямитель.

Однако отличительная особенность регулирования напряжения СГ заключается в необходимости обеспечения регулирования активной и реактивной мощности.

3.2.1 Стабилизатор напряжения на угольном регуляторе

Простейшая схема угольного регулятора СГ приведена на рис.3.3. В состав схемы входят: синхронный генератор – G с обмоткой возбуждения $ОВГ$; генератор возбуждения – G_s с обмоткой возбуждения $ОВВ$, выполняющий функции усилителя мощности; измерительный элемент – $ИЭ$, состоящий из трансформатора напряжения TV , трансформатора тока TA , выпрямителя VD и резистора уставки R_u ; исполнительный орган – $ИО$, состоящий из обмотки электромагнита $ОЭ$, реостата регулятора тока обмотки электромагнита R_p и сопротивления угольного реостата R_{yp} , включенного в цепь обмотки возбуждения возбуждателя.

Принцип работы стабилизатора напряжения непрерывного действия состоит в изменении сопротивления контактного

угольного реостата и соответственно тока в обмотке возбуждения СГ.

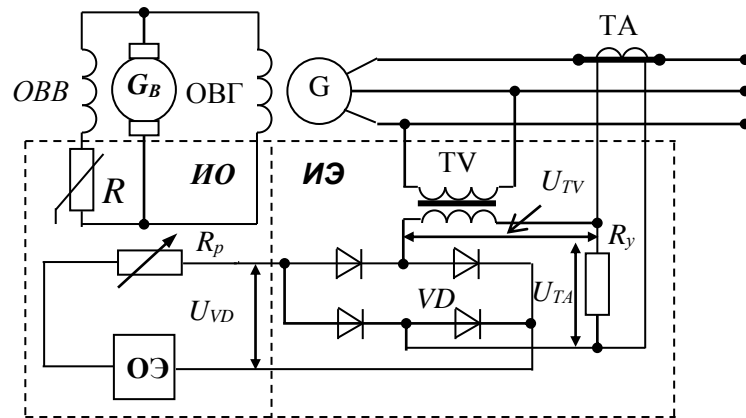


Рисунок 3.3 – Принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения синхронного генератора на угольном регуляторе

Принцип работы контактного угольного реостата основан на том, что электрическое сопротивление положенных друг на друга шайб, образующих угольный столб, зависит от силы, с которой сжимаются эти шайбы. С увеличением силы сжатия шайб, вследствие увеличения их контактирующих поверхностей и увеличения площади поперечного сечения реостата, сопротивление угольного столба уменьшается и, наоборот, с уменьшением силы сжатия – увеличивается. Сопротивление угольного столба зависит также от величины протекающего через него тока. Чем больше сила тока, тем больше температура угольного столба и тем меньше величина сопротивления угольного реостата.

Обмотка электромагнита ОЭ, якорь которого осуществляет сжатие угольного столба, питается от выпрямителя VD и трансформаторов TV и TA. Выпрямитель выполняет

две функции, первая – сумматора, а вторая – защитного устройства, предотвращающего обгорание шайб угольного реостата элемента ИЭ равно геометрической сумме двух напряжений, учитывающих величину активной и реактивной составляющих тока нагрузки, как показано на рис.3.4.

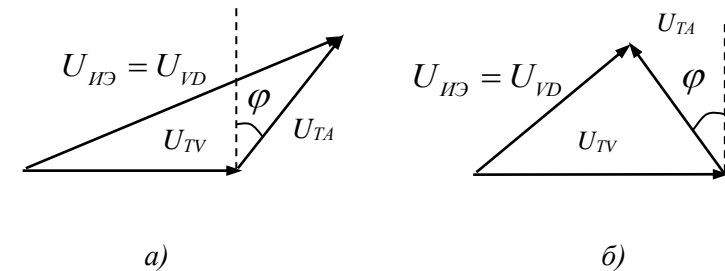


Рисунок 3.4 – Векторные диаграммы напряжений измерительного элемента: при индуктивной (а) и при емкостной (б) нагрузке

Как следует из рис.3.4, в зависимости от характера нагрузки изменяется величина напряжения на выходе выпрямителя U_{VD} , т.е. при индуктивной нагрузке, осуществляющей размагничивание генератора, измерительный элемент ИЭ обеспечивает увеличение напряжения (рис.3.4, а), а при емкостном характере нагрузки, осуществляющей намагничивание генератора – уменьшение напряжения U_{VD} . К примеру, при увеличении активно-индуктивной нагрузки напряжение на выходе генератора будет уменьшаться, но согласно рис.3.4, а выходное напряжение измерительного элемента увеличится, значит, увеличится тяговое усилие создаваемое обмоткой электромагнита ОЭ, якорь которого сжимает шайбы угольного реостата. Увеличение силы сжимающей шайбы приводит к уменьшению сопротивления угольного реостата и увеличению соответственно тока возбуждения в обмотке ОВГ, а значит к повышению напряжения генератора.

3.2.2 Стабилизатор частоты тока синхронного генератора

Стабилизация частоты тока выходного напряжения СГ в составе электромашинного преобразователя осуществляется путем принудительного изменения частоты вращения приводного двигателя. В качестве приводного двигателя, как правило, применяется двигатель постоянного тока. Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока имеет вид

$$n = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}M}{kx\Phi^2}, \quad (3.2)$$

где n – частота вращения двигателя постоянного тока; U – напряжение питания якоря двигателя; Φ – магнитный поток; $R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря; M – электромагнитный момент на валу двигателя; k, x – постоянные коэффициенты, учитывающие особенности конструкции двигателя.

Как следует из выражения (3.2), стабилизацию частоты вращения двигателя постоянного тока можно осуществлять за счет изменения напряжения питания якоря U , сопротивления цепи якоря $R_{\text{я}}$ или тока возбуждения двигателя, изменяющего величину магнитного потока Φ . Последний способ нашел широкое распространения, из-за относительной простоты его реализации.

Один из вариантов, схемы стабилизации частоты тока выходного напряжения электромашинного преобразователя, приведен на рис.3.5.

Стабилизатор тока состоит из измерительного элемента (ИЭ), выполненного на базе последовательного колебательно-го контура LC , резистора уставки $R_{\text{у}}$, трансформатора T и выпрямительного моста B , усилителя сигнала управления (УС), выполненного на базе магнитного усилителя МУ и исполнительного органа (ИО), в качестве которого используется обмотка возбуждения (ОВ) двигателя M и выпрямитель на диодах $VD1$ и $VD2$.

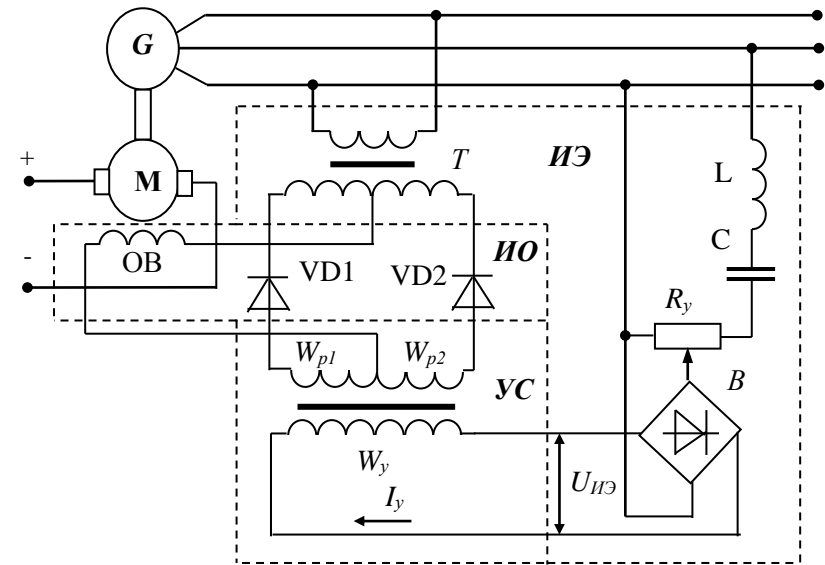


Рисунок 3.5 – Схема стабилизации частоты тока выходного напряжения синхронного генератора

Работа стабилизатора. Настройка измерительного элемента ИЭ осуществляется резистором уставки $R_{\text{у}}$, определяющего выбор рабочей точки частотной характеристики номинального режима. К примеру, частота выходного напряжения генератора уменьшилась. Это вызовет уменьшение величины выходного напряжения $U_{\text{ИЭ}}$ измерительного элемента, а значит и уменьшение тока управления $I_{\text{у}}$ магнитного усилителя МУ. Увеличится индуктивное сопротивление рабочих обмоток магнитного усилителя, что приведет к уменьшению тока в этих обмотках. Ток рабочих обмоток W_{p1} и W_{p2} является током возбуждения двигателя постоянного тока, поэтому уменьшение тока в рабочих обмотках приведет к уменьшению магнитного потока Φ , а значит к увеличению частоты

вращения n согласно (3.2) и соответственно повышению частоты выходного напряжения генератора.

3.2.3 Комбинированный стабилизатор напряжения синхронного генератора

Комбинированный стабилизатор состоит из регулятора по отклонению, обеспечивающего высокую точность регулирования напряжения генератора, и регулятора по возмущению, обеспечивающего быстродействие регулирования.

Стабилизацию напряжения по току нагрузки принято называть компаундированием, а регулирование по величине фазы тока нагрузки – фазовым компаундированием.

Для осуществления фазового компаундирования необходимо геометрическое сложение двух сигналов, один из которых пропорционален току нагрузки, а другой – напряжению генератора.

Схема, комбинированного регулятора реализующая данный принцип регулирования, приведена на рис.3.6. Она состоит из следующих элементов: трехфазного трансформатора тока $ТТ$, осуществляющего функцию измерительного элемента регулятора по возмущению; корректора напряжения $КН$, осуществляющего функцию измерительного элемента регулятора по отклонению; трехфазного дросселя $Д$ с обмоткой подмагничивания, осуществляющего функцию сумматора сигналов от трансформатора тока и корректора напряжения; выпрямителя возбуждения $ВВ$ – исполнительный орган комбинированного регулятора; выпрямителя независимого возбуждения $ВНВ$, осуществляющего начальное возбуждение генератора.

Ток нагрузки трансформатора тока $ТТ$ состоит из двух составляющих

$$I_{ТТ} = I_{ВВ} + I_{Г}, \quad (3.3)$$

где $I_{ВВ}$ – ток, потребляемый $ВВ$, пропорциональный величине тока нагрузки и углу сдвига фазы по отношению к напря-

жению генератора; $I_{Г}$ – ток, пропорциональный напряжению генератора.

Ток возбуждения генератора, согласно первого закона Кирхгофа, для узла 2 схемы равен

$$I_{ОВГ} = I_{ВНВ} + I_{ВВ}. \quad (3.4)$$

Подставив в (3.5) значение тока $I_{ВВ}$, полученного из (3.3), для средних значений токов получим, что

$$I_{ОВГ} = I_{ВНВ} + [I_{ТТ} - I_{Г}]. \quad (3.5)$$

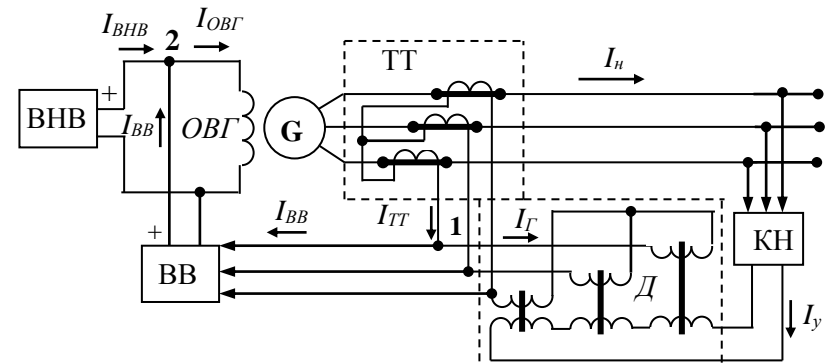


Рисунок 3.6 – Схема комбинированного стабилизатора напряжения синхронного генератора

Как следует из уравнения (3.5), алгоритм работы комбинированного регулятора напряжения можно описать следующим образом. К примеру, уменьшилось напряжение на выходе генератора, за счет увеличения величины и индуктивного характера нагрузки. Увеличится ток $I_{ТТ}$ и $I_{ОВГ}$, а значит, напряжение генератора $U_{Г}$ увеличится.

Однако увеличение тока СГ при активно-индуктивной нагрузке согласно внешней характеристике генератора вызовет уменьшение величины напряжения. Таким образом, алгоритм работы корректора напряжения $КН$ должен быть таким,

чтобы компенсировать это изменение напряжения. Следовательно, ток управления дросселя I_y , в этом случае, должен уменьшаться. Это вызовет уменьшение тока в рабочих обмотках дросселя I_G , а, следовательно, увеличится ток $I_{ОВГ}$, согласно выражения (3.3).

Для повышения установленной мощности АИП, как известно они включаются на параллельную работу. Параллельная работа СГ позволяет осуществить перераспределение нагрузки с работающего СГ на резервный и вывод работающего СГ, при необходимости, в резерв без нарушения электроснабжения потребителей. Устройства автоматики, в этом случае, должны обеспечить следующие условия необходимые для включения СГ на параллельную работу

- 1) равенство напряжений генераторов;
- 2) равенство частот напряжений генераторов;
- 3) равенства (совпадение) фаз генераторов;
- 4) одинаковый порядок чередования фаз.

3.3 Стабилизатор напряжения двухмашинного преобразователя

Электромашинный преобразователь (ЭМП) используется в СБЭ и предназначены для преобразования напряжения постоянного тока в однофазное или трехфазное напряжение переменного тока частотой 50 Гц (рис.3.7). Преобразователи обеспечивают автоматическую стабилизацию выходного напряжения номинальное значение которого равно 220 В .

КПД ЭМП с однофазным СГ составляет 48% , а с трехфазным СГ находится в пределах $(57 - 65) \%$.

Преобразователь представляет собой двухмашинный агрегат, который в качестве двигателя M использует машину постоянного тока и в качестве генератора G – машину переменного тока, объединенные блоком сопротивлений $БС$ и блоком регулирования $БР$, который состоит из двух регуляторов: $РЧ$ – регу-

лятора частоты и $КРН$ – комбинированного регулятора напряжения (рис.3.7).

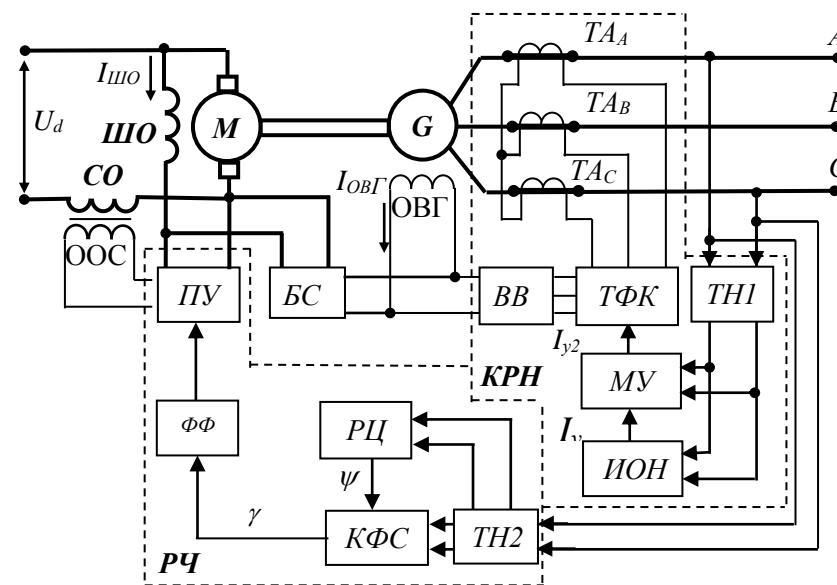


Рисунок 3.7 – Двухмашинный преобразователей электроэнергии

Регулятор частоты $РЧ$ обеспечивает стабилизацию частоты выходного напряжения U_n генератора G за счет изменения числа оборотов двигателя M . В его состав входят: $ТН2$ – трансформатор напряжения; $РЦ$ – резонансная цепь; $КФС$ – кольцевая фазочувствительная схема; $ФФ$ – фильтр-формирователь; $ПУ$ – полупроводниковый усилитель.

Регулятор $КРН$ обеспечивает стабилизацию выходного напряжения U_n , как по его отклонению от номинального значения, так и по изменению величины и характера нагрузки преобразователя за счет управления величиной тока возбуждения генератора $I_{ОВГ}$.

В его состав входят: *ТА* – трансформаторы тока нагрузки; *ТФК* – трансформатор фазового компаундирования; *МУ* – магнитный усилитель; *ИОН* – измерительный орган напряжения; *ВВ* – выпрямитель возбуждения.

Работа функциональной схемы. При подаче напряжения постоянного тока U_d на двигатель *М*, имеющий смешанное возбуждение (серийная обмотка *СО* и шунтовая обмотка *ШО*), он запускается и приводит во вращение генератор *Г*.

Часть напряжения U_d через блок сопротивлений *БС* используется для начального возбуждения генератора *Г*. В последующей работе преобразователя осуществляется контроль нагрузки (I_n, φ_n) , параметров выходного напряжения (U_n, f) и обеспечивается их стабилизация в зависимости от величины и характера нагрузки и величины входного напряжения U_d .

При изменении тока нагрузки I_n или его характера φ_n информация в виде изменения тока $I_{ОВГ}$ в обмотке возбуждения генератора по кратчайшему пути через трансформатор *ТФК*, выпрямитель *ВВ* поступает в обмотку *ОВГ*, что приводит к изменению величины напряжения U_n . Таким образом, обеспечивается быстрое действие регулирования по возмущению.

Изменение напряжения U_n контролируется измерительным органом *ИОН*, где сравнивается с заданной величиной и формируется сигнал управления I_{y1} . Этот сигнал усиливается в магнитном усилителе *МУ* и в качестве тока управления I_{y2} воздействует через трансформатор *ТФК* и выпрямитель *ВВ* на обмотку *ОВГ*, обеспечивая необходимое изменение тока $I_{ОВГ}$. В этом случае путь обработки информации регулятором более длительный, но и более точный из-за измерения ее в измерителе *ИОН*. Таким образом, обеспечивается высокая точность регулирования по отклонению напряжения. Регулятор *КРН* называется комбинированным, так как соединяет в себе высокое быстродействие и высокую точность.

Измерение частоты f выходного напряжения осуществляется блоком резонансной цепи *РЦ* и преобразуется в фазовый

угол ψ между двумя переменными напряжениями. Последующая обработка изменения фазы оценивается схемой *КФС*, которая формирует переменный ток с различным соотношением длительностей положительного и отрицательного полупериода (скважностью γ). Далее для управления усилителем *ПУ* фильтр *ФФ* выделяет только одну полярность сигнала *КФС*, тем самым, сохраняя скважность γ и формируя “пилообразные” импульсы тока. В усилителе *ПУ* с помощью *ФФ* “пилообразные” импульсы преобразуются в прямоугольные импульсы сформировавшейся скважности γ . Величина скважности γ определяет среднее значение тока возбуждения $I_{шо}$ обмотки *ШО* двигателя *М*, а, следовательно, и величину его магнитного потока Φ . Таким образом, изменение частоты f выходного напряжения приведет к изменению фазового сигнала ψ и соответственно скважности импульсов тока γ в обмотке *ШО*, что приведет к изменению числа оборотов двигателя *М*. При изменении числа оборотов двигателя с помощью обмотки обратной связи *ООС* осуществляется отрицательная гибкая обратная связь, что обеспечивает высокое качество стабилизации.

Стабилизация частоты вращения двигателя постоянного тока, и соответственно, частоты генерируемого напряжения, осуществляется изменением величины тока в шунтовой обмотке *ШО*, за счет изменения времени открытого состояния силового транзистора *ПУ*, включенного последовательно с шунтовой обмоткой.

Принципиальная электрическая схема регулятора частоты *РЧ* показана на рис.3.8, а на рис.3.9 приведены диаграммы напряжений и токов схемы, поясняющие принцип ее работы.

Работа регулятора частоты. Схемы *КФС*, *РЦ* и *ФФ* являются измерительным органом регулятора частоты. Напряжение с вторичной обмотки трансформатора *ТН2* подается в диагональ моста кольцевой фазочувствительной схемы *КФС* (узлы 1 и 2), на вторую диагональ моста (узлы 3 и 4)

подается напряжение с вторичной обмотки дросселя $L1$. Вторичные обмотки трансформатора и дросселя, осуществляющие питание $K\Phi C$, имеют отпайки от средних точек, являющиеся выходными узлами измерительного органа частоты, к которым через фильтр-формирователь $\Phi\Phi$ подключен полупроводниковый усилитель $ПУ$ (на рис.3.8 показан только один транзистор промежуточного усилителя $VT1$).

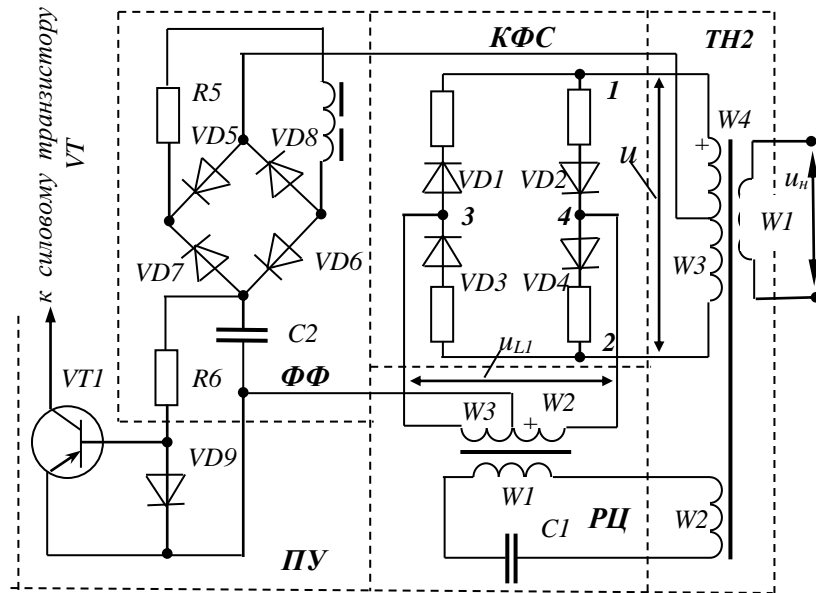


Рисунок 3.8 – Принципиальная электрическая схема регулятора частоты

Фильтр формирователь $\Phi\Phi$ состоит из диодного моста ($VD5 - VD8$), конденсатора $C2$, резистора $R6$ и подключенных на постоянной стороне диодного моста резистора $R5$ и дросселя $L2$. За счет наличия нелинейного элемента (диодного моста) переменная составляющая тока в цепи фильтра имеет прямоугольную форму. Этот ток, протекает через

конденсатор $C2$, вызывает на нем появление напряжения треугольной формы, амплитуда которого зависит от величины сопротивления резистора $R5$ и емкости конденсатора $C2$.

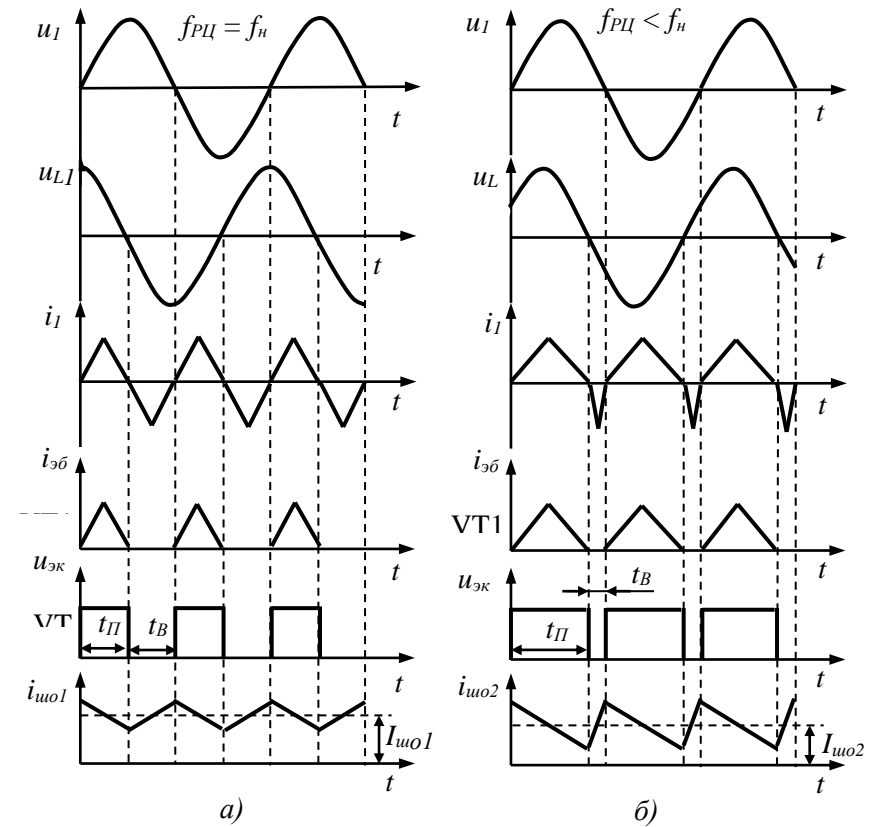


Рисунок 3.9 – Диаграммы напряжений и токов схемы регулятора частоты, поясняющие принцип его работы

Емкость конденсатора $C2$ подбирается так, чтобы амплитуда переменной составляющей напряжения была равна по величине отклонению постоянной составляющей напряжения, вызванного изменением частоты в допустимых пределах,

при этом амплитуда переменной составляющей остается практически неизменной в пределах изменения частоты генератора. Переменная составляющая выходного напряжения измерительного органа служит модулирующим сигналом для полупроводникового усилителя ПУ, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции.

Протекание тока (например, i_l) в КФС происходит по тем диодам $VD1$, $VD3$ или $VD2$, $VD4$ которые открыты на данный момент времени напряжением u_l обмоток $W3$ и $W4$ трансформатора $TH2$ (рис.3.7). Источником управляющего сигнала для транзистора $VT1$ является напряжение u_{L1} обмоток $W2$ и $W3$ дросселя $L1$. При этом направление тока i_l будет положительным и отпирающим для транзистора $VT1$, когда напряжения u_l и u_{L1} совпадают по фазе, иначе - отрицательным (рис.3.9). К примеру, будем считать полярность положительного напряжения на вторичных обмотках $TH2$ и $L1$, соответствует знакам рис.3.8, тогда ток i_l будет протекать по цепи: «+» w_2L1 , эб $VT1$, $R6$, $VD7$, $R5$, $L2$, $VD8$, w_4TH2 , $R2$, $VD2$, «-» w_2L1 .

Когда частота резонансного контура схемы $PЦ$ $f_{PЦ}$ равна номинальной частоте напряжения генератора f_H диаграммы напряжений и токов элементов схемы $PЧ$ приведены на рис.3.9, а. Как видно из рисунка, средняя величина тока $I_{шО1}$ в шунтовой обмотке двигателя постоянного тока M определяется соотношением времени включения t_B и времени паузы $t_{П}$ работы транзистора $VT1$, что соответствует номинальному значению магнитного потока статора двигателя. В случае, когда $f_{PЦ} < f_H$ уменьшается время включения t_B транзистора $VT1$ и, соответственно, силового транзистора VT . Средняя величина тока $I_{шО2}$ уменьшается, что вызывает уменьшение магнитного потока двигателя M (рис.3.7), а, следовательно, и увеличение его частоты вращения (рис.3.9, б).

Стабилизация напряжения СГ электромашинного преобразователя осуществляется комбинированным регулятором

напряжения KPH (рис.3.7), за счет изменения величины тока возбуждения $I_{ОВГ}$ в обмотке возбуждения генератора.

Работа регулятора напряжения. Регулируемое напряжение U_H подается на первичную обмотку трансформатора $TH1$. Выпрямленное напряжение вторичной обмотки $TH1$ подключается к входу нелинейного измерительного моста (узлы 1 и 2). Напряжение рассогласования снимается с узлов 3 и 4. Величина напряжения рассогласования определяется по формуле

$$U_{34} = U_{23} - U_{24}. \quad (3.6)$$

Кривые зависимости напряжений U_{34} , U_{23} и U_{24} от величины входного напряжения U_H , приведены на рис.3.10. Точка a соответствует началу проводимости стабилитронов $VD17$ и $VD18$. Точка $в$ соответствует значению, регулируемого напряжения, при котором мост уравновешен и напряжение на его выходе равно нулю. Если напряжение U_H отклонится от этого значения в сторону увеличения, то на входе магнитного усилителя $MУ$ появляется сигнал, который выходной ток его, что то же самое, подмагничивающий ток трансформатора $ТФК$ увеличит и тем самым воспрепятствует повышению напряжения. При снижении напряжения U_H физические явления в схеме протекают в противоположном направлении.

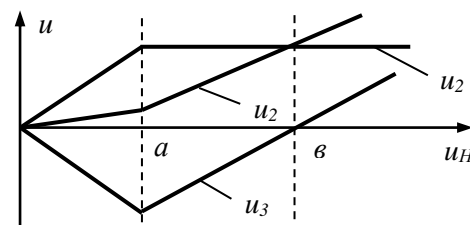


Рисунок 3.10 — Кривые зависимости напряжений между характерными узлами измерительного органа

Зона в точке $в$ (рис.3.10) является рабочей областью ИОН.

$MУ$ применяется для усиления сигналов, поступающих от ИОН. Его нагрузкой являются обмотки управления трансформатора $ТФК$.

3.4 Стабилизатор напряжения трехмашинного преобразователя

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей электроэнергии в составе САЭ применяются трехмашинные преобразователи. Один из вариантов такого преобразователя приведен на рис.3.11, в состав которого входят: двигатель постоянного тока - *М1*; асинхронный двигатель - *М2*; синхронный генератор - *Г*. В состав системы стабилизации напряжения входит станция управления *СУ*, содержащая блок регулирования частоты *БРЧ*, блок токовой защиты *БТЗ*, блок регулирования напряжения *БРН*, блок контроля напряжения *БКН*, блок защиты *БЗ*, пусковое сопротивление *ПС*, аккумуляторные батареи *АБ* и преобразователь статический стабилизированный *ПСС*. На рис.3.11 показана также шина гарантированного питания *ШГП*.

В состав *БРЧ* входят: *РТ* – разделительный трансформатор; *ЗР* – схема защиты от разноса; *ЧД* – частотный датчик; *ВУ* – входной усилитель; *ФУ* – фазосдвигающее устройство; *УУ* – узел управления; *В* – выпрямительный мост.

Блок регулирования частоты *БРЧ* предназначен для стабилизации частоты вращения двигателя постоянного тока *М1* и его защиты от разноса. При этом частотный датчик *ЧД* формирует напряжение, прямо пропорциональное частоте напряжения синхронного генератора *Г*. Входной усилитель *ВУ* усиливает сигнал, приходящий от *ЧД*. Фазосдвигающее устройство *ФУ* предназначено для изменения угла управления тиристоров выпрямителя, а узел управления *УУ* непосредственно формирует импульсы управления для тиристоров однофазной мостовой схемы выпрямителя *В*.

Схема защиты от разноса *ЗР* осуществляет защиту двигателя постоянного тока при повышении его оборотов на 10 – 15% больше от номинального значения.

Выпрямительный мост *В* питается от напряжения синхронного генератора *Г* через разделительный трансформатор *РТ*. Об-

мотка возбуждения двигателя *ОВД* включена на выход выпрямителя. Ток в обмотке возбуждения изменяется от нуля до максимального значения и определяется временем открытого состояния тиристоров выпрямителя *В* и сопротивлением цепи обмотки возбуждения.

Блок токовой защиты *БТЗ* осуществляет функции защиты источника и потребителей электроэнергии переменного тока от коротких замыканий.

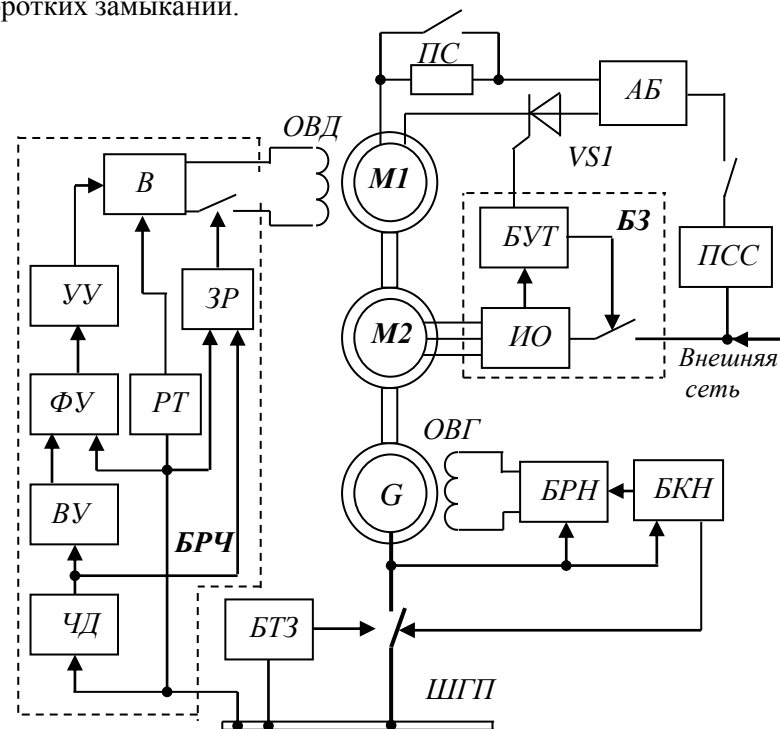


Рисунок 3.11 – Функциональная схема трехмашинного преобразователя

Блок регулирования напряжения *БРН* предназначен для стабилизации напряжения синхронного генератора *Г* путем

изменения величины тока, протекающего через обмотку его возбуждения *ОВГ*.

Блок контроля напряжения переменного тока *БКН* осуществляет автоматический контроль напряжения цепей переменного тока и формирует сигналы о состоянии контролируемой сети путем замыкания или размыкания контактов исполнительного реле. Блок защиты *БЗ* содержит блок управления тиристорами *БУТ* и измерительный орган *ИО*. Он предназначен для защиты асинхронного двигателя *М2* при обрыве фазы, при пропадании питающего напряжения от недопустимых отклонений (симметричного снижения и асимметрии питающего напряжения) и подачи сигнала на отпирание тиристоров в якорной цепи двигателя постоянного тока. При этом измерительный орган *ИО* контролирует изменение параметров электроэнергии, а блок управления тиристорами *БУТ* является исполнительным устройством. Блок управления тиристорами допускает симметричное снижение напряжения по фазам (провал) до 40% и несимметричность напряжения по фазам (перекос) в пределах $\pm 10\%$ от номинального напряжения.

Преобразователь *ПСС* служит для заряда и подзаряда аккумуляторной батареи *АБ*. При включении двигателя постоянного тока *М1* в работу происходит его автоматическое отключение.

Станция управления *СУ* осуществляет запуск двигателя постоянного тока *М1* от аккумуляторной батареи *АБ* через пусковое сопротивление *ПС*. После разгона двигателя *СУ* осуществляет включение его непосредственно на напряжение *АБ*.

Как только частота вращения двигателя достигает номинальных значений и при достижении напряжения на генераторе $0,9U_H$, *СУ* отключает его, и привод синхронного генератора осуществляется от асинхронного двигателя *М2*, питание которого обеспечивается внешней сетью.

При исчезновении внешней сети привод источника электроэнергии также осуществляет двигатель постоянного тока *М1*, питание которого происходит от *АБ*.

Под действием внешних факторов (увеличения нагрузки или уменьшения напряжения питания якоря двигателя постоянного тока) уменьшается частота вращения двигателя, что приводит к уменьшению напряжения на выходе частотного датчика *ЧД*. Это, в свою очередь, способствует уменьшению угла сдвига фаз выходного напряжения фазосдвигающего устройства *ФУ* по отношению к напряжению на тиристорах выпрямительного моста *В*. Импульсы управления поступают, на тиристоры выпрямителя со сдвигом по фазе относительно напряжения на тиристорах (угол сдвига фаз определяется величиной напряжения на выходе *ЧД*). В результате ток возбуждения двигателя постоянного тока уменьшится, что приведет к увеличению его оборотов.

Если под воздействием внешних факторов увеличивается частота вращения двигателя, схема обрабатывает сигнал так, что увеличивается ток возбуждения двигателя, а это приводит к уменьшению его оборотов.

При изменении величины или характера нагрузки происходят изменения напряжения синхронного генератора *G*, в этом случае стабилизацию напряжения осуществляет блок регулирования напряжения *БРН* путем изменения величины тока, протекающего через обмотку возбуждения генератора *ОВГ*.

3.5 Стабилизаторы напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами

Синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ) отличаются высокой надежностью работы, имеют повышенный КПД, в сравнении с СГ с электромагнитным возбуждением, из-за бесконтактного их исполнения. Основным недостатком СГПМ – это сложность стабилизации выходного напряжения, поскольку рабочий поток постоянных магнитов нельзя изменять в широких пределах.

Для стабилизации напряжения СГПМ используются специальные методы, заключающиеся в подключении к внешней электрической цепи генератора конденсаторов, дросселей с

обмотками подмагничивания которые выполняют функцию компенсирующих устройств. Однако дополнительные устройства значительно увеличивают габариты и массу источника электроэнергии. Эффективным способом, обеспечивающим стабилизацию СГПМ, является использование в конструкции генератора дополнительной обмотки подмагничивания постоянного тока. Обмотка подмагничивания изменяет степень насыщения стального магнитопровода и изменяет, таким образом, внешнюю магнитную проводимость по отношению к магниту. Дополнительная обмотка укладывается в те же пазы статора генератора, что и основная обмотка.

Вариант схемы стабилизации напряжения СГПМ, в конструкции которого имеется обмотка подмагничивания, приведен на рис.3.12. В состав регулятора входят: измерительный элемент *ИЭ*, состоящий из схемы выпрямления, регулировочного реостата R_p , конденсаторного фильтра C и стабилитрона $VD1$, выполняющего функции источника опорного напряжения; исполнительный орган *ИО*, в качестве которого используется обмотка подмагничивания *ОП* и выпрямитель на диодах $VD2$ и $VD3$ с трансформатором напряжения TV ; усилитель $У$, выполненный на базе магнитного усилителя $МУ$ с рабочей обмоткой W_p и обмоткой управления W_y .

Стабилизатор напряжения работает следующим образом. В измерительном элементе *ИЭ* происходит сравнение напряжения конденсатора C , которое пропорционально напряжению генератора, с опорным напряжением стабилитрона $VD1$. Напряжение на выходе измерительного элемента определяется как разность двух напряжений

$$U_{ИЭ} = U_C - U_{VD1}. \quad (3.7)$$

Если величина напряжения $U_C > U_{VD1}$, то в обмотке управления магнитного усилителя $МУ$ увеличится ток управления I_y , увеличится значение тока в рабочей обмотке усилителя, а, следовательно, и в обмотке подмагничивания. При этом магнитная проницаемость спинки статора и рабочий магнитный поток генератора уменьшаются, соответственно и

уменьшается и напряжение генератора G до номинального значения. Если же под действием нагрузки напряжение СГПМ уменьшается, то ток в обмотке подмагничивания *ОП* будет автоматически уменьшаться, а напряжение генератора будет увеличиваться.

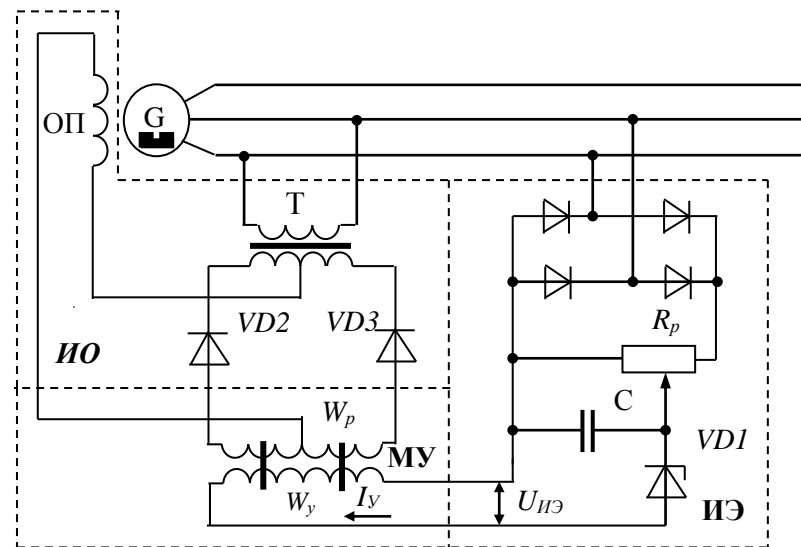


Рисунок 3.12 – Схема стабилизатора напряжения СГПМ

Для улучшения эксплуатационно-технических характеристик САЭ разработана функциональная схема стабилизации напряжения и частоты тока СГПМ, приведенная на рис.3.13. Стабилизация напряжения генератора осуществляется за счет применения обмотки подмагничивания в конструкции генератора и блока стабилизации напряжения, выполненного на транзисторе. Стабилизация частоты тока СГПМ осуществляется за счет размещения изменения тока управления обмотки электромагнитной муфтой, размещенной на одном валу с приводным двигателем.

На рис.3.13 представлена функциональная схема устройства стабилизации напряжения и частоты СГПМ, на рис.3.14 – диаграммы напряжений, поясняющие работу блока стабилизации напряжения, а на рис.3.15 – диаграммы напряжений, поясняющие работу блока стабилизации частоты.

Устройство стабилизации напряжения и частоты ВЭУ содержит (рис.3.13): приводной двигатель ПД, соединен через ведущий вал с электромагнитной муфтой ЭМ, имеющей обмотку управления ОУ, и с ротором СГПМ. СГПМ имеет выводы А, В и С к которым подключены блок конденсаторов возбуждения БКВ, блок стабилизации напряжения БСН, блок стабилизации частоты БСЧ.

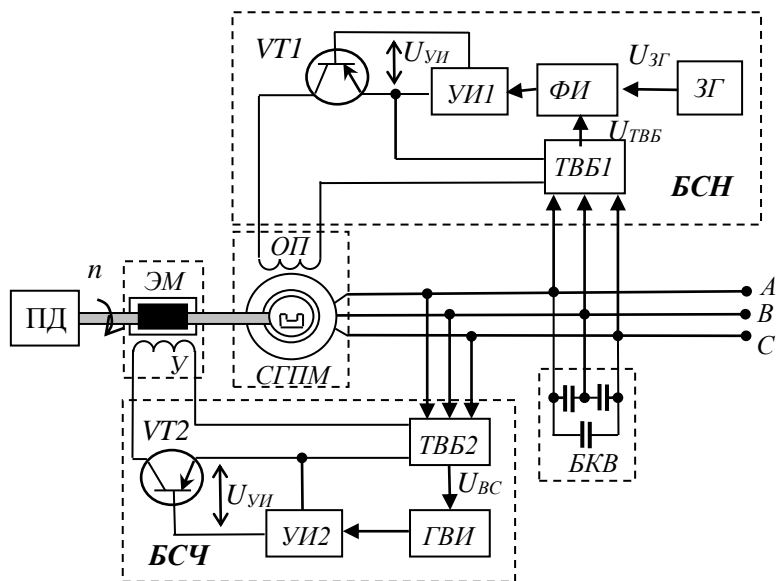


Рисунок 3.13 – Функциональная схема устройства стабилизации напряжения и частоты тока СГПМ

Блок стабилизации напряжения БСН содержит трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ1, задающий генератор ЗГ, формирователь импульсов ФИ, усилитель импульсов УИ1, транзистор VT1, эмиттер-коллекторный переход которого последовательно соединен с обмоткой подмагничивания ОП, размещенной в пазах статора СГПМ с основной обмоткой.

Блок стабилизации частоты БСЧ содержит генератор ведущих импульсов ГВИ, усилитель импульсов УИ2, трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ2 и транзистор VT2, эмиттер-коллекторный переход которого последовательно соединен с обмоткой управления ОУ электромагнитной муфты ЭМ.

Устройство стабилизации напряжения и частоты тока СГПМ работает следующим образом. Ведущий вал электромагнитной муфты ЭМ и соответственно ротор генератора вращаются с частотой n_1 . Через обмотку управления ОУ электромагнитной муфты ЭМ и обмотку подмагничивания генератора ОП протекают постоянные токи. Генератор возбуждается за счет магнитного потока, создаваемого постоянными магнитами, и емкостного тока блока конденсаторов возбуждения БКВ и на его выводах статорных обмоток А, В и С наводится трехфазная система ЭДС. При дестабилизирующих факторах: изменениях частоты вращения приводного двигателя ПД, отклонениях напряжения на нагрузке и изменениях ее величины и характера блоки стабилизации напряжения и частоты, соответственно БСН и БСЧ, автоматически осуществляют стабилизацию напряжения и частоты генерируемого СГПМ.

Блок стабилизации напряжения БСН работает следующим образом. На первый вход формирования импульсов ФИ поступает сигнал постоянного тока от трансформаторно-выпрямительного блока ТВБ1, пропорциональный выходному напряжению генератора $U_{ТВБ}$, а на второй его вход поступает сигнал от задающего генератора ЗГ $U_{ЗГ}$ пилообразной формы (рис.3.14, а). Когда $U_{ЗГ} < U_{ТВБ}$, формирователь импульсов управления ФИ формирует сигнал $U_{У1}$ (рис.3.14, б), который через усилитель импульсов УИ1 поступает на управляющие электроды

транзистора $VT1$. К примеру, если напряжение на выводах генератора увеличится, тогда увеличится напряжение постоянного тока на выходе $TBB1$ (рис.3.14, в), увеличится длительность сигнала управления U_{Y1} , увеличится угол управления транзистора с α_1 до α_2 (рис.3.14, г) и, соответственно, увеличится время открытого состояния транзистора $VT1$, а это приведет к увеличению тока подмагничивания в обмотке $ОП$ (рис.3.13). Магнитный поток, создаваемый обмоткой $ОП$, направлен встречно рабочему магнитному потоку, создаваемого статорными обмотками генератора СГПМ, поэтому изменяется степень насыщения его магнитопровода и уменьшается напряжение на выводах A , B и C .

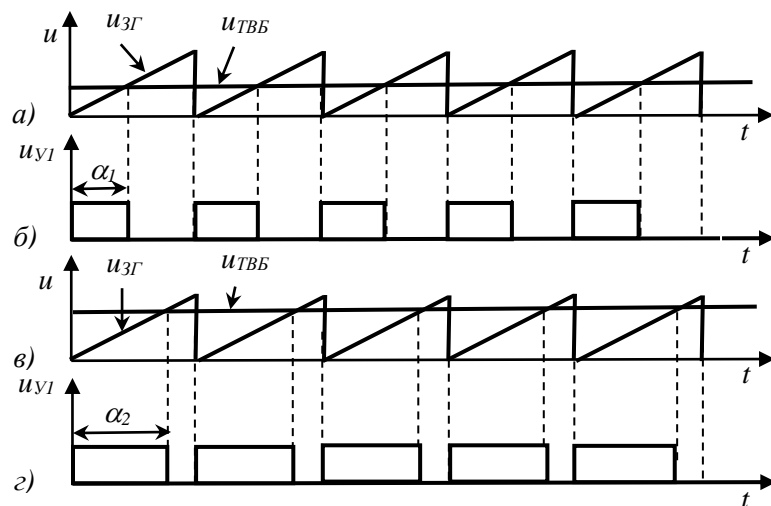


Рисунок 3.14 – Диаграммы напряжений, поясняющие работу блока стабилизации напряжения СГПМ

Блок стабилизации частоты $БСЧ$ работает следующим образом. На вход генератора ведущих импульсов $ГВИ$ поступает сигнал U_{BC} (рис.3.15, a) от трансформаторно-выпрямительного блока $TBB2$, синхронный с частотой выходного напряжения пре-

образователя генератор ведущих импульсов $ГВИ$ формирует импульсы управления U_{Y2} при переходе синусоидального напряжения через ноль (рис.3.15, a , $б$), которые через усилитель импульсов $УИ2$ поступают на управляющие электроды транзистора $VT2$. К примеру, если частота напряжения увеличилась (рис.3.15, $в$), тогда увеличится частота управляющего сигнала U_{Y2} и увеличится общее время открытого состояния транзистора $VT2$, за период номинальной частоты. Это приведет к увеличению тока в обмотке управления $ОУ$ электромагнитной муфты $ЭМ$, и соответственно к уменьшению крутящего момента на валу ротора генератора и уменьшению частоты напряжения.

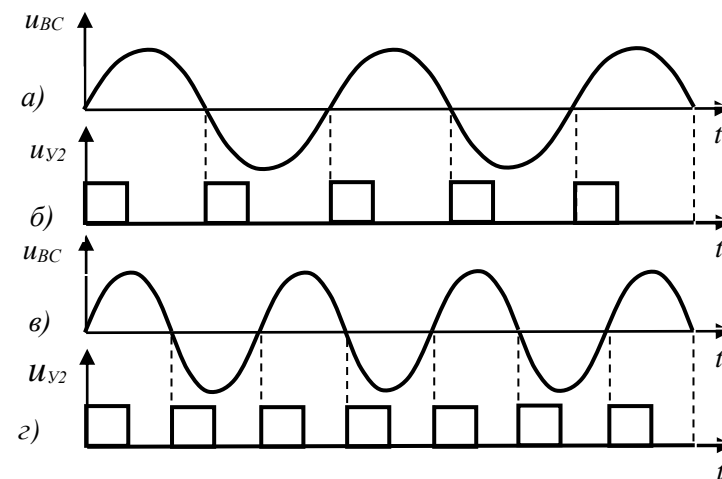


Рисунок 3.15 – Диаграммы напряжений, поясняющие работу блока стабилизации частоты тока СГПМ

Применение, разработанного устройства для стабилизации напряжения и частоты тока СГПМ позволит улучшить эксплуатационно-технические характеристики АИЭ.

3.6 Стабилизаторы напряжения асинхронного генератора

В течение последних лет, как в нашей стране так и зарубежом, теоретические исследования и практический опыт показывают перспективы применения самовозбуждающихся АГ в качестве АИЭ средней мощности (до 200 кВт) с приводом от высокоскоростных ПД.

Применение АГ долгое время сдерживалось в основном по двум причинам: из-за отсутствия малогабаритных силовых конденсаторов, обеспечивающих возбуждение генератора и компенсацию реактивной мощности нагрузки, а так же из-за сложности стабилизации выходного напряжения.

Разработанные в последние годы конденсаторы имеют удельную массу не превышающую $0,1 \text{ кг/кВА}$, с развитием устройств бесконтактного управления емкостью, с использованием полупроводниковых элементов и интегральных микросхем, а также с появлением ПД с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками практически снимаются ограничения по использованию АГ в стабилизированных по напряжению АИЭ.

Известные способы регулирования и стабилизации напряжения АГ связаны с применением относительно тяжелых и громоздких по отношению к генератору внешних дополнительных устройств (конденсаторов, дросселей, трансформаторов, полупроводниковых приборов).

Один из эффективных способов стабилизации напряжения асинхронных генераторов (АГ) – введение во внешнюю электрическую цепь генератора емкостных элементов, способствующих появлению продольно намагничивающей реакции якоря.

Конденсаторы, обеспечивающие емкостный характер нагрузки, включаются последовательно в цепь нагрузки (рис.3.16, а) или через повышающий трансформатор, который позволяет уменьшить массу конденсаторов за счет увеличения их рабочего напряжения и снижения тока (рис.3.16, в). Возможно

также включение конденсаторов в цепь генератора по схеме «звезда» (рис.3.16, б) и по схеме «треугольник» (рис.3.16, г), в первом случае к конденсаторам прикладывается фазное напряжение, а во втором – линейное (чем выше напряжение, приложенное к конденсаторам, тем меньше их емкость, обеспечивающая возбуждение АГ).

При определении удельной массы АГ, предназначенного для работы в САЭ, необходимо учитывать как собственно массу генератора, так и конденсаторного блока.

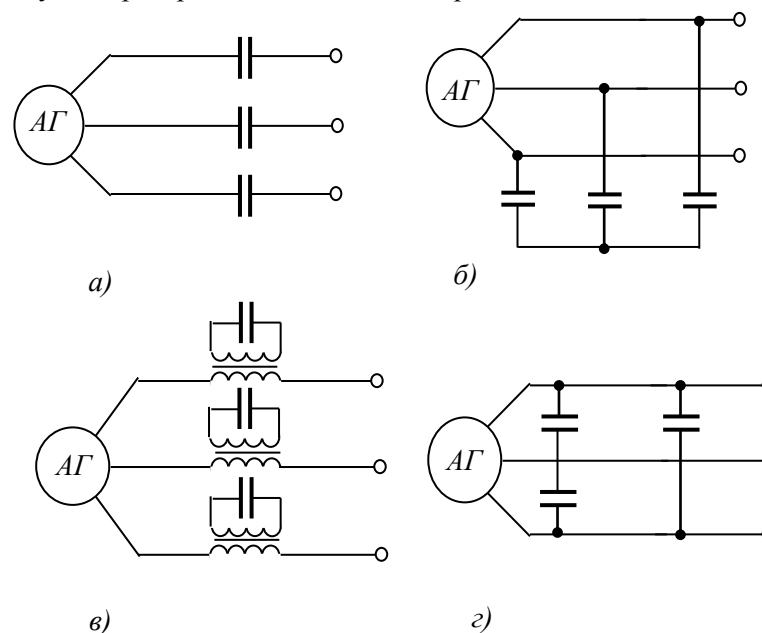


Рисунок 3.16 – Схемы включения конденсаторов в цепь АГ

В общем случае емкость конденсаторов, обеспечивающих самовозбуждение генератора на холостом ходу и компенсацию реактивной мощности нагрузки, определяется по формуле

$$C = \frac{P_n(tg \varphi_r + tg \varphi_n)}{2\pi f m U_c^2}, \quad (3.8)$$

где P_n – мощность, отдаваемая генератором; U_c – напряжение на конденсаторах; f – частота тока; φ_r и φ_n – углы сдвига фаз между напряжениями и токами генератора и нагрузки; m – число фаз.

Мощность конденсатор АГ определяется по формуле

$$Q_c = \frac{m U_c^2}{X_c} = 2\pi f m C U_c^2. \quad (3.9)$$

С повышением частоты генерируемого напряжения (3.8) значительно уменьшается масса конденсаторов АГ. Так для $P = 50 \text{ кВт}$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$ масса конденсаторов $M_c \approx 16 \text{ кг}$, а при $f = 800 \text{ Гц}$ – $M_c \approx 2 \text{ кг}$. Кроме того, с учетом выражения (3.8) можно сделать вывод о том, что емкость конденсаторных батарей АГ и соответственно их масса зависят и от коэффициента мощности нагрузки. В общем случае для мощности АГ находящейся в пределах $10 - 50 \text{ кВт}$ и $n > 6000 \text{ об/мин}$ удельная масса собственно генератора не превышает 1 кг/кВт , а удельная масса конденсаторов при $f = 400 \text{ Гц}$ примерно равна $0,05 \text{ кг/кВт}$. Таким образом, полная удельная масса АГ с приводом от высокоскоростных двигателей имеет порядок $m_{AG} = 1 - 1,1 \text{ кг/кВт}$, что позволяет сделать вывод о хороших удельных характеристиках генератора.

На рис.3.17 представлена функциональная схема трехфазного стабилизатора напряжения АГ, выполненная на оптосимисторах. Коммутация ответвлений в статорных обмотках АГ осуществляется оптосимисторами. Включенные между генератором и стабилизатором конденсаторы, выполняют не только функции возбуждения генератора и компенсации реактивной мощности нагрузки, но и являются входными фильтрами стабилизатора, что позволяет не искажать форму генерируемого напряжения.

Трехфазный стабилизатор обеспечивает стабилизацию напряжения в несимметричных режимах работы трехфазной системы, кроме того, принцип работы оптосимисторов позволяет обеспечить гальваническую развязку между силовой частью стабилизатора и его системой управления.

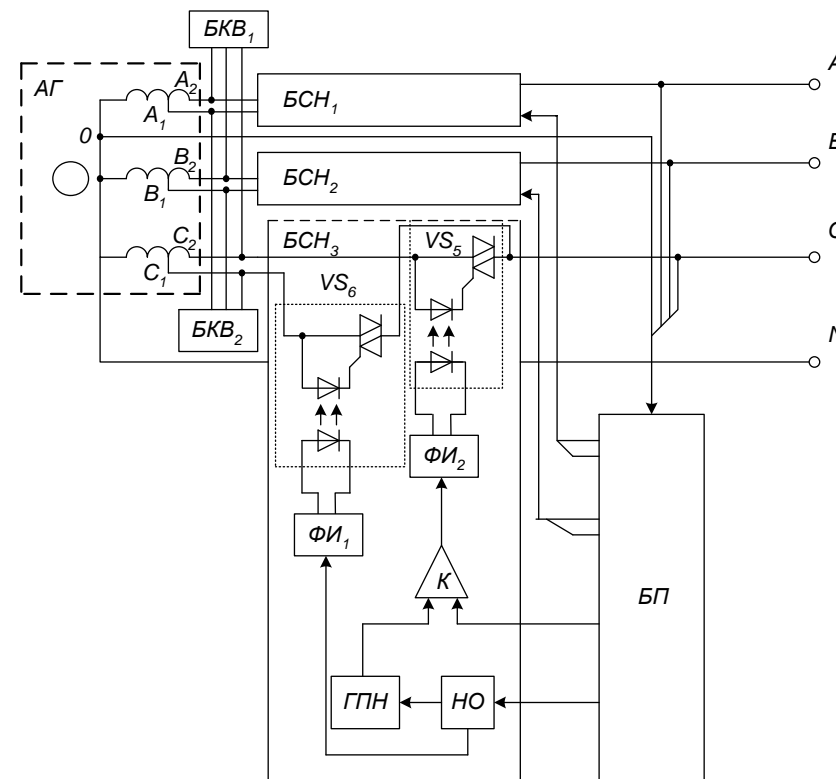


Рисунок 3.17 – Функциональная схема трёхфазного стабилизатора напряжения АГ на оптосимисторах

Стабилизатор напряжения содержит два трехфазных блока конденсаторов возбуждения $БКВ_1$ и $БКВ_2$, три блока стабилизации напряжения $БСН_1$, $БСН_2$, $БСН_3$, блок питания $БП$,

(рис.3.17). Каждый из блоков стабилизации напряжения содержит по два оптосимистора (на рис.3.17 показаны VS_5 и VS_6), нуль-орган HO , генератор пилообразного напряжения $ГПН$, компаратор K , формирователи импульсов $\Phi И_1$ и $\Phi И_2$.

Новизна технического решения трехфазного стабилизатора напряжения обусловлена тем, что в устройстве используются три блока стабилизации напряжения $БСН$, содержащие два оптосимистора и систему управления $СУ$, каждая из статорных обмоток генераторов АГ имеют по два вывода, к которым подключены первый и второй трехфазные блоки конденсаторов возбуждения $БКВ_1$ и $БКВ_2$. Применение трех блоков стабилизации напряжения $БСН$, позволяет стабилизировать напряжение бесконтактных генераторов, как АГ, так и СГПМ, в несимметричных режимах, снизить инерционность системы стабилизации и тем самым повысить её быстродействие, кроме того, обеспечивается гальваническая развязка между силовой частью стабилизатора и его системой управления.

Стабилизатор напряжения работает следующим образом. При вращении ротора генератора АГ (рис.3.17) от приводного двигателя он возбуждается за счёт емкостного тока трехфазных блоков конденсаторов возбуждения $БКВ_1$ или $БКВ_2$ и на выводах статорных обмоток A_1, B_1, C_1 или A_2, B_2, C_2 наводится ЭДС.

На примере блока стабилизации напряжения $БСН_3$ рассмотрим принцип работы системы управления. В номинальном режиме работы фазное напряжение U_n (рис.3.18, а) поступает на вход нуль-органа HO , на выходе которого формируется импульсы, синхронные с нулевыми значениями напряжения генератора U_n (рис. 3.18, б). Синхронизирующие импульсы через первый формирователь импульсов $\Phi И_1$ поступают на управляющий вход оптосимистора VS_5 , который открывается и на выводах генератора 0 и C_1 формируется напряжение U_{0-C1} (рис. 3.18, д). Синхронизирующие импульсы поступают также на вход генератора пилообразного напряжения $ГПН$, на выходе которого формируется опорный сигнал U_{oc} пилообразной формы (рис. 3.18, в).

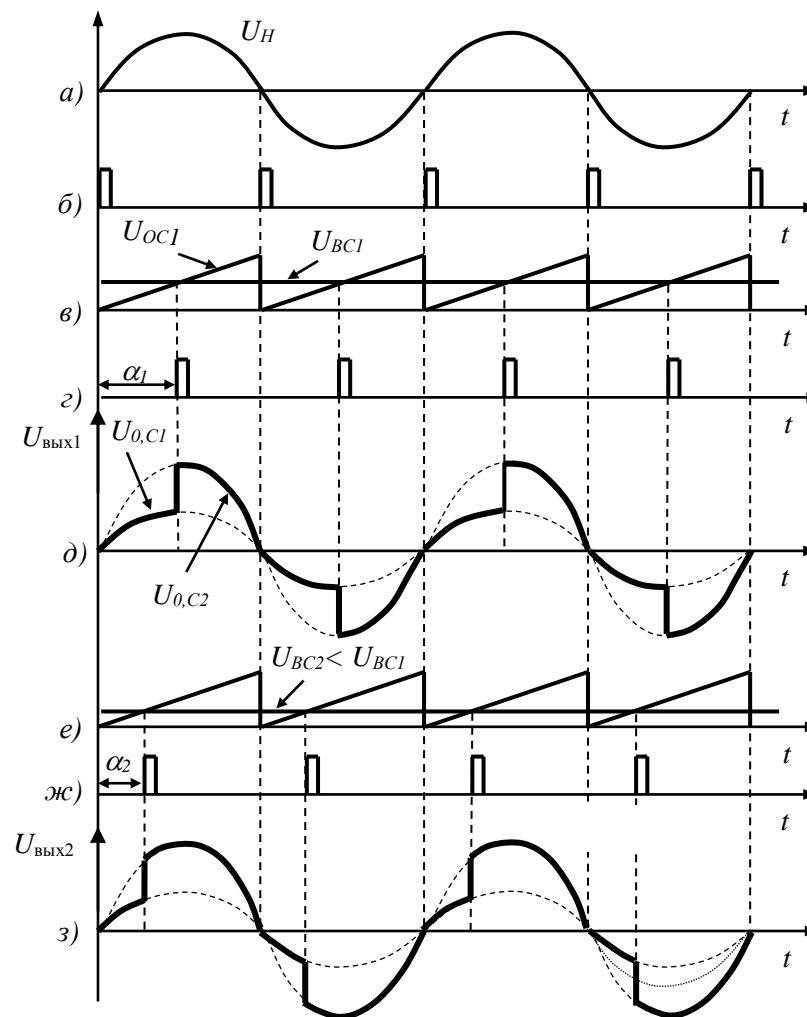


Рисунок 3.18 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип работы стабилизатора напряжения АГ, выполненного на оптосимисторах

Сигнал пилообразной формы поступает на первый вход компаратора K (рис. 3.17). На второй вход компаратора K поступает ведущий сигнал U_{ec1} напряжения постоянного тока (рис. 3.18, в), который пропорционален напряжению генератора U_n . Когда величина опорного сигнала больше, чем величина ведущего сигнала, т.е. когда $U_{oc} > U_{ec1}$, на выходе компаратора K формируются управляющие импульсы (рис. 3.18, г), которые через формирователь импульсов управления $\Phi И$ поступают на управляющий вход оптосимистора VS_6 (рис. 3.17). Оптосимистр VS_6 включается, это приводит к естественной коммутации (закрытию) оптосимистора VS_5 и на выходах статорной обмотки генератора O и C_2 формируется напряжение U_{0-C2} (рис. 3.18, д). После того, как изменится полярность напряжения, прикладываемого к оптосимистору VS_6 , он закрывается и далее физические процессы повторяются. В результате при поочередной работе оптосимисторов VS_5 и VS_6 формируется напряжение $U_{вых1}$ (рис. 3.18, д). Если, к примеру, напряжение на нагрузке уменьшается, тогда уменьшается величина напряжения источника ведущего сигнала, т.е. $U_{ec2} < U_{ec1}$, (рис. 3.18, е). Угол управления оптосимисторами VS_6 уменьшится ($\alpha_2 < \alpha_1$, рис. 3.18, г, ж), и напряжение $U_{вых2}$ увеличится ($U_{вых2} > U_{вых1}$, рис. 3.18, д, з).

На рис.3.19 приведена функциональная схема стабилизатора напряжения АГ, выполненная на повышающих трансформаторах, на рис.3.20 – векторная диаграмма напряжений во вторичных обмотках повышающих трансформаторов, на рис.3.21 – временная диаграмма напряжений, поясняющие принцип работы устройства стабилизации напряжения АГ.

Устройство для стабилизации напряжения АГ содержит (рис.3.19) блок трансформаторов $БТ$, содержащий три однофазных повышающих трансформатора, первичные обмотки которых W_{11} , W_{21} и W_{31} подключены к выходу трехфазного генератора АГ. Первая группа вторичных обмоток однофазных трансформаторов W_{12} , W_{22} и W_{32} подключена к блоку конденсаторов возбуждения C_1 , а вторая группа их вторичных обмоток W_{13} , W_{23} и W_{33} подключена параллельно к блоку конденсаторов компенсации

реактивной мощности C_2 и к встречно-параллельно соединенным тиристорам VS_1 и VS_2 . Входы системы управления устройством $СУ$, соединены с выходом АГ и выводами блока конденсаторов возбуждения C_1 , а её выход соединён с управляющими входами тиристоров VS_1 и VS_2 .

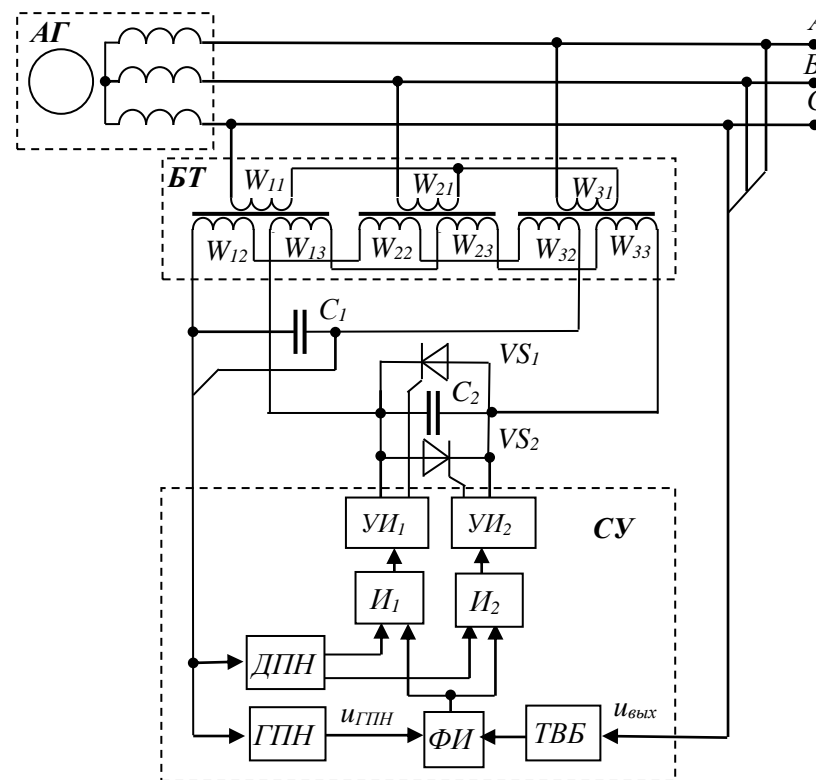


Рисунок 3.19 – Функциональная схема стабилизатора напряжения АГ на повышающих трансформаторах

В состав системы управления входят трансформаторно-выпрямительный блок *ТВБ*, формирователь импульсов *ФИ*, генератор пилообразного напряжения *ГПН*, датчик полярности напряжения *ДПН*, логические элементы И (I_1 и I_2), усилители импульсов $УИ_1$ и $УИ_2$.

Устройство стабилизации напряжения работает следующим образом. При протекании тока по первичным обмоткам однофазных повышающих трансформаторов *БТ*, в первой и во второй группах вторичных обмотках W_{12} , W_{22} , W_{32} и W_{13} , W_{23} , W_{33} соответственно, индуцируется трехфазная система напряжений. Так как две вторичные обмотки в первой группе W_{12} и W_{22} , и во второй W_{13} и W_{23} соединены согласно, а третья обмотка первой группы W_{32} и во второй W_{33} включены встречно двум другим соответственно, напряжения на блоках конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности будут определяться по формулам

$$\bar{U}_{C1} = \bar{U}_{W12} + \bar{U}_{W22} + \bar{U}_{W32}, \quad (3.10)$$

$$\bar{U}_{C2} = \bar{U}_{W13} + \bar{U}_{W23} + \bar{U}_{W33}, \quad (3.11)$$

где \bar{U}_{W12} , \bar{U}_{W22} , \bar{U}_{W32} и \bar{U}_{W13} , \bar{U}_{W23} , \bar{U}_{W33} – векторы напряжений на выводах вторичных обмоток повышающих трансформаторов.

Под действием напряжения U_{C1} (рис.3.20) по блоку конденсаторов возбуждения C_1 будет протекать ток, который, трансформируясь в первичные обмотки повышающих трансформаторов, протекает также по статорным обмоткам *АГ*, обеспечивая возбуждение генератора.

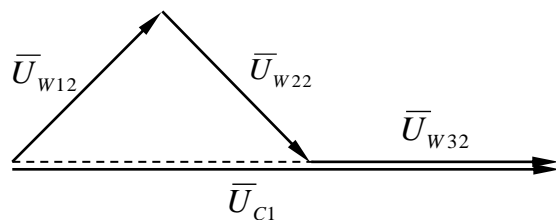


Рисунок 3.20 – Векторная диаграмма напряжений во вторичных обмотках повышающих трансформаторов

При подключении нагрузки к выводам *А*, *В*, *С* генератора *АГ* (рис.3.19) стабилизация напряжения осуществляется за счет изменения величины емкостного тока, протекающего через блок конденсаторов конденсатор C_2 .

Процесс стабилизации напряжения *АГ* происходит следующим образом. С выходов *АГ* напряжение поступает на трансформаторно-выпрямительный блок *ТВБ* системы управления *СУ*, где преобразуется в ведущий сигнал постоянного напряжения $U_{вых}$ (рис.3.21, б), который поступает на один из входов формирователя импульсов *ФИ*. На второй вход формирователя импульсов *ФИ* поступает опорный сигнал $U_{ГПН}$ (рис. 3.21, б) от генератора пилообразного напряжения *ГПН*, работа которого синхронизирована с напряжением вторичных обмоток *БТ*. Когда сигнал $U_{ГПН} < U_{вых}$ формирователь импульсов *ФИ* формирует импульсы управления U_y (рис. 3.21, в), которые поступают на один из входов логических элементов I_1 и I_2 . На вторые входы логических элементов поступает сигнал от датчика полярности напряжения *ДПН*.

При положительной полуволне напряжения на блоке конденсаторов возбуждения C_1 срабатывает логический элемент I_1 и сигнал управления U_{y1} (рис. 3.21, з) через усилитель импульсов $УИ_1$ поступает на управляющий электрод тиристора VS_1 , при отрицательном полуволне напряжения на блоке конденсаторов возбуждения C_1 срабатывают соответственно элементы I_2 и $УИ_2$ и управляющий сигнал U_{y2} (рис. 3.21, д) поступает на управляющий электрод тиристора VS_2 . Если, к примеру, напряжение на выходе *АГ* уменьшится, тогда уменьшится напряжение постоянного тока на выходе *ТВБ* и увеличится угол управления тиристорами VS_1 и VS_2 ($\alpha_2 > \alpha_1$, рис. 3.21, е, ж), что приведет к уменьшению времени открытого состояния тиристоров VS_1 и VS_2 от t_1 до t_2 (рис. 3.21. з, ж) и увеличению емкостного тока в статорной обмотке *АГ* и, как следствие, к повышению напряжения на его выводах.

Предложенное техническое решение стабилизатора напряжения *АГ*, позволяет уменьшить массу блоков конденсаторов

формирователей импульсов $\Phi И1$, $\Phi И2$ блоков формирования управляющих сигналов $БУ1 – БУ3$, на вторые входы которых поступает опорный сигнал синусоидальной формы от задающего генератора $ЗГ$. Частота опорного сигнала определяет частоту выходного напряжения $АГ$. Частота сигнала задающего генератора, при необходимости, может изменяться регулятором частоты $РЧ$.

Работу блоков формирования управляющих сигналов, обеспечивающих стабилизацию выходного напряжения $АГ$, рассмотрим на примере блока $БУ1$, формирующего импульсы для фазы А. При равенстве напряжений косинусных синхронизирующих кривых и задающего генератора в формирователях импульсов $\Phi И1$, $\Phi И2$ формируется сигнал, который с их выходов поступает на первые входы логических элементов $И1$, $И2$ на вторые входы которых поступает сигнал от генератора типа кривой $ГТК$.

В зависимости от величины выходного напряжения на выходе выходного фильтра Φ , генератор типа кривой $ГТК$ подает сигнал на соответствующий логический элемент $И1$ или $И2$. Так, в номинальном режиме работы устройства сигнал о полярности тока нагрузки I_n через датчик тока $ДТ$ (рис.3.23, а,б) поступает на второй вход генератора типа кривой $ГТК$, на первый вход которого поступают импульсы от третьего формирователя импульсов $\Phi И3$. Импульсы на выходе формирователя импульсов $\Phi И3$ формируются тогда, когда выходное напряжение постоянного тока $U_{вых}$, обратнопропорциональное выходному напряжению фазы А асинхронного генератора, поступающие от делителя напряжения $ДН$ будет равно напряжению $U_{ГПН}$ от генератора пилообразного напряжения $ГПН$ (рис. 3.23, в,г). При этом, работа генератора пилообразного напряжения $ГПН$ синхронизирована с полярностью тока нагрузки I_n (рис. 3.23, а,в). Генератор типа кривой $ГТК$ подает сигнал на логический элемент $И1$, в том случае, когда ток нагрузки имеет положительную полярность, а на логический элемент $И2$, когда ток нагруз-

ки отрицательной полярности.

Сигналы от генератора типа кривой $ГТК$ подаются в момент времени формирования импульсов на выходе формирователя импульсов $\Phi И3$. В результате генератор типа кривой $ГТК$ определяет временные участки, на которых должны формироваться кривые напряжений положительного типа $U_{ПТ}$ и отрицательного $U_{ОТ}$ типов (рис.3.23, д,е). С выходов логических элементов $И1$ или $И2$ через соответствующие распределители импульсов $РИ1$ или $РИ2$ и усилители импульсов $УИ1$ или $УИ2$ управляющие сигналы поступают на силовые ключи НПЧР, на выходе которого формируются кривые напряжений положительного или отрицательного типов.

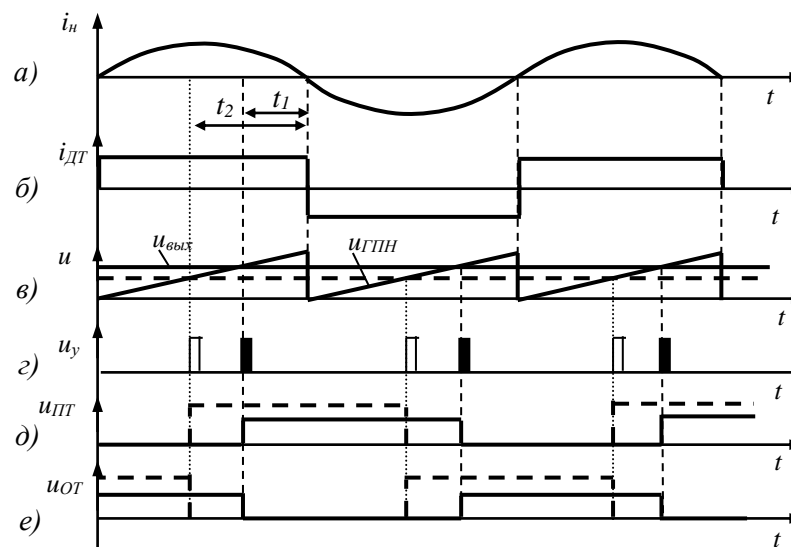


Рисунок 3.33 – Диаграммы поясняющие принцип работы стабилизатора напряжения на НПЧР

Если, к примеру, напряжение на выводах $Вых2$ (рис.3.22) увеличится, уменьшится напряжение на выходе

делителя напряжения $ДН$ (рис.3.23, в, пунктирная прямая). Произойдет смещение участков формирующих кривые напряжений положительного и отрицательного типов (рис. 3.23, д, е, участки показаны пунктирным импульсом). Время формирования кривой напряжения положительного типа при положительной полярности тока нагрузки увеличится от t_1 до t_2 (рис. 3.23, а, д), а значит угол опережения входного тока непосредственного преобразователя частоты относительного фазного напряжения уменьшится, что приведет к уменьшению напряжения на выводах асинхронного генератора и выводах $Вых2$ соответственно.

Использование НПЧР выгодно отличает предлагаемое устройство от известных, так как совместная работа АГ и НПЧ преобразователем частоты с регулируемым углом сдвига фаз позволяет исключить конденсаторы возбуждения генератора используемые для компенсации реактивной мощности нагрузки, а значит уменьшить их массу и габариты, кроме того, улучшаются регулировочные свойства устройства в несимметричных режимах работы и обеспечивается возможность регулирования частоты напряжения генератора.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ

4.1 Основные ограничения для бесконтактных генераторов с приводом от высокоскоростных двигателей

При разработке бесконтактных генераторов электроэнергии для АИЭ, привод которых осуществляется ВПД, вводятся ограничения, связанные с предельными частотами вращения или окружными скоростями ротора (определяемыми его прочностью), с максимальными электромагнитными нагрузками, а также в ряде случаев с электромеханической постоянной, характеризующей быстродействие БЭМ и др. Дополнительные особенности бесконтактных высокоскоростных генераторов (БВГ) для АИЭ проявляются также при выборе геометрического фактора λ , определяемом по формуле

$$\lambda = \frac{l}{D}, \quad (4.1)$$

где l и D – длина воздушного зазора и внутренний диаметр статора генератора.

Перед тем как рассмотреть влияние перечисленных факторов на потери, КПД, массу и мощность БВГ рассмотрим основные расчетные уравнения. Расчетная мощность машины определяется по формуле

$$S = mEI \quad (4.2)$$

Действующее значение ЭДС определяется по формуле

$$E = 4k_B k_{o\phi} W_1 f \Phi, \quad (4.3)$$

где $k_B \approx 1,11$ – коэффициент формы синусоидальной кривой магнитной индукции в зазоре; $k_{o\phi} \approx 0,96$ – обмоточный коэффициент, учитывающий распределение и укорочение обмотки; W_1 – число витков обмотки фазы; $f = pn / 60$ – частота тока; p – число пар полюсов; n – частота вращения ротора;

$\Phi = B_\delta l \tau \alpha_\delta$ – магнитный поток; $\tau = \pi D / (2p)$ – полюсное деление; $\alpha_p \approx 0,64$ – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; m – число фаз.

Величина линейной нагрузки генератора, т.е. величина тока, приходящегося на единицу длины окружности зазора машины

$$A = \frac{NI_1}{(\pi D)} \quad (4.4)$$

где $N = 2 W_l m$ – полное число проводников обмотки статора (так как каждый виток имеет две активные стороны, а в каждой фазе W_l витков); I_1 – ток в обмотке статора.

Тогда с учетом записанных выражений формула (4.2) приводится к основному расчетному уравнению электрической машины

$$S = knAB_\delta \lambda D^3 \quad (4.5)$$

или

$$D = \sqrt[3]{\frac{S}{kAB_\delta \lambda n}}, \quad (4.6)$$

где

$$k = (k_B k_{об} \pi^2 \alpha_p) / 60, \quad (4.7)$$

A – линейная нагрузка; B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Предельно допустимые значения частоты вращения n_{max} определяются показателями подшипников или прочностными характеристиками ротора. В подшипниках n_{max} зависит от механических нагрузок (грузоподъемности подшипников), вида смазки, срока службы.

Окружная скорость ротора v_{max} должна соответствовать прочностным характеристикам ротора БВГ. Если БВГ оптимизируется по удельной массе, что является типичной задачей для транспортных САЭ, и частота тока жестко не фикси-

руется, то ограничения, связанные с прочностью ротора, могут приближенно учитываться соотношением вида

$$n_{max} = \frac{C_\Pi}{D^\nu}, \quad (4.8)$$

где C_Π – постоянная, определяемая прочностными свойствами материала ротора; ν – показатель зависящий от его конструктивного исполнения (наличия консольных выступов, вида бандажей и т.д.).

Чем сложнее конструкция ротора, тем больше значение ν . Если ротор имеет форму сплошного цилиндра, то в этом случае прочность ротора может характеризоваться предельной окружной скоростью v_{max} независимо от диаметра D . Так как

$$v_{max} = \frac{\pi D n_{max}}{60}, \quad (4.9)$$

то для сплошного ротора при заданном значении v_{max} , согласно (4.8), имеем $\nu = 1$. Для роторов более сложной конструкции $\nu > 1$, так как прочность ротора снижается и значения n_{max} должны быть меньше.

В БЭМ привод, которых осуществляется от высокоскоростных ПД роторы, как правило, имеют повышенной прочности бандажи, поэтому можно принять $\nu \approx 1$ и определить n_{max} по заданному значению v_{max} с помощью (3.9). Тогда с учетом $k_B k_{об} \approx 1$ из (4.6) следует

$$D = \sqrt{\frac{S}{\pi \alpha_\delta \lambda A B_\delta g_{max}}}. \quad (4.10)$$

Таким образом, для БВГ, работающих с предельными механическими нагрузками, вид основного расчетного уравнения изменяется.

Ограничение на электромагнитные нагрузки определяет выбор предельных значений A и B_δ , обеспечивающих минимальные размеры генератора.

С ростом линейной нагрузки A снижается ЭДС E , а следовательно, уменьшается выходное напряжение генератора за

счет реакции якоря. Кроме того ограничения на линейную нагрузку A по тепловым режимам обмотки статора должны согласовываться с плотностью тока j , которая при заданных размерах статора линейно связана с A . Часто тепловые нагрузки электрических машин характеризуют произведением Aj . Для машин средней мощности с самовентиляцией $j \approx 4 - 10 \text{ А/мм}^2$, $A \approx (1,5 - 3) 10^4 \text{ А/м}$, для машин с принудительным воздушным охлаждением $j \approx 10 - 16 \text{ А/мм}^2$, $A \approx (2 - 5) 10^4 \text{ А/м}$, для машин с жидкостным охлаждением $j \approx 20 - 30 \text{ А/мм}^2$, $A \approx (6 - 10) 10^4 \text{ А/м}$.

Магнитная индукция в зазоре имеет характерные значения $B_\delta \approx 0,5 - 1 \text{ Тл}$ и не может быть существенно увеличена из-за чрезмерного насыщения стали в зубцовой зоне статора.

Произведение kAB_δ называют иногда коэффициентом использования машины, а обратное его значение $(kAB_\delta)^{-1} = C_A$ – машинной постоянной Арнольда.

Одно и тоже значение коэффициента использования можно получить при умеренных значениях A и повышенных B_δ или, наоборот, при повышенных A и относительно низких B_δ . В первом случае электрическая машина имеет увеличенный магнитопровод, а во втором относительно большой объем обмоток. Обычно БЭМ относятся ко второму типу машин, имеющих пониженный объем магнитопровода и соответственно меньшие значения удельной массы.

Ограничения на геометрический фактор, входящий в основное расчетное уравнение, связаны в первую очередь с характером замыкания магнитного потока. СГПМ и АГ имеют радиальный поток. Для машин с радиальным потоком ограничения на величину λ определяются главным образом прочностными требованиями, и λ может меняться в относительно широких пределах. Однако существует рациональное значение λ , зависящее от числа пар полюсов. Например, для синхронных машин $\lambda \approx 0,8 p^{-0,5}$, для асинхронных $\lambda \approx 1,6 p^{-2/3}$.

При проектировании БЭМ необходимо также учитывать, что при малых значениях λ ($\lambda \leq 0,3$) снижается относительно полезный объем машины по сравнению с объемом конструктивных элементов, лобовых частей обмоток и т.п., а при больших значениях λ ($\lambda > 3 - 4$) их сложно реализовать из-за увеличенных прогибов вала и возможного совпадения частоты вращения n с критическими значениями $n_{кр}$, соответствующими резонансным явлениям. В правильно спроектированной машине n и $n_{кр}$ должны существенно различаться (более чем на 30%). Критические значения частоты вращения грубо оцениваются следующим образом: $n_{кр} \approx 30 / \sqrt{y}$, где y – статический прогиб вала под действием силы тяжести ротора, определяемый по известным формулам механики. Значение y составляет порядка 10% величины рабочего воздушного зазора δ . Если, к примеру, $y = 0,01 \text{ мм} = 10^{-5} \text{ м}$, то $n_{кр} \approx 9500 \text{ об/мин}$, что может быть близким к рабочим значениям частоты вращения для АИЭ. Очевидно, что при заданном диаметре D значение y тем больше, чем больше λ .

Для уменьшения резонансных эффектов и снижения значений $n_{кр}$ в высокоскоростных машинах часто применяют упругие опоры, в которых подшипник сопрягается со статорной расточкой с помощью специальных упругих элементов (эластичных прокладок, стальных упругих колец и т.п.).

4.2 Потери и КПД бесконтактных высокоскоростных генераторов

Потери электрической энергии в БВГ разделяются на основные и добавочные. Добавочные потери это все виды трудноучитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, колебаниями индукции вследствие зубчатого строения статора и другими причинами. Как правило, для генераторов мощностью до 1000 кВт приближенно

добавочные потери $\Delta P_{доб}$ принимают равными 0,5% мощности машины.

Основные потери БВГ состоят из электрических потерь в обмотке статора, магнитных потерь статора (потерь в электротехнической стали), механических потерь и поверхностных потерь.

Для того, чтобы определить основные потери и КПД БВГ предлагается методика упрощенного расчета, которая с высокой точностью позволяет провести оценку эффективности проектируемого генератора. Исходными данными для расчетов являются: мощность генератора – S ; номинальное напряжение – U_n ; частота вращения ротора – n ; число пар полюсов – p ; число зубцов статора – Z ; геометрический фактор – λ ; внутренний диаметр статора генератора – D , определяется по (4.10); плотность тока в обмотке статора – j_1 ; значения параметров электромагнитной нагрузки A и B_δ , коэффициент мощности нагрузки – $\cos \varphi_n$.

Электрические потери в обмотке статора

$$\Delta P_{эл} = m I_1^2 r_1, \quad (4.11)$$

где r_1 – активное сопротивление обмотки статора.

Рабочий ток фазы в обмотке статора

$$I_1 = S / m U_n. \quad (4.12)$$

Для определения активного сопротивления r_1 необходимо определить число витков в обмотке статора W_1 , сечение провода обмотки Π_1 и среднее значение длины витка L_{cp} .

Число витков обмотки

$$W_1 = \frac{U_n}{\sqrt{2} \pi u k_{об} f B_\delta \alpha_p \tau}, \quad (4.13)$$

где $u \approx 0,7 \dots 0,9$ – коэффициент, учитывающий относительное снижение напряжения на нагрузке; $B_\delta \approx 0,8$ Тл – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Подставив в (4.13) значения коэффициентов и с учетом, что $f = pn / 60$, $\tau = \pi D / (2p)$ получим

$$W_1 = \frac{17,5 U_n}{n B_\delta D l}, \quad (4.14)$$

Сечение провода обмотки статора

$$\Pi_1 = I_1 / a_1 j_1, \quad (4.15)$$

где a_1 – число параллельных ветвей обмотки фазы.

Среднее значение длины витка обмотки

$$L_{cp} \approx 2,5(1,9D + l). \quad (4.16)$$

Тогда с учетом (4.14) – (4.15) активное сопротивление обмотки можно определить по формуле

$$r_1 = \frac{\rho_m W_1 L_{cp}}{\Pi_1 \cdot 10^{-6}}, \quad (4.17)$$

где $\rho_m = 24,4 \cdot 10^{-9}$ Ом·м – удельное сопротивление меди.

Магнитные потери в статоре

$$\Delta P_{cm} \approx 2 \rho_c B_c^2 (f / 400)^{1,5} M_c, \quad (4.18)$$

где ρ_c – удельные потери в электротехнической стали, к примеру, для марки стали 79НМ они составляют 2,5 – 5,5 Вт/кг; $B_c \approx (1,2 - 1,6)$ Тл – магнитная индукция стали; M_c – масса стали статора.

Приближенно масса стали может быть определена по формуле

$$M_c \approx \frac{\pi}{4} m_c k_n l (D_n^2 - D^2), \quad (4.19)$$

где $m_c = 7800$ кг/м³ – удельная масса стали; $k_n \approx 0,8 - 0,9$ – коэффициент, учитывающий объем паза статора; $D_n = k_D D$ – наружный диаметр статора генератора; $k_D = 1,3 - 1,9$ – коэффициент, зависящий в основном от числа полюсов генератора.

Механические потери $\Delta P_{мех}$ определяются потерями на трение в подшипниках и потерями на вентиляцию, при

использовании вентилятора и для $n < 6000$ об/мин определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{мех}} \approx 3,68 \cdot 10^3 p \left(\frac{\vartheta_{\text{max}}}{40} \right)^3 \sqrt{I}. \quad (4.20)$$

Для $n > 6000$ об/мин основной вклад в механические потери вносит вентилятор, которые могут оцениваться по формуле

$$\Delta P_{\text{мех}} \approx 8 \cdot 10^{-3} n^2 D^3. \quad (4.21)$$

Поверхностные потери ΔP_n в наружном цилиндре ротора возникают из-за колебания индукции вследствие зубчатого строения статора

$$\Delta P_n \approx 23\pi D l \alpha_p n^{1,5} (D\pi B_o)^2 / \sqrt{Z}, \quad (4.22)$$

где $B_o \approx (0,2 - 0,3)$ Тл.

Подставив в (4.22) известные значения коэффициентов получим

$$\Delta P_n \approx 18,26 D^3 l \cdot n^{1,5} / \sqrt{Z}. \quad (4.23)$$

Как видно из формул (4.13) – (4.23) потери в БВГ в основном определяют размеры активной части генератора D и l , которые в основном зависят от значений S и n .

Коэффициент полезного действия генератора

$$\eta = \frac{S \cos \varphi_n}{S \cos \varphi_n + \sum \Delta P}, \quad (4.24)$$

где $\sum \Delta P = \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_n$ – сумма всех потерь генератора.

На рис.4.1 показаны графики зависимостей основных потерь БВГ от частоты вращения n для генераторов мощностью 10, 50, 200 кВА с параметрами: линейное напряжение $U_n = 380$ В; $\lambda = 1,5$; $A = 35000$ А/м; $B_\delta = 0,7$ Тл; $p = 1$; $Z = 30$; $j_l = 12$ А/мм². Индексы в обозначениях потерь соответствуют типу потерь и мощности генераторов. На рис.4.1 не показаны зависимости для потерь в стали поскольку они не

превышают 1% от мощности БВГ. Из рис.4.1 видно, что в зависимости от мощности генератора, потери зависят от частоты вращения n и с ее увеличением они перераспределяются между собой.

ΔP , в % от S БВГ

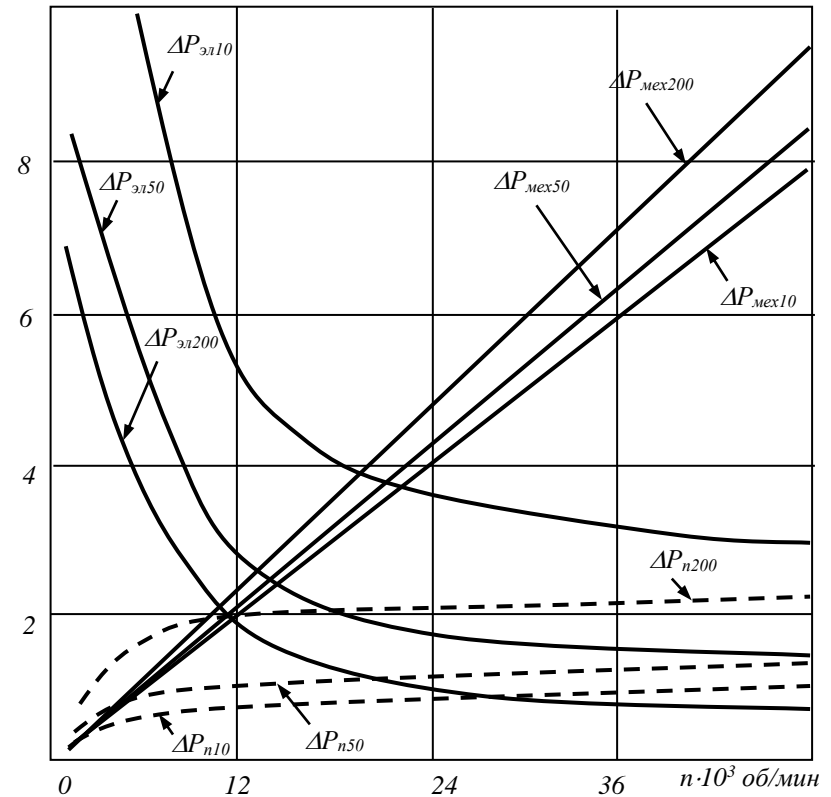


Рисунок 4.1 – Графические зависимости основных потерь ΔP БВГ от частоты вращения ротора n

Так, к примеру, для БВГ мощностью 10 кВА при значениях $n < 20000$ об/мин основную долю потерь составляют электрические потери $\Delta P_{\text{эл}10}$, а при $n > 20000$ об/мин – механические $\Delta P_{\text{мех}10}$ и поверхностные ΔP_{n10} потери. Для БВГ

мощностью 50 и 200 кВА значения частоты вращения при которой происходит перераспределение потерь составляют 14000 и 10000 об/мин соответственно.

Таким образом, при частотах вращения $n > 10000$ об/мин механические $\Delta P_{\text{мех}}$ и поверхностные ΔP_n потери БВГ средней мощности, являются основными потерями генераторов, от которых зависит максимальная (предельная) мощность БВГ, с учетом обеспечения высокого КПД и минимальной массы.

Кроме того, как видно из рис.4.2 при значениях $n > 24000$ об/мин КПД η БВГ уменьшается и тем значительнее, тем больше мощность генераторов. Индексы КПД η на рис.4.2 соответствуют мощности БВГ. С учетом, что графики $\eta = f(n)$ на рис.4.2 построены при числе пар полюсов $p = 1$, то при $p > 1$ суммарные потери в БВГ еще больше увеличатся, и очевидно, что КПД БВГ будет уменьшаться при меньших значениях n .

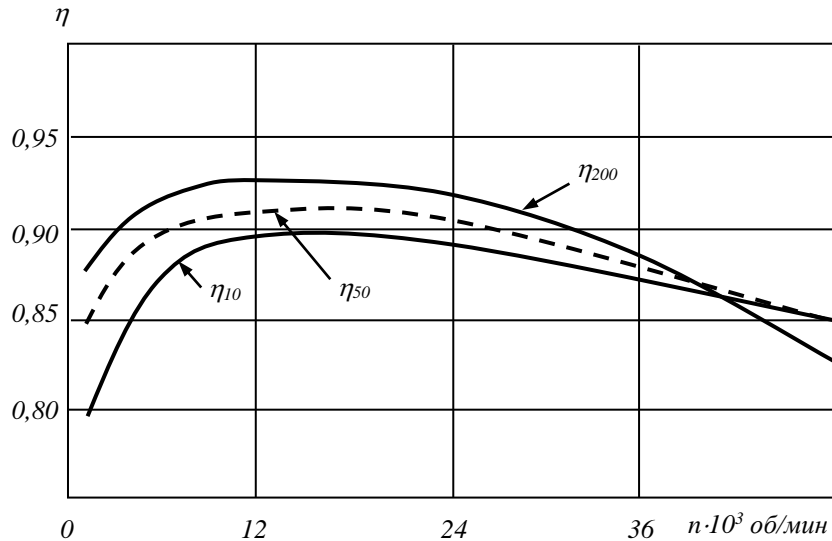


Рисунок 4.2 – Графические зависимости КПД η БВГ от частоты вращения ротора n

4.3 Удельная масса и предельная мощность бесконтактных высокоскоростных генераторов

Полную массу генератора M можно выразить через массу активных материалов M_A как $M = k_k M_A$, где $k_k = 1,4 - 1,7$ – конструктивный коэффициент, учитывающий массу конструктивных элементов (подшипниковых щитов, корпуса и т.п.). В свою очередь масса активных материалов

$$M_A = (\gamma k_\gamma \pi D_n^2 l) / 4, \quad (4.25)$$

где $\gamma \approx 8000 \text{ кг/м}^3$ – средняя плотность активных материалов на статоре и роторе; $k_\gamma \approx 0,8$ – коэффициент плотности, характеризующий заполнение машины активными материалами на длине.

При записи (4.25) предполагалось, что объем активных материалов, расположенных за пределами длины l (например, лобовых частей обмоток), частично компенсирует различные полости в статоре и роторе на длине l .

Таким образом,

$$M = 1,4(\pi / 4) k_D^2 k_\gamma \gamma \lambda D^3. \quad (4.26)$$

С учетом (3.25) и (3.26) удельную массу генератора можно определить по формуле

$$m_p = (1,4 \pi k_D^2 k_\gamma \gamma) / (4 k A B_\delta n), \quad (4.27)$$

откуда следует, что для снижения удельной массы БВГ необходимо, во-первых, минимизировать произведение $k_D^2 k_\gamma \gamma$, что связано с реализацией оптимальных конструктивных исполнений машины, а во-вторых, иметь максимально допустимые электромагнитные нагрузки A и B_δ и частоты вращения n .

Если бесконтактные генераторы предназначены для работы с предельными механическими нагрузками, то в соответствии с (4.10) и (4.26) получаем значения минимальной его удельной массы при максимальных оборотах

$$m_{p_{\min}} = [1,4 k_D^2 k_\gamma \gamma (S / \pi \lambda)^{1/2}] / [4 (\alpha_p A B_\delta v_{\max})^{3/2}], \quad (4.28)$$

$$n_{\max} = 60(\nu_{\max})^{3/2} [\alpha_p \lambda AB_\delta / (\pi S)]^{1/2}. \quad (4.29)$$

В этом случае с ростом расчетной мощности S максимальная частота вращения n_{\max} уменьшается, а значение удельной массы $m_{P\min}$ может увеличиваться. Естественно, эти закономерности проявляются при достаточно слабой зависимости AB_δ от S , что обычно имеет место для генераторов средней и большой мощности.

Записанные выше формулы не только показывают характерные зависимости между основными параметрами БВГ, но могут использоваться и для предварительной оценки возможностей применения различных типов БЭМ в определенных условиях эксплуатации.

По заданной скорости ν_{\max} , непосредственно связанной с допустимыми механическими напряжениями в роторе, можно оценить предельные мощности электромеханических генераторов электроэнергии. Выражая D из (4.9) и подставляя результат в (4.5), получаем

$$S_{np} = (k_B k_{ob} \alpha_p 60^2 / \pi) \lambda AB_\delta (\nu_{\max}^3 / n^2). \quad (4.30)$$

На этапе проектирования, с учетом известных формул, можно построить графики зависимости предельной мощности S_{np} от n_{\max} и определить МГП БВГ. Так для предельной мощности генератора $S_{np} = 150$ кВА при $\nu = 100$ м/с, $n_{\max} \approx 14000$ об/мин, $D \approx 0,12$ м, $m_{\min} \approx 130$ кг.

Удельная масса БВГ, работающих с предельными окружными скоростями, может возрастать с увеличением их размеров и возникает ситуация, когда вместо одной машины с повышенной мощностью целесообразно иметь две машины с той же суммарной мощностью. Это связано с тем, что при фиксированной скорости ν_{\max} по мере увеличения диаметра активной части машины D приходится снижать n и возрастание мощности S согласно (4.5) происходит медленнее, чем рост массы.

С другой стороны как видно из (4.30) чем больше частота вращения n , тем меньше предельная мощность генератора.

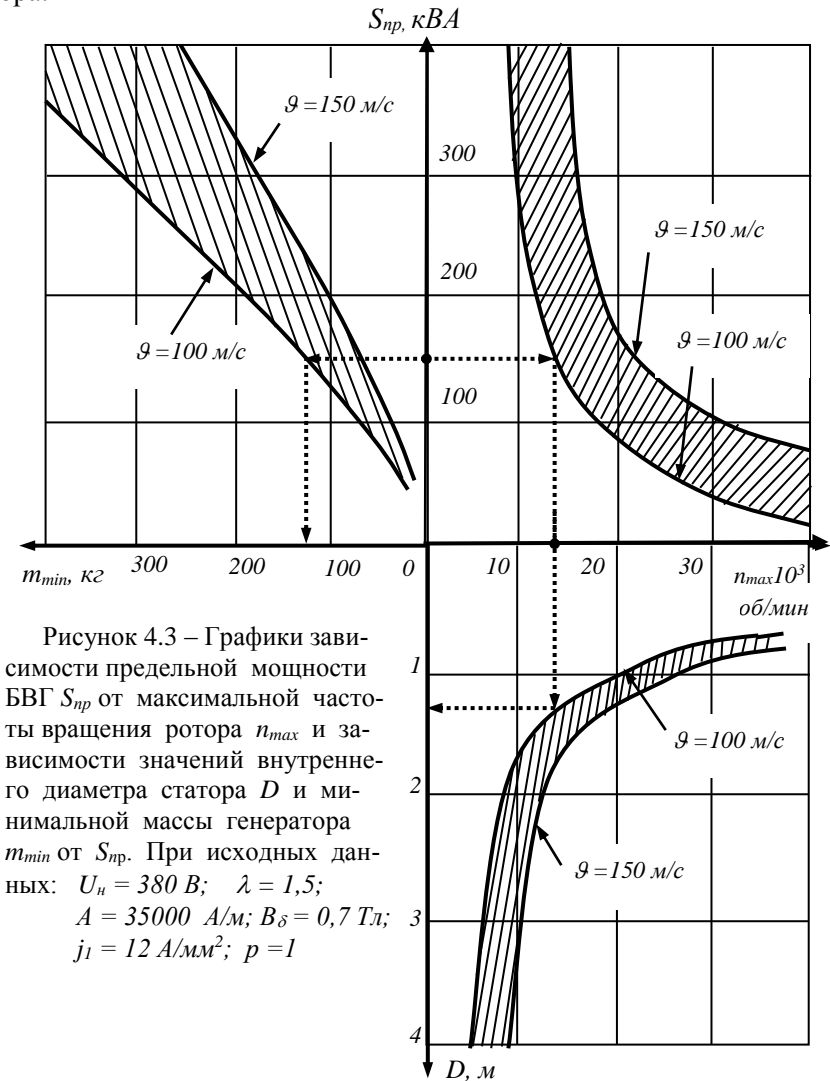


Рисунок 4.3 – Графики зависимости предельной мощности БВГ S_{np} от максимальной частоты вращения ротора n_{\max} и зависимости значений внутреннего диаметра статора D и минимальной массы генератора m_{\min} от S_{np} . При исходных данных: $U_n = 380$ В; $\lambda = 1,5$; $A = 35000$ А/м; $B_\delta = 0,7$ Тл; $j_1 = 12$ А/мм²; $p = 1$

Это очевидно с физической точки зрения, так как увеличение частоты вращения при заданной линейной скорости должно сопровождаться уменьшением размеров электрической машины (см. рис.4.3).

Целесообразно проектирование АИЭ осуществлять в составе САЭ, поскольку иногда выгоднее занизить основные критерии эффективности БВГ, для того чтобы улучшить, к примеру, МПП ПЭ и САЭ в целом, за счет повышенной частоты генерируемого напряжения АИЭ, которая получается путем увеличения числа пар полюсов генератора.

Таким образом, для повышения эффективности проектирования БВГ на начальных этапах проектирования необходимо проводить предварительную оценку основных критериев эффективности БЭМ. Рассмотренная выше методика упрощенного расчета и графики показывают характерные особенности зависимостей между основными параметрами БВГ и могут использоваться для предварительной оценки возможностей применения различных типов БВГ на начальных этапах проектирования для заданных условий эксплуатации, т.е. в составе конкретных структурных решений САЭ.

4.4 Методика расчета массогабаритных показателей и КПД асинхронных генераторов

Исходными данными для расчета асинхронных генераторов (АГ) с короткозамкнутым ротором и с конденсаторным возбуждением являются: мощность генератора – S ; номинальное линейное напряжение – $U_{л} = \sqrt{3}U_1$, где U_1 – фазное напряжение; частота генерируемого напряжения – f ; частота вращения ротора – n ; коэффициент мощности генератора – $\cos\varphi_i$; число фаз генерируемого напряжения – m ; коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_H$.

а). Расчет главных размеров.

Как правило, расчет главных размеров АГ осуществляется методом задания электромагнитных нагрузок: линейной нагрузки A ; магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ . Для АГ мощностью до 200 кВА при плотности тока в фазовой обмотке $j_1 \approx 8-12 \text{ А/мм}^2$, линейная нагрузка находится в пределах $A \approx (2-3) 10^4 \text{ А/м}$, а магнитная индукция в зазоре имеет характерные значения $B_\delta \approx 0,5-1 \text{ Тл}$, и не может быть существенно увеличена, из-за чрезмерного насыщения стали в зубцовой зоне статора.

Ток в статорной обмотке

$$I_1 = \frac{S \cos\varphi_H}{m_1 U_1 \cos\varphi_1}. \quad (4.31)$$

Активная (электромагнитная) мощность АГ

$$P_1 = m_1 U_1 I_1. \quad (4.32)$$

Для предварительного расчета длины статора задаются значением внутреннего диаметра статора D_1

$$l_1 = \frac{9,1S}{nAB_\delta D_1^2}. \quad (4.33)$$

Если геометрический фактор находится в пределах

$$\lambda = l_1 / D_1 = 0,5 \div 0,6, \quad (4.34)$$

то расчет продолжается в противоположном случае необходимо изменить значение внутреннего диаметра D_1 и повторить расчет длины статора по (4.33).

Наружный диаметр статора D_H зависит от числа полюсов генератора p . С увеличением числа полюсов наружный диаметр статора увеличивается. Для $p = 2$ или $p = 3$ наружный диаметр статора для высокоскоростных АГ можно определить по формуле

$$D_H = (1,45 \div 1,55) D_1. \quad (4.35)$$

б). Расчет обмоток.

Частота генерируемого тока

$$f = pn / 60. \quad (4.36)$$

Число витков обмотки фазы

$$W_1 = \frac{pU_1}{\pi f B_s D_1 l_1}. \quad (4.37)$$

Принимается значение числа пазов в статоре $Z_1 = 18-36$, с учетом числа фаз выходного напряжения m_1 , после этого число витков в пазу определяется по формуле

$$u_{\text{п1}} = \frac{2a_1 m_1 W_1}{Z_1}, \quad (4.38)$$

где a_1 – число параллельных ветвей.

Сечения проводов обмотки статора с учетом, что плотность тока $j_1 = (8-12) \text{ A/mm}^2$

$$q_1 = I_1 \cdot 10^{-6} / j. \quad (4.39)$$

Среднее значение длины витка

$$l_{\text{cp1}} = 2(l_1 + 0,6\pi D_1). \quad (4.40)$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$r_1 = \frac{\rho_m W_1 l_{\text{cp1}}}{q_1}, \quad (4.41)$$

где $\rho_m = 24,4 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди при температуре обмоток $t = 75^\circ \text{C}$.

Объем проводов обмотки статора

$$V_1 = l_{\text{cp1}} q_1 W_1 m_1. \quad (4.42)$$

Масса медных проводов обмотки статора

$$G_1 = \gamma_M V_1. \quad (4.43)$$

Принимается значение числа пазов короткозамкнутого ротора $Z_2 = 24-48$. Ток в стержне ротора

$$I_2 = I_1 W_1 \cos \varphi_1 / Z_2. \quad (4.44)$$

Плотность тока в алюминиевом стержне ротора $j_2 \approx 0,5 j_1$. Сечение стержня ротора

$$q_2 = I_2 \cdot 10^{-6} / j. \quad (4.45)$$

Активное сопротивление алюминиевого стержня ротора

$$r_2 = \frac{\rho_A l_{\text{cp1}}}{q_2}, \quad (4.46)$$

где $\rho_A = 49 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление алюминия.

Объем алюминия в роторе

$$V_{p2} = l_{\text{cp1}} q_2 Z_2. \quad (4.47)$$

Масса алюминиевого провода ротора с учетом короткозамкнутых колец

$$G_2 = 1,5 \gamma_A V_{p2}, \quad (4.48)$$

где $\gamma_A = 2600 \text{ кг/м}^3$ – удельный объем алюминия.

в). Расчет массы генератора.

Объем магнитопровода

$$V_M = \pi l_1 (D_H / 2)^2. \quad (4.49)$$

Объем электротехнической стали

$$V_C = V_M - V_1 - V_{p2}. \quad (4.50)$$

Масса электротехнической стали

$$G_C = \gamma_C V_C. \quad (4.51)$$

Масса активной части генератора

$$G_A = G_1 + G_2 + G_C. \quad (4.52)$$

Емкость конденсаторов возбуждения при их подключении к выводам АГ по схеме «треугольник»

$$C_B = \frac{P_1 (\text{tg } \varphi_1 + \text{tg } \varphi_H)}{2\pi 10^6 m_1 f U_{\text{Л}}^2}, \text{ мкФ}. \quad (4.53)$$

Масса конденсаторов возбуждения АГ при их подключении к выводам генератора по схеме «треугольник»

$$G_K = C_B m_{K1} / C_{K1}, \quad (4.54)$$

где m_{KI} и C_{KI} – масса и емкость выбранного одного конденсатора.

Общая масса АГ

$$G_{AG} = K_K G_A + G_K, \quad (4.55)$$

где $K_K = 1,7 \div 1,8$ – конструктивных коэффициент.

г). Расчет КПД АГ.

Потери электрической энергии в электромашинных генераторах, как известно, разделяются на основные и добавочные. Добавочные потери это все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, колебаниями индукции вследствие зубчатого строения статора и другими причинами. Как правило, для генераторов мощностью до 1000 кВт приближенно добавочные потери $\Delta P_{доб}$, с учетом потерь в системе стабилизации напряжения, принимают равными 0,5% мощности машины.

Основные потери генераторов состоят из электрических потерь в обмотках генератора, магнитных потерь статора (потери электротехнической стали), механических потерь и поверхностных потерь ротора.

Потери в обмотке статора

$$\Delta P_1 = m_1 I_1^2 r_1. \quad (4.56)$$

Потери в обмотке короткозамкнутого ротора

$$\Delta P_2 = Z_2 I_2^2 r_2. \quad (4.57)$$

Магнитные потери в статоре

$$\Delta P_C \approx 2 \rho_C B_C^2 (f / 400)^{1.5} G_C, \quad (4.58)$$

где ρ_C – удельные потери в электротехнической стали, к примеру, для марки стали 79НМ, они составляют 2,5- 5,5 Вт/кг; $B_C = (1,2-1,6)$ Тл – магнитная индукция стали.

Механические потери определяются потерями на трение в подшипниках и потерями на вентиляцию, при использовании вентилятора и для $n < 3000$ об/мин определяются по формуле

$$\Delta P_{мех} \approx 3,68 \cdot 10^3 p \left(\frac{g_{max}}{40} \right)^3 \sqrt{l_1}, \quad (4.59)$$

где $g_{max} = \pi D_1 n_{max} / 60$ – окружная скорость ротора, м/с.

Для $n \geq 3000$ об/мин основной вклад в механические потери вносит вентилятор, которые могут оцениваться по формуле

$$\Delta P_{мех} \approx 2,25 \cdot 10^{-3} n^3 D_B^4 b_B, \quad (4.60)$$

где $D_B \approx 1,2 D_H$ – диаметр вентилятора; $b_B \approx D_H / 8$ – ширина лопатки вентилятора.

Поверхностные потери в наружном цилиндре ротора возникают из-за колебания индукции вследствие зубчатого строения статора

$$\Delta P_n \approx 18,26 D_1^3 l_1 \cdot n^{1.5} / \sqrt{Z_1}. \quad (4.61)$$

Суммарные потери генератора

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_C + \Delta P_{мех} + \Delta P_n + \Delta P_{доб}. \quad (4.62)$$

Коэффициент полезного действия генератора

$$\eta_{AG} = \frac{P_1}{P_1 + \Delta P}. \quad (4.63)$$

На рис.4.4 показаны зависимости удельной массы и КПД двух асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением от мощности. Генераторы генерируют напряжение частотой 400 Гц. При этом частота вращения ротора генератора АГ1 $n_1 = 6000$ об/мин, число пар полюсов электрической машины $p_1 = 4$, а частота вращения ротора генератора АГ2 $n_2 = 24000$ об/мин, $p_2 = 1$. Сравнивая характеристики двух генераторов можно сделать вывод о том, что при необходимости повышения частоты генерируемого напряжения целесообразно это осуществлять не за счет изменения числа пар полюсов электрической машины, а за счет повышения частоты вращения приводного двигателя.

4.5 Методика расчёта массогабаритных показателей и КПД синхронных генераторов с постоянными магнитами

Генератор рассчитывается под первичный привод с фиксированной частотой вращения n и должен вырабатывать ток заданной частоты f .

Рассмотрим торцевой генератор с постоянными магнитами (ПМ), применяемый в АИЭ мощностью от десятков до сотен киловатт.

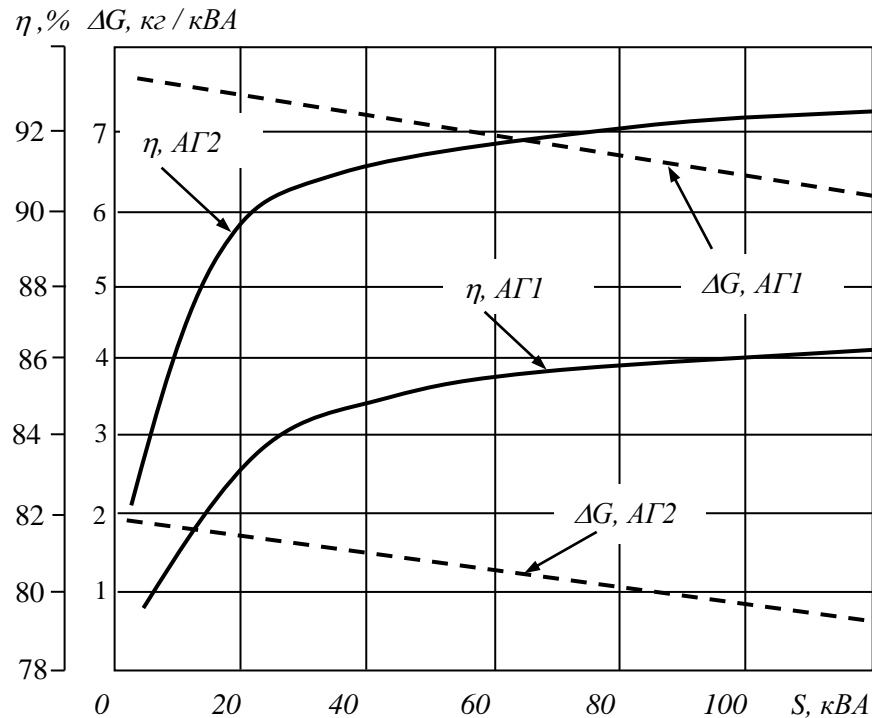


Рисунок 4.4 – Зависимости удельной массы и КПД асинхронных генераторов с емкостным возбуждением от мощности $\Delta G = f(S)$ и $\eta = f(S)$: $f = 400$ Гц; АГ1 – $n_1 = 6000$ об/мин, $p_1 = 4$; АГ2 – $n_2 = 24000$ об/мин, $p_2 = 1$

Особенностью расчета является то, что вначале относительные размеры магнитов для фиксированного значения p , считая, что диаметр d внутренней втулки, к которой примыкают магниты, превышает на $\Delta d'$, на котором пересекаются продолжения сторон соседних магнитов. Относительный показатель $\Delta^* = \Delta/D$ учитывает технологические факторы (обычно $\Delta^* \approx 0,1-0,2$). Так как немагнитная вставка наружного цилиндра, примыкающая к магниту, имеет примерно тот же торцевой размер, что и магнит, то $\pi D - \pi d' \approx 2p\alpha_p\tau$, где $\tau = \pi D/(2p)$, откуда $d' \approx (1 - \alpha_p)D$, $\alpha_p = b_p/\tau$ – конструктивный коэффициент полюсного перекрытия (обычно $\alpha_p \approx 0,6-0,7$).

С учетом соотношения $d = d' + \Delta = D(1 - \alpha_p + \Delta^*)$ радиальная высота магнита $b_m = 0,5(D - d) = 0,5(\alpha_p - \Delta^*)D$.

Относительные размеры магнита – высота и торцевая длина соответственно

$$b_m^* = \frac{b_m}{(0,5D)} = (\alpha_p - \Delta^*), \quad (4.64)$$

$$L^* = \frac{2l_m}{b_m} = \frac{(1 - \alpha_p)\tau}{b_m} = \frac{\pi(1 - \alpha_p)}{p(\alpha_p - \Delta^*)}. \quad (4.65)$$

Базовые величины для b_m и L^* выбраны так, чтобы давать наглядное представление о форме и расположении ПМ. При определении b_m^* значение Δ^* может косвенно учитывать толщину наружного цилиндра или бандажа.

Коэффициент заполнения ротора магнитами

$$k_{3M} = \frac{2p(2l_m)b_m}{(\pi D^4/4)} = 2(1 - \alpha_p)(\alpha_p - \Delta^*). \quad (4.66)$$

Теперь можно перейти к нахождению Λ_δ^* , Λ_σ^* , $\Lambda_{\sigma\alpha}^*$. Относительная проводимость зазора (на один полюс магнита) с учетом масштабов. $\Lambda_\delta^* = (0,5\mu_0\alpha_\delta\tau l/\delta'')H_c l_m/(B_r b_m l)$, где множитель 0,5 учитывает, что на один полюс магнита приходится половина τ .

После подстановок получим

$$\Lambda_{\delta}^* = \frac{\alpha_{\delta} \pi L^*}{8 p \mu_r^* \delta^{*/l}} = \frac{\alpha_{\delta} \pi^2 (1 - \alpha_p)}{8 (\alpha_p - \Delta^*) \mu_p^* \delta^{*/l} p^2}, \quad (4.67)$$

где α_{δ} – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; $\mu_r^* = B_r / (\mu_0 H_c)$ – относительная магнитная проницаемость; $\delta^{*/l} = \delta''/D$ – относительный рабочий зазор; $\delta'' = k_{\delta} k_{\mu} \delta$; δ – конструктивный зазор. Обычно $\delta^{*/l} \approx (6,5-10)10^{-3}$ при $D \approx 0,03-0,1$ м; $\alpha_{\delta} \approx (1,1-1,2)\alpha_p$; $k_{\delta} k_{\mu} \approx 1,1-1,4$, причем значения k_{δ} и k_{μ} впоследствии уточняются.

При выборе k_{σ} можно руководствоваться рекомендациями, приводимыми в литературе по машинам с ПМ. Значения k_{σ} после расчета основных размеров могут уточняться, например, методом вероятных путей потока или моделированием поля рассеяния магнита. Значения k_{σ} для машин с торцевыми и радиальными ПМ во многих случаях различаются незначительно, а значения k_{σ} для радиальных магнитов близки к k_{σ} полюсов соответствующей формы с обмотками возбуждения.

Относительная проводимость рассеяния якорной обмотки

$$\Lambda_{\sigma\sigma}^* = X_{\sigma\sigma}^* = X_{\sigma\sigma} \left(\frac{m_1}{m_E} \right). \quad (4.68)$$

Причем

$$m_1 = \frac{\pi p H_c l_M}{(m \sqrt{2} k_d k_0 w)} \quad (4.69)$$

$$m_E = 2\pi \sqrt{2} k_0 w f B_r l b_M. \quad (4.70)$$

Множитель «2» в (4.69) в отличие от формулы для m_E , появляется в связи с тем, что при торцевом намагничивании в каждом полюсном секторе суммируются потоки двух соседних магнитов, т.е. магниты соединены не последовательно, а параллельно. Объем магнитов при торцевом намагничивании Q_M равен $2pS_M(2l_M)$, а не $2pS_M l_M$, как при радиальном намагничивании. Таким образом, при переходе от радиального к торцевому намагничиванию ПМ значения m_E и Q_M формально удваиваются, а основные расчетные формулы не изменяются.

Индуктивное сопротивление рассеяния якоря, как известно, определяется по формуле

$$X_{\sigma\sigma} = \frac{4\pi\mu_0 f w^2 l \sum \lambda}{(pq)}, \quad (4.71)$$

где q – число пазов на полюс и фазу; $\sum \lambda$ – удельная магнитная проводимость рассеяния.

С учетом (4.68) – (4.70) получим

$$\Lambda_{\sigma\sigma}^* = \frac{\pi^2 (1 - \alpha_{\sigma}) \sum \lambda}{2p (\alpha_p - \Delta^*) \mu_k^* m q k_d k_0^2}, \quad (4.72)$$

При расчете $\Lambda_{\sigma\sigma}^*$ по (4.72) необходимо кроме зафиксированных ранее α_{δ} , p , μ_r^* , m предварительно задаться $\sum \lambda$ (обычно от 2 до 4) и параметрами q , k_d , k_0 в соответствии с рекомендациями традиционных методик. Значение $\sum \lambda$ уточняется после определения размеров паза. По значениям Λ_{δ}^* , Λ_{σ}^* , $\Lambda_{\sigma\sigma}^*$ находятся E_0^* и I_k^* .

Линейная нагрузка генератора при торцевых ПМ

$$A = \frac{\pi (1 - \alpha_p) H_c I^*}{(4k_d k_0)}. \quad (4.73)$$

Как видно из (4.73), что в машинах с радиальными и торцевыми магнитами параметр A может по-разному зависеть от числа пар полюсов p . В первом случае при увеличении p отношение l_M/D может изменяться слабо и A линейно зависит от p при прочих равных условиях, как в обычных синхронных машинах. Во втором случае увеличение p должно, как правило, сопровождаться пропорциональным увеличением l_M из конструктивных соображений, поэтому A в явном виде не зависит от p . Таким образом, при радиальных магнитах зависимость между A и p проявляется сильнее, чем при торцевых магнитах.

Если задаться значением A , учитывая условия охлаждения генератора и режим его работы, то можно найти относительный рабочий ток в масштабе bh -диаграммы

$$I^* = \frac{4k_d k_0 A}{\pi \sqrt{2} (1 - \alpha_p) H_c}, \quad (4.74)$$

Нагрузочный режим характеризуется отношением рабочего тока к току КЗ

$$i = \frac{I^*}{I_{*K}} = \sqrt{1 - (u \cos \phi)^2} - u \sin \phi, \quad (4.75)$$

откуда следует

$$u = \frac{U}{F_0} = \frac{U^*}{F_{*0}} = \sqrt{1 - (i \cos \phi)^2} - i \sin \phi. \quad (4.76)$$

Таким образом, для заданного ϕ и найденного по (4.75) значения i определяем относительное напряжение генератора, характеризующее наряду с параметром i рабочий режим генератора и относительное снижение напряжения при нагрузке. Обычно $u \approx 0,7-0,9$. Если значения u получаются нерациональными, следует изменить A и I^* . Заметим, что $1/i$ определяет кратность тока КЗ, которая может регламентироваться и при необходимости корректироваться изменением A .

В отдельных случаях в расчетах используется $u = u_{opt}$, после чего находятся i , I^* и линейная нагрузка A , которая должна находиться в допустимых пределах, что не всегда достижимо. Зная u , находим коэффициент k_u и переходим непосредственно к определению основных размеров активной зоны генератора.

Когда n и f заданы, то можно выбрать λ согласно общим рекомендациям (например, для общепромышленных генераторов $\lambda = 0,8/\sqrt{p}$, для авиационных генераторов $\lambda \approx 0,5-0,8$) или с учетом рассматриваемой АИЭ.

Если число полюсов не фиксировано жестко, можно найти его оптимальное значение

$$Q_M = \frac{120 S_{HOM} k_d}{k_u \pi^2 B_r H_c p E_0^* I_k^* n}.$$

Поскольку $E_0^* I_k^*$ зависит от относительных магнитных проводимостей, которые, в свою очередь, зависят от p , можно

построить зависимость $Q_M(p)$ и по ее минимуму найти $p = p_{opt}$. В некоторых случаях значение p_{opt} находится из условия $dQ_M/dp = 0$, однако определение производной dQ_M/dp обычно не проще, чем прямое построение зависимости $Q_M(p)$.

При выявлении зависимостей относительных магнитных проводимостей от p необходимо учитывать не только p на абсолютные значения проводимостей, но возможную зависимость от p масштаба $m_A = B_r S_M / (H_c l_M)$, поскольку при изменении числа полюсов могут изменяться их размеры (S_M, l_M) из-за конструктивных ограничений. Во всех случаях $S_M = b_M l$.

Далее необходимо найти индукцию B_σ для расчета магнитной цепи. Сначала определяется индукция магнита B_{MO} при холостом ходе с учетом прямолинейной характеристики размагничивания

$$B_{*MO}^* = 1 - H_{*MO}^* = 1 - F_{\delta O}^* = 1 - (\Phi_{*MO}^* / \Lambda_{\delta}^*) = 1 - (E_O^* / \Lambda_{\delta}^*). \quad (4.77)$$

Полезная индукция магнита при холостом ходе

$$B_{*PO}^* = B_{*MO}^* - F_{\delta O}^* \Lambda_{\sigma}^* = 1 - E_O^* (\Lambda_{\sigma}^* + 1) / \Lambda_{\delta}^* \quad (4.78)$$

Относительная индукция в зазоре при холостом ходе

$$B_{\delta O}^* = 2 B_{*PO}^* b_M / (\alpha_\delta \tau) = 2 p B_{*PO}^* (\alpha_p - \Delta^*) / (\pi \alpha_\delta). \quad (4.79)$$

Рабочая индукция в зазоре, пропорциональная напряжению генератора, с учетом влияния рассеяния якоря определяется по формуле

$$B_\delta = B_r B_{\delta 0}^* k_E u, \quad (4.80)$$

где

$$k_E = E_\delta / U = \sqrt{\cos^2 \phi + (X_{\sigma a^*} + \sin \phi)^2}, \quad (4.81)$$

причем относительное индуктивное сопротивление рассеяния якоря в традиционных относительных единицах (обозначаемых звездочкой внизу)

$$X_{\sigma a^*} = X_{\sigma a} I_{ном} / U_{ном} = \Lambda_{\sigma a}^* (m_E / m_1) (I_{ном} / U_{ном}) = \Lambda_{\sigma a}^* I^* / (u E_0^*),$$

Обычно $X_{\sigma a^*} \approx 0,05 - 0,15$.

Задаваясь различными значениями тока, можно построить внешнюю характеристику генератора. Глубина паза якоря

$$h_{\Pi} = \frac{A}{(j_a b_{\Pi}^* k_{III})}, \quad (4.82)$$

где j_a – плотность тока в якоре, выбираемая с учетом системы охлаждения генератора; $b_{\Pi}^* = b_{\Pi}/t_z$ – относительная ширина паза; $t_z = \pi D/Z$ – пазовое деление; $Z = 2pmq$ – число пазов (зубцов); k_{III} – коэффициент использования паза.

Можно предварительно принять $b_{\Pi}^* \approx 0,5-0,6$; $k_{III} \approx 0,4$ (для круглого провода). По значению b_{Π}^* можно оценить характерную индукцию в зубце

$$B_z \approx \frac{B_{\delta}}{(1 - b_{\Pi}^*)}, \quad (4.83)$$

и согласовать ее с допустимыми для материала сердечнику значениями. Зная B_z , можно по характеристикам материала найти H_z , падение магнитного потенциала в зубце $F_z \approx H_z h_{\Pi}$ и уточненное значение $k_{\mu} \approx (F_{\delta} + F_z)/F_{\delta}$ (падение магнитного потенциала в ярме якоря несущественно, так как обычно сталь в машинах с ПМ слабонасыщенности и за счет многополюсности длина линии индукции в ярме относительно мала).

По размерам $\delta = \delta^* D / (k_{\mu} k_{\delta})$, t_z и $b_{\Pi} = b_{\Pi}^* t_z$ можно также уточнить коэффициент k_{δ} , используя например, формулу

$$k_{\delta} \approx (10\delta + t_z) / (10\delta + b_z), \quad (4.84)$$

где $b_z = t_z - b_{\Pi}$.

По заданному напряжению генератора $U_{НОМ} = u E_0$ находится число витков обмотки якоря

$$W = \frac{U_{НОМ}}{\pi \sqrt{2} u k_0 f B_{\delta 0} \alpha_{\delta} \tau l}, \quad (4.85)$$

где $B_{\delta 0} = B^*_{\delta 0} B_r$. Число проводников в пазу

$$u_{\Pi} = a_1 W / pq, \quad (4.86)$$

где a_1 – число параллельных ветвей обмотки фазы.

Значения W обычно округляются так, чтобы u_{Π} было четным для реализации двухслойных обмоток.

Сечение провода в пазу

$$S_{\Pi P} = b_{\Pi} h_{\Pi} k_{III} / (a_1 u_{\Pi}). \quad (4.87)$$

Это значение может округляться до стационарных значений. Округления W , u_{Π} , $S_{\Pi P}$ могут потребовать уточнения ряда показателей.

Далее находится ток генератора $I_{НОМ} = j_a S_{\Pi P} a_1$. С другой стороны ток генератора с учетом полной мощности

$$I_{НОМ} = S_{НОМ} / (m U_{НОМ}).$$

Кроме того, $I_{НОМ} = m I^*$. Рассчитанные таким образом значения $I_{НОМ}$ должны быть достаточно близкими. Некоторые расхождения могут вызываться округлениями величин и другими второстепенными факторами.

Высота спинки ярма якоря

$$h_{я} = 0,5 \alpha_{\delta} k_E \tau B_{\delta} / (k_c B_{я}), \quad (4.88)$$

где $B_{я}$ – индукция в ярме; k_c – коэффициент заполнения пакета якоря сталью. Значения $B_{я}$ и k_c выбираются согласно общим рекомендациям.

Объем провода обмотки якоря при отгибе лобовых частей на угол $\alpha_l = 45^\circ$

$$Q_a \approx \pi h_{\Pi} b_{\Pi}^* k_{III} (D + h_{\Pi}) (l + \sqrt{2} \tau). \quad (4.89)$$

При других углах α_l объем Q_a изменяется незначительно.

Потери в обмотке якоря

$$\Delta P_a = \rho_t j_a^2 Q_a, \quad (4.90)$$

где ρ_t – удельное сопротивление провода при рабочей температуре.

Масса зубцов якоря и потери в ней соответственно

$$M_z \approx \gamma_{ст} p h_{\Pi} l (1 - b_{\Pi}^*) (D + h_{\Pi}) k_c, \quad (4.91)$$

$$\Delta P_z \approx k_{TZ} p_0 [B_{\delta} / (1 - b_{\Pi}^*)]^2 (f / 400)^{1,5} M_z, \quad (4.92)$$

где $k_{TZ} \approx 2$ – технологический коэффициент, учитывающий дефекты шихтовки пакета после его механической обработки и другие факторы; p_0 – удельные потери ($Bm/кг$) для материала магнитопровода при $B_Z = 1$ Тл и $f = 400$ Гц.

Масса спинки якоря и потери в ней соответственно

$$M_{я} \gg g p h_{я} l (D + h_{я} + 2h_{п}) k_c, \quad (4.93)$$

$$\Delta P_{я} \approx k_{ТЯ} p_0 B_{я}^2 (f / 400)^{1.5} M_{я}, \quad (4.94)$$

где $k_{ТЯ} \approx 1,4$.

Поверхностные потери в наружном цилиндре ротора

$$\Delta P_{ПОВ} \approx \pi D \alpha_p l K_0 n^{1.5} (\pi D B_0)^2 / \sqrt{Z}, \quad (4.95)$$

где $K_0 \approx 23$ для сплошного цилиндра; $B_0 \approx B \delta (k \delta - 1)$.

Полная масса генератора

$$M = (M_Z + M_{я} + M_{ПМ} + M_C) 1,8. \quad (4.96)$$

Механические $\Delta P_{МEX}$ и добавочные $\Delta P_{ДОБ}$ потери рассчитываются по общим рекомендациям. Если на валу имеется вентилятор, то он дает основной вклад в потери $\Delta P_{МEX}$, которые могут оцениваться по формуле

$$\Delta P_{МEX} \approx (2 \dots 2,5) D_B^4 b_B n^3 10^{-4}, \quad (4.97)$$

где D_B и b_B – соответственно диаметр вентилятора и ширина его лопатки.

Суммарные потери

$$\sum \Delta P = \Delta P_Z + \Delta P_{я} + \Delta P_{ПОВ} + \Delta P_{МEX}. \quad (4.98)$$

Коэффициент полезного действия генератора

$$\eta = S_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ} / (S_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ} + \sum \Delta P). \quad (4.99)$$

На рис.4.5 показаны зависимости удельной массы и КПД двух синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) от мощности. Сравнивая характеристики двух генераторов можно сделать вывод о том, что при необходимости повышения частоты генерируемого напряжения целесообразно это осуществлять не за счет изменения числа пар полюсов элек-

трической машины, а за счет повышения частоты вращения приводного двигателя.

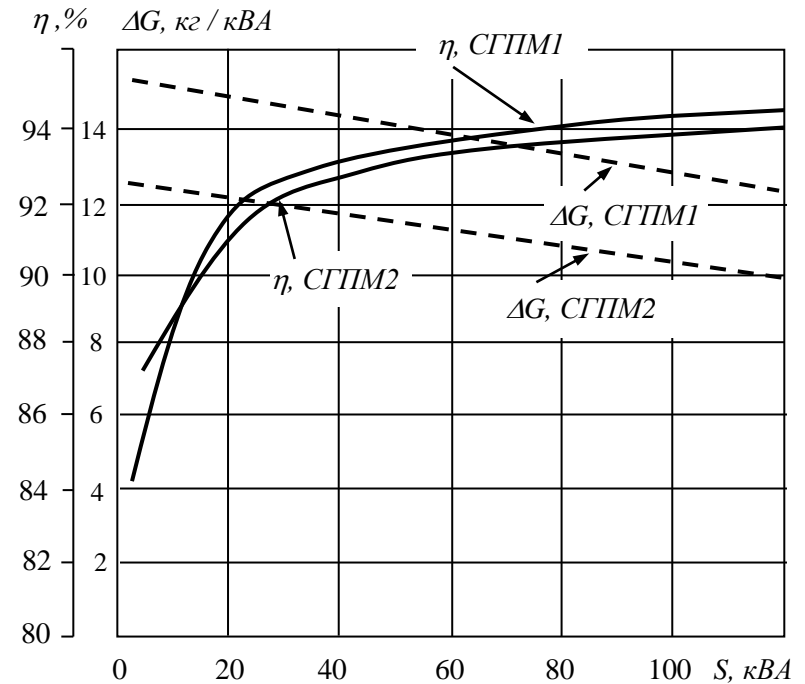


Рисунок 4.5 – Зависимости удельной массы и КПД СГПМ от мощности, при этом СГПМ1 имеет одну пару полюсов, а СГПМ2 – две пары

4.6 Особенности расчета бесконтактных генераторов постоянного тока

В настоящее время вследствие интенсивного развития полупроводниковых приборов появляется возможность эффективной замены контактных коллекторных генераторов постоянного тока (ГПТ) на бесконтактные ГПТ, выполненных на базе бесконтактных электрических машин и полупроводниковых преобразователей. В бесконтактных ГПТ – вентильных генераторах (ВГ) преобразователем электроэнергии является полупроводниковый выпрямитель, который может быть реализован на базе неуправляемых или управляемых вентилей, а в качестве генератора электроэнергии могут использоваться бесконтактные СГПМ или АГ.

ВГ постоянного тока не только конкурентоспособны с коллекторными генераторами, но и могут использоваться в условиях, исключающих применение коллекторных машин (в высокоскоростных установках с магнитными подшипниками, при низком давлении, в присутствии агрессивных сред и т.п.).

С другой стороны совместная работа СГПМ, АГ с управляемым полупроводниковым выпрямителем упрощает их общую проблему по стабилизации напряжения.

Для выпрямления тока генераторов переменного тока, как правило, применяются схемы трехфазных выпрямителей со средней точкой и мостовая (рис.4.6).

Процесс коммутации вентилей выпрямителей близок по своей физической природе к начальному этапу двухфазного короткого замыкания генератора, т.е. существует промежуток времен γ (угол коммутации), когда оба вентиля находятся во включенном состоянии. Это происходит из-за наличия индуктивности в цепи. Ток в отключаемом вентиле спадает от средневыпрямленного значения I_d до 0, а во включенном вентиле нарастает от 0 до I_d .

Рассмотрим основные зависимости для схемы выпрямителя со средней точкой. Для неуправляемого выпрямителя, когда угол управления $\alpha = 0$, угол коммутации определяется по формуле

$$\cos \gamma = 1 - 2X_k I_d / (\sqrt{6}U). \quad (4.100)$$

Для управляемого выпрямителя

$$\cos(\gamma + \alpha) = \cos \alpha - 2X_k I_d / (\sqrt{6}U), \quad (4.101)$$

где $X_k = \omega L_k$ – индуктивное сопротивление обмотки фазы во время коммутации; U – действующее значение фазного напряжения

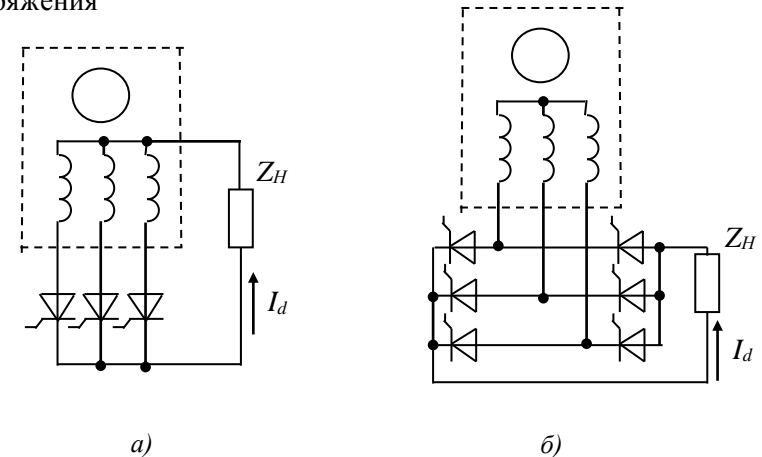


Рисунок 4.6 – Схемы вентильных генераторов на базе трехфазных выпрямителей со средней точкой (а) и мостовой схемы (б)

С ростом угла (4.101) управления α угол коммутации γ уменьшается. При этом напряжение на коммутирующих вентилях равно полусумме напряжений отключающейся и включающейся фазы. К примеру, при коммутации вентилей в фазах А и В

$$u_{VS} = 0,5(u_A + u_B). \quad (4.102)$$

Коммутация вентиля происходит с периодичностью $2\pi/3$, поэтому среднее значение потерь выпрямленного напряжения

$$\Delta U_{\kappa} = (3/2\pi)X_{\kappa}I_d. \quad (4.103)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения ВГ при использовании выпрямителя со средней точкой

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi}U \cos \alpha - \frac{3}{2\pi}X_{\kappa}I_d. \quad (4.104)$$

Формула (4.104) описывает внешнюю характеристику выпрямителя со средней точкой. Чем больше X_{κ} , тем меньше значения выходного напряжения U_d . Кроме того, увеличение угла управления α также приводит к уменьшению U_d .

По характеру выпрямленного напряжения мостовая схема (рис.4.6, б) эквивалентна шестифазной со средней точкой. Мостовая схема выпрямителя обеспечивает лучшее использование ЭДС генератора, так как каждая фаза в ней работает $2/3$ периода (по $1/3$ для каждой полуволны напряжения) в отличие от схемы со средней точкой, где каждая фаза включена только $1/3$ периода.

Рассмотрим основные зависимости для мостовой схемы выпрямителя ВГ. Потери выпрямленного напряжения

$$\Delta U_{\kappa} = (3/\pi)X_{\kappa}I_d. \quad (4.105)$$

При значении угла коммутации $\gamma < \pi/3$ внешняя характеристика выпрямителя описывается формулой

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U \cos \alpha - \frac{3}{\pi}X_{\kappa}I_d. \quad (4.106)$$

Внешняя характеристика в режиме $\gamma > \pi/3$ становится более крутопадающей, и описывается формулой

$$U_d = \left(\frac{9\sqrt{2}}{\pi}U\right)(1 - X_{\kappa}I_d/\sqrt{2}U). \quad (4.107)$$

Из-за того, что в ВГ каждая фаза якорной обмотки работает с перерывами и переключение токов фаз на внешнюю цепь сопровождается процессами коммутации, его мощность

снижается по сравнению с мощностью базового генератора переменного тока. Поэтому целесообразно на этапе проектирования АИЭ провести предварительный анализ степени использования базового генератора переменного тока. Для выявления физической сущности процессов, определяющих степень использования базового генератора при получении от него электроэнергии постоянного тока, как правило, принимают следующие допущения: вентили включаются с задержкой на угол α ; токи имеют прямоугольную форму и сдвинуты относительно момента подачи сигнала включения вентиля на угол $\gamma/2$; напряжение базового генератора имеет синусоидальную форму.

Основные расчетные соотношения для мостовой схемы выпрямителя. Действующее значение тока, соответствующее прямоугольной формы фазного тока

$$I = I_d \sqrt{2/3}. \quad (4.108)$$

Активная мощность одной фазы

$$P_{\phi} = (3/\pi)UI \cos(\alpha + \gamma/2). \quad (4.109)$$

Расчетная мощность фазы базового генератора переменного тока

$$P_{\Gamma} = UI. \quad (4.110)$$

Таким образом, при работе на выпрямитель коэффициент использования генератора

$$k_{ис} = P_{\phi} / P_{\Gamma} = (3/\pi) \cos(\alpha + \gamma/2). \quad (4.111)$$

Из (4.102) видно, что регулирование выпрямителя и процесс коммутации вентилях ухудшают использование базового генератора. При $\alpha = \gamma = 0$ коэффициент использования генератора имеет максимальное значение, что составляет $k_{ис} \approx 3/\pi \approx 0,955$.

Основные расчетные соотношения для схемы выпрямителя со средней точкой. Действующее значение тока

$$I = I_d / \sqrt{3}. \quad (4.112)$$

Активная мощность одной фазы

$$P_{\phi} = (3 / \sqrt{2\pi}) UI \cos(\alpha + \gamma / 2). \quad (4.113)$$

Коэффициент использования генератора

$$k_{ис} = (3 / \sqrt{2\pi}) \cos(\alpha + \gamma / 2). \quad (4.114)$$

Следовательно, мощность ВГ и коэффициент использования базового генератора для схемы выпрямителя со средней точкой в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем для мостовой схемы. В любом случае расчетная (типовая) мощность ВГ должна быть в $1/k_{ис}$ раз больше реальной развиваемой им мощности.

Характерной особенностью работы ВГ с регулируемыеми выпрямителями является тот факт, что увеличение угла управления α приводит к росту его реактивной мощности (хотя нагрузка постоянного тока потребляет всегда только активную мощность). Это связано с тем, что увеличение угла управления α вызывает большое смещение по фазе первой гармоники тока по отношению к напряжению генератора. Поэтому приближенно можно считать, что ВГ работает с коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = \cos(\alpha + \gamma / 2). \quad (4.115)$$

Таким образом, ВГ помимо активной мощности вырабатывает реактивную мощность Q , тем большую, чем больше углы α и γ . Приближенно реактивную мощность ВГ можно определить по формуле

$$Q \approx m UI \sin \varphi. \quad (4.116)$$

Стабилизация напряжения ВГ осуществляется путем изменения угла управления полупроводниковыми ключами. Однако, для обеспечения требуемого повышенного качества выходного напряжения постоянного тока (значения коэффициента пульсаций) необходимо провести расчет его гармонического состава и, при необходимости, расчет выходного Г-образного LC-фильтра.

Глава 5

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

5.1 Этапы проектирования автономных систем электроснабжения

Разработка САЭ, как и любого устройства, должна проходить последовательно через все этапы научных, исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Как правило, процесс проектирования САЭ от получения технического задания на систему до разработки рабочей документации и серийного (массового) производства состоит из следующих этапов:

- 1) формирование технического задания на САЭ, здесь осуществляется выбор АИЭ, ПЭ, коммутационных аппаратов и др. устройств, разрабатываются схемы подключения ПЭ к АИЭ и другим системам, при необходимости;
- 2) определение основных показателей САЭ по ее критериям эффективности;
- 3) разработка электрических схем устройств САЭ, необходимых для выпуска рабочих чертежей;
- 4) корректировка технических решений, электрических схем и рабочих чертежей по результатам испытаний.

Одной из главных задач этапа предварительного проектирования САЭ является обоснование структуры системы, в том числе, применяемых в этой структуре ФУ и их параметров. Основными факторами, определяющими целесообразность выбора структурно-схемного решения САЭ, являются предполагаемые условия, в том числе, режимы функционирования и требования, предъявляемые потребителями по параметрам электроэнергии.

Выбор наилучшего (оптимального) варианта структуры САЭ из множества принципиально возможных, на практике

осуществляется на основании сравнительного анализа характеристик и показателей проектируемых систем. Обычно для многих САЭ на первых этапах разработки задаются основными электрическими параметрами и основными показателями критериев эффективности (для передвижных САЭ, прежде всего МГП, показатели надежности и КПД), другие характеристики относятся к ограничениям или часть показателей может не приниматься во внимание вообще. Такой принцип проектирования с одной стороны упрощает процесс разработки, а с другой стороны не позволяет создавать высокоэффективные САЭ. Однако, когда стоит задача о разработке САЭ, как правило, проектировщику известны требования потребителей к параметрам электроэнергии, условия их эксплуатации, поэтому в этом случае несколько упрощается задача по созданию оптимальной системы.

Создание же универсального структурно-схемного решения САЭ, которое было бы востребовано известными потребителями электроэнергии во всем своем многообразии, практически не представляется возможным. Так как такие системы содержали бы избыточное число ФУ и устройств обеспечивающих работу САЭ. Здесь представляется целесообразным разбить структурные решения САЭ на несколько групп, и для этих групп создавать универсальные схемы систем электроснабжения (СЭС).

Так, к примеру, для передвижных САЭ в первую группу должны входить САЭ, которые предназначены для электроснабжения потребителей в основном постоянным током (потребляемая энергия постоянного тока, которыми составляет 70% и более от установленной мощности САЭ). Очевидно, что такие системы должны содержать АИЭ постоянного тока, а в качестве ПЭ должны использоваться конверторы с промежуточным высокочастотным преобразованием электроэнергии (на сегодня преобразователи этого типа имеют относительно высокие показатели по критериям эффективности). Однако значительно лучшие показатели эффектив-

ности, в этом случае, будут иметь САЭ, в которых применяются высокочастотные АИЭ. Поскольку основу САЭ будут составлять трансформаторно-выпрямительные ПЭ (ТВП) и повышение частоты питающего напряжения приведет к значительному улучшению МГП трансформаторов, фильтров, уменьшится число полупроводниковых приборов выпрямителей, повысится КПД ПЭ и САЭ в целом и уменьшится уровень электромагнитных помех.

Ко второй группе следует отнести САЭ, которые предназначены для электроснабжения потребителей в основном переменным током (потребляемая энергия переменного тока, которыми составляет 70% и более от установленной мощности САЭ). Здесь АИЭ должны генерировать напряжение промышленной частоты, за исключением тех случаев, когда основу составляют потребители с повышенной частотой напряжения.

В третью группу должна входить САЭ, где потребляемая мощность на постоянном и переменном токе примерно равномерно распределяется между потребителями. В этом случае необходимо проводить более глубокую оптимизацию САЭ с учетом требований потребителей по качеству электроэнергии и бесперебойности электроснабжения, а также обеспечения высоких показателей критериев эффективности системы.

В общем случае основными этапами методики комплексной оптимизации структурно-схемного решения САЭ приведены ниже.

1. Оценка потребителей по параметрам электроэнергии, в том числе по мощности, уровню напряжения, роду тока, показателям качества электроэнергии, в особенности для ответственных потребителей.

2. Оценка критериев эффективности известных и перспективных решений АИЭ, ПЭ, коммутационной аппаратуры и других устройств системы и их выбор.

3. Разработка структурно-схемного решения системы, с учетом обеспечения гарантированного бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей, здесь же создание резерва, при необходимости, АИЭ и ПЭ, в том числе устройств, блоков и элементов.

4. Разработка функциональной схемы системы. Здесь необходимо предусмотреть все возможные взаимосвязи, с учетом нормального (основного) и предполагаемый других, в том числе аварийных режимов работы. Проводится оценка системы по удельной массе, КПД, надежности, стоимости. Эти показатели являются важными при оценке системы в основном режиме ее функционирования, поскольку они являются определяющими при оценке эффективности САЭ.

5. Исследование электромагнитных процессов, в том числе электромагнитной совместимости и уровня электромагнитных помех. Исследования проводятся с использованием математического моделирования. На практике, иногда есть возможность создать физическую модель перспективного образца, что позволяет в результате с высокой степенью достоверности провести исследования.

6. Выбор математических методов решения оптимизационной задачи. Здесь же определяются основные критерии оптимизации.

7. Анализ полученных результатов и выработка практических рекомендаций.

5.2 Критерии эффективности систем автономного электроснабжения

В период эксплуатации САЭ требуемая мощность потребителями постоянного и переменного тока изменяется в широких пределах. Поэтому АИЭ должны работать в режимах, обеспечивающих максимальное и минимальное потребление мощности. Кроме того, если учесть, что потребители отличаются не только по потребляемой мощности и роду

тока, а и по частоте (для переменного тока) и величине напряжения, то можно создать большое число структурных решений САЭ, обеспечивающих генерирование требуемой электроэнергии. Очевидно, что из большого числа структур систем электроснабжения всегда возможно отобрать структуры САЭ, имеющие лучшие, в сравнении с другими техническими решениями показатели критериев эффективности.

Поэтому при создании новых технических решений САЭ проводят их оценку, и осуществляют выбор оптимального варианта на основании показателей критериев эффективности системы. Основными критериями эффективности САЭ являются массогабаритные и энергетические показатели, показатели надежности и стоимости.

Для того чтобы провести объективную оценку проектируемого решения САЭ, как правило, в качестве МГП используют результаты расчета массы, а для оценки энергетических показателей применяют расчетные значения КПД (при проектировании САЭ ответственных потребителей в качестве энергетических показателей могут использоваться критерии оценки качества электроэнергии). Для оценки показателей надежности проводится расчет вероятности безотказной работы в течение определенного времени, средней наработки до первого отказа и коэффициента готовности.

Целесообразно на стадии проектирования, и главным образом для транспортных систем, в начале осуществить оценку САЭ по основным критериям эффективности массе и КПД. Исходными данными для оценки САЭ являются: количество шин гарантированного электроснабжения (здесь учитывается род тока его частота, уровень напряжения и мощность потребителей); известные технические решения эксплуатируемых и перспективных приводных двигателей, генераторов и преобразователей электроэнергии. Далее строится обобщенная схема электроснабжения. С учетом известных режимов работы, в том числе их времени, можно определить массу и КПД, как АИЭ и преобразователей, так и воз-

можных вариантов структурного решения САЭ в целом. При этом масса САЭ определяется по формуле

$$M_{САЭ} = \sum_{i=1}^n S_{АИЭi} (m_{ПДi} + m_{Гi}) + \sum_{j=1}^k S_{ПЭj} m_{ПЭj}, \quad (5.1)$$

где $S_{АИЭi}$ и $S_{ПЭj}$ – мощность автономного i -го источника и j -го преобразователя электроэнергии соответственно, в том числе резервных; n и k – количество источников и преобразователей соответственно; $m_{ПДi}$ и $m_{Гi}$ – значения удельных масс приводного двигателя и генератора; $m_{ПЭj}$ – удельная масса преобразователя.

Выражение (5.1) не учитывает массу коммутационной аппаратуры и других элементов системы, но оно позволяет, аргументировано, проводить сравнительную оценку структурных решений САЭ.

Поскольку САЭ работает в нескольких режимах работы, обусловленные, прежде всего, изменением источника электроэнергии, и как последствия работающих преобразователей электроэнергии, то КПД САЭ для одного режима работы, только с учетом потерь в АИЭ и преобразователях, определяется по формуле

$$\eta_{САЭр} = \eta_{АИЭ} \eta_{рПЭ}, \quad (5.2)$$

где $\eta_{АИЭ}$ – КПД автономного источника, работающего в расчетном режиме; $\eta_{рПЭ}$ – результирующее КПД преобразователей электроэнергии расчетного режима, которое определяется по формуле

$$\eta_{рПЭ} = \frac{\sum_{j=1}^k S_{ПЭj}}{\sum_{j=1}^k S_{ПЭj} + \sum_{j=1}^k \Delta P_j}, \quad (5.3)$$

где ΔP_j – потери электроэнергии j -го преобразователя.

Практически определив значения КПД САЭ для всех ее режимов работы, определяющим является значение КПД ос-

новного режима, режима имеющего наибольший временной интервал эксплуатации системы.

Когда полностью известен состав спроектированной системы электроснабжения, проводится расчет основных показателей надежности нового технического решения САЭ и расчет стоимости.

Показатели надежности, как и КПД, определяются для основного режима работы системы. Вероятность безотказной работы системы $P_{САЭ}(t)$ численно показывает степень объективной возможности отсутствия отказа в заданном интервале времени и определяется из выражения

$$P_{САЭ}(t) = P_{АИЭ}(t) \cdot P_{ПЭ}(t), \quad (5.4)$$

где $P_{АИЭ}(t)$ и $P_{ПЭ}(t)$ – вероятности безотказной работы автономных источников и преобразователей электроэнергии соответственно.

Средняя наработка до первого отказа одного СГЭ определяется по формуле

$$T_{срСАЭ} = 1 / \lambda_c(t), \quad (5.5)$$

где $\lambda_c(t)$ – суммарное значение интенсивностей отказов источников и преобразователей.

Учитывая резервирование работы основных функциональных узлов (ФУ) САЭ важным показателем надежности САЭ является бесперебойность электроснабжения потребителей, в особенности ответственных, которая оценивается значением коэффициента готовности K_r . Как правило, считают, что время восстановления работоспособности функционального узла равно времени включения его резерва, поэтому значение коэффициента готовности функционального узла определяется по формуле

$$K_r = \frac{T_{срФУ}}{T_{срФУ} + t_{вкл}} P_{ФУ}(t), \quad (5.6)$$

где $T_{срфУ}$ – средняя наработка до отказа функционального узла; $t_{вкл}$ – время включения резервного функционального узла; $P_{фУ}(t)$ – вероятность безотказной работы функционального узла в определяемый интервал времени.

Последним этапом оценки эффективности является определение стоимости разработанной САЭ, которая определяется по формуле

$$C_{САЭ} = C_O + C_Э, \quad (5.7)$$

где C_O – стоимость оборудования; $C_Э$ – эксплуатационные расходы.

Стоимость оборудования (ФУ, устройств, блоков и т.д.) для оценочных расчетов в первом приближении вычисляют по формуле

$$C_O = \sum_{i=1}^N P_i C_i, \quad (5.8)$$

где P_i и C_i – мощность и удельная стоимость соответственно i -го оборудования; N – количество оборудования СГЭ.

Затраты на эксплуатационные расходы для различного оборудования происходят в различное время. Поэтому при использовании экономических показателей их необходимо привести к одному времени – началу эксплуатации. В общем случае эксплуатационные расходы определяются по формуле

$$C_Э = \frac{C_{уд}^t C_O}{(1 + E_H)^t} \cdot \alpha_{сс}, \quad (5.9)$$

где $C_{уд}^t$ – удельные эксплуатационные затраты за время эксплуатации t ; E_H – нормативный коэффициент; $\alpha_{сс}$ – коэффициент, учитывающий изменение срока службы.

Оценку эффективности САЭ на этапе проектирования по МГП и КПД рассмотрим на примере обобщенной структурной схемы САЭ, обеспечивающей бесперебойное электроснабжение потребителей, приведенной на рис.5.1.

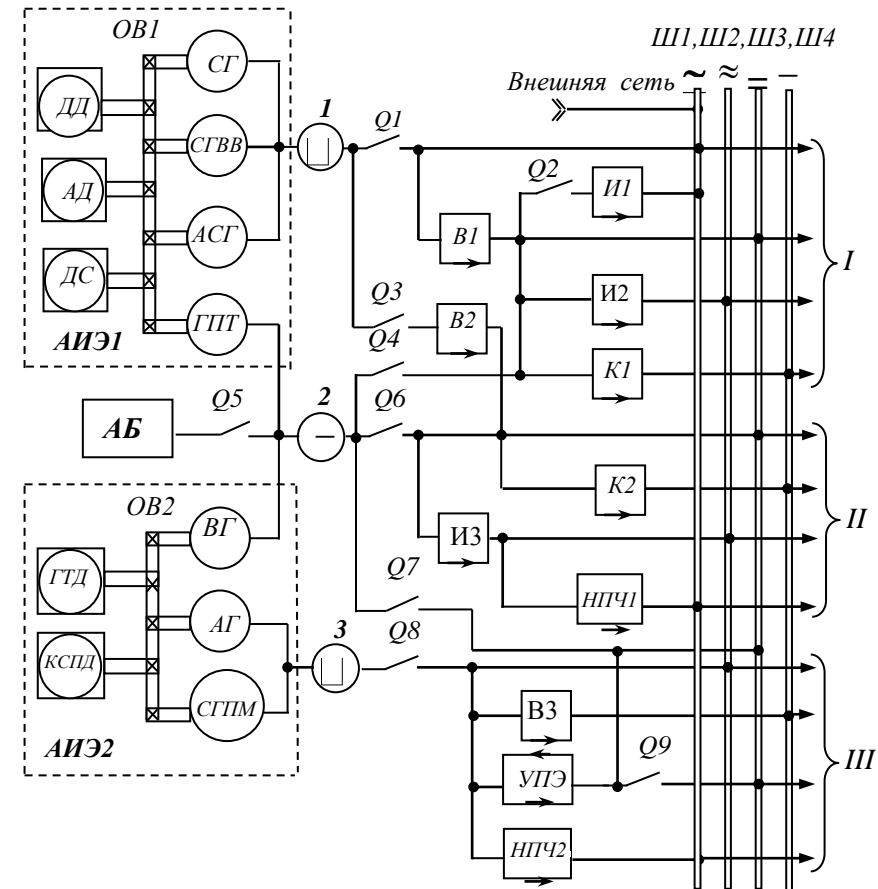


Рисунок 5.1 – Обобщенная системы автономного электроснабжения

Необходимо отметить, что структура САЭ и ее сложность зависят от количества шин гарантированного (бесперебойного) электроснабжения.

В рассматриваемой схеме показаны две системы АИЭ, отличающиеся приводными двигателями ПД, а именно в АИЭ1 привод генераторов осуществляется двигателями с частотой вращения $n = 1500 \text{ об/мин}$, а в АИЭ2 – ВПД с частотой вращения $n = (6000 \div 12000) \text{ об/мин}$. На рис.5.1 показаны также три канала генерирования электроэнергии: 1 – переменного тока промышленной частоты; 2 – постоянного тока; 3 – переменного тока повышенной частоты.

Кроме того, на рис.5.1 обозначено: приводные двигатели ДД – дизельный двигатель, АД – адиабатный двигатель, ДС – двигатель Стирлинга, КСПД – комбинированный свободно-поршневой двигатель, ГТД – газотурбинный двигателей; ОВ1 ÷ ОВ2 – общие валы приводных двигателей и генераторов; резервный источник АБ – аккумуляторные батареи; коммутационные аппараты Q1 ÷ Q9; статические преобразователи электроэнергии В1 ÷ В3 – выпрямители, И1 ÷ И3 – инверторы; К1 ÷ К2 – конверторы; НПЧ1 ÷ НПЧ2 – непосредственные преобразователи частоты; УПЭ – унифицированный ПЭ; шины гарантированного электроснабжения переменного тока промышленной частоты Ш1, повышенной частоты Ш2, постоянного тока с двумя уровнями напряжения Ш3 и Ш4 соответственно; выводы для питания групп потребителей I, II и III.

На рис.5.1 показан также вывод для подключения внешней сети, что позволит, при появлении такой возможности, повысить уровень гарантированного электроснабжения, из-за наличия дополнительного источника электроэнергии.

Когда основным источником электроэнергии является один из автономных источников системы АИЭ1, генерирующих электроэнергию переменного тока промышленной частоты по каналу 1, то для обеспечения электроэнергией потребителей включается коммутационное устройство Q1. Преобразователи В1, И2 и К1 обеспечивают потребители электроэнергией с требуемыми параметрами. Резервными источниками являются генератор постоянного тока ГПТ и аккумулятор-

ные батареи АБ. Для их подключения включаются соответственно аппараты Q5, Q4 и Q2, и отключается Q1. Инвертор И1, в этом случае, является источником питания для потребителей, подключенных к шине Ш1 и для преобразователей В1, И2, К1 соответственно.

Если же основным источником питания являются генераторы постоянного тока ГПТ или ВГ (рис.5.1 канал 2), то в этом случае целесообразно для электроснабжения потребителей применить преобразователи К2, И3 и НПЧ1. Для чего включается коммутационное устройство Q6. Резервный источник - АБ включается коммутационным устройством Q5. В рассматриваемой схеме электроснабжения может быть предусмотрен дополнительный резервный источник переменного тока. Для его подключения включается Q3 и выпрямитель В2 обеспечивает потребители и преобразователи требуемой электроэнергией (Q6 в этом режиме отключен).

Ниже будет показано, что если электроснабжение потребителей осуществляется по каналу переменного тока повышенной частоты (рис.5.1 канал 3), в основном режиме, то СГЭ имеет лучшие показатели в сравнении с рассмотренными схемными решениями СГЭ. Важной особенностью, в этом случае, является использование унифицированного преобразователя электроэнергии УПЭ. Применение УПЭ в СГЭ не потребует дополнительного преобразователя, в случае включения резервного источника постоянного тока коммутационным устройством Q7 (в этом режиме Q8 и Q9 в выключенном положении).

В табл.5.1 приведены средние значения КПД и удельной массы приводных двигателей, генераторов электроэнергии, АИЭ в целом, ПЭ и САЭ для основного режима функционирования системы. Показатели АБ не учитывались, потому что они аналогичны для всех рассмотренных систем. Кроме того, мощность АИЭ находится в пределах $50 \div 70 \text{ кВт}$, а потребляемая мощность шинами гарантированного электроснабжения равна $Ш1 = 20 \text{ кВт}$, $Ш2 = Ш3 = Ш4 = 5$

кВт. Поскольку показатели СГПМ и АГ примерно одинаковы, то в табл.5.1 приведены варианты АИЭ только с использованием АГ. Конверторы выполнены на базе промежуточного высокочастотного звена (частота преобразования находится в пределах $5 \div 10$ кГц).

Как видно с табл.5.1 САЭ, выполненные на базе ВПД, имеют преимущества по показателям КПД и удельной массы в сравнении с САЭ АИЭ, которых, выполнены на базе ДД и СГ.

Таблица 5.1 - Средние значения КПД и удельной массы АИЭ, ПЭ и САЭ

АИЭ				ПЭ				СГЭ	
Тип источника	КПД	кг/кВт	$f_{\text{вых}}, \text{Гц}$	Тип	Мощность, кВт	КПД	КПД ПЭ	кг/кВт	КПД
ДД-СГ	0,25	22	50	В1	20	0,85	0,84	50	0,21
				И2	7	0,80		30	
				К1	7	0,80		3	
ГТД-ВГ	0,18	5	-	К2	7	0,80	0,85	3	0,15
				И3	35	0,78		35	
				НПЧ1	24	0,90		5	
КСПД-АГ	0,36	7	400	В3	7	0,90	0,90	10	0,32
				УПЭ	7	0,90		15	
				НПЧ2	24	0,90		5	

МГП и КПД являются важными показателями САЭ, однако, без показателей надежности, качества электроэнергии и стоимости невозможно судить об эффективности проектируемой САЭ.

5.3 Способы выбора оптимальной структуры автономной системы электроснабжения

Основные трудности при разработке САЭ связаны с определением диапазона оптимальных значений критериев ее эффективности. В то же время именно этот вопрос является

ключевым, поскольку от правильности выбора этого диапазона зависят эксплуатационно-технические характеристики проектируемой САЭ.

Важным является вопрос, при выборе САЭ и решении оптимизационной задачи, учета показателей коммутационных устройств, в особенности для модульной системы. Здесь важно иметь информацию об общем их количестве, типе (контактные, бесконтактные или комбинированные) и частоте коммутаций. Целесообразно показатели всех коммутационных аппаратов, применяемых в САЭ, обобщить и при оценке САЭ принимать, как за показатели функционального узла – коммутационные устройства.

Таким образом, САЭ оценивается по количественным и качественным характеристикам применяемых в ее структуре функциональных узлов: АИЭ, ПЭ и коммутационных аппаратов. Один из простых и эффективных путей выбора оптимального варианта САЭ – это использовать накопленный опыт проектирования, выбрать наилучшие варианты структурно-схемных решений системы, с учетом современной элементной базы, сравнивая значения критериев эффективности основных функциональных узлов, коммутационных аппаратов и других устройств системы, провести сравнительную оценку выбранных вариантов.

Еще один из не сложных подходов – оптимизировать систему по одному или двум критериям, считая фиксированными остальные. Так, к примеру, необходимо оптимизировать САЭ, содержащую АИЭ переменного тока и три шины, для подключения потребителей. Причем шина *Ш1* переменного тока промышленной частоты, а шины *Ш2* и *Ш3* постоянного тока с разным уровнем напряжения (рис.5.2, а). СГЭ может быть выполнена на преобразователях электроэнергии *ПЭ1* и *ПЭ2* или *ПЭ1* и *ПЭ3*. Как правило, после предварительного расчета, строятся графики зависимостей массы и КПД преобразователей от мощности, соответственно $M = f(P)$ и $\eta = f(P)$, как показано на рис.5.2, б.

Графики (рис.5.2, б) позволяют наглядно провести анализ массы и КПД систем ПЭ1÷ПЭ2 и ПЭ1÷ПЭ3, и определить преимущества одной из них. Очевидно, что если АИЭ генерирует переменный ток повышенной частоты, то по МГП и КПД САЭ будет иметь значительные преимущества при использовании в ее структуре преобразователей ПЭ1 и ПЭ2.

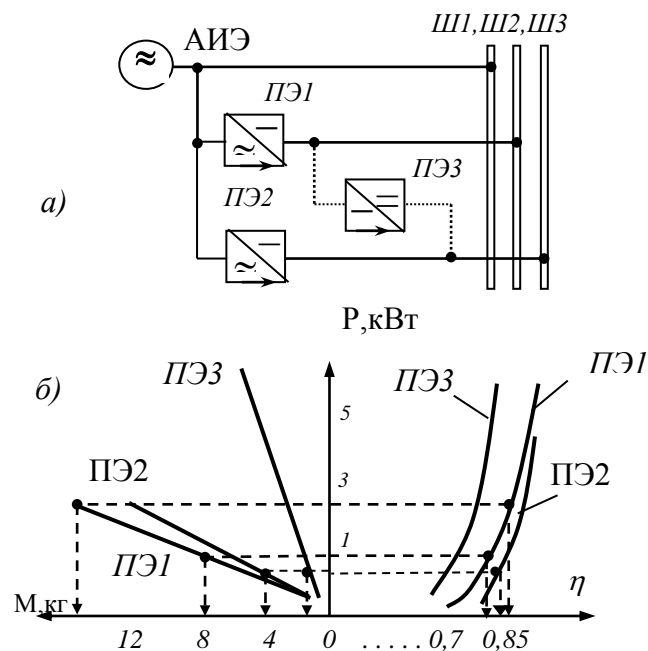


Рисунок 5.2 – Структурная схема САЭ (а) и графики зависимости массы и КПД преобразователей от мощности соответственно $M = f(P)$ и $\eta = f(P)$ (б)

Еще один, известный способ оптимизации, основан на применении многопараметрической (глобальной) оптимизации САЭ используя обобщенный критерий вида

$$F = A_x X + B_y Y + C_z Z + \dots, \quad (5.10)$$

где X, Y, Z – критерии эффективности СГЭ; A_x, B_y, C_z – весовые коэффициенты, определяющие значимость частных критериев.

Минимизация функции F обеспечивается за счет всех критериев эффективности (X, Y, Z, \dots), однако выбор весовых коэффициентов (A_x, B_y, C_z, \dots), как правило, не является строго обоснованным и опирается на использовании субъективных факторов, в том числе при использовании экспертных оценок. Кроме того, значение критериев эффективности зависят друг от друга.

Оптимизация САЭ может осуществляться по различным критериям эффективности. Простейший подход – оптимизировать систему по одному или двум критериям, считая фиксированными остальные.

Более полный результат при оптимизации САЭ, с учетом всех критериев эффективности, можно получить, используя метод компромиссов или последовательных отклонений (уступок). Суть, которого заключается в следующем, в начале фиксируются все критерии эффективности (согласно функции F (5.10)), кроме одного, который оптимизируется ($X \rightarrow X_{min}$). Затем назначается допустимое отклонение от критерия X_{min} в заданных пределах и находится следующий критерий эффективности Y_{min} . Далее задается допустимое отклонение от Y_{min} , при котором находится последующий критерий эффективности Z_{min} и т.д..

Наилучшие результаты обычно дает оптимизация по функции F с перебором характерных значений весовых коэффициентов и использованием ограниченных решений, в которых нельзя одновременно улучшить все критерии эффективности.

В общем случае под оптимизацией конкретного технического решения понимают обобщение экстремума числовой функции, которое формулируется так: решение эффективно, если любой из характеризующих его критериев можно

улучшить лишь за счет ухудшения остальных. Ниже приводятся примеры, иллюстрирующие это правило.

Предположим, что требуется определить, при каких соотношениях между мощностями источников и ПЭ масса САЭ принимает наименьшее значение. Если структура модульной САЭ имеет n источников и m ПЭ, общая масса системы будет определяться по формуле

$$G_{САЭ} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta G_{Иi} P_{Иi}}{1 - k_{Иi}} + \sum_{i=1}^n G_{Иi} + \sum_{j=1}^m \frac{\Delta G_{ПЭj} P_{ПЭj}}{1 - k_{ПЭj}} + \sum_{j=1}^m G_{ПЭj}, \quad (5.11)$$

где $\Delta G_{Иi}$, $\Delta G_{ПЭj}$ и $G_{Иi}$, $G_{ПЭj}$ - удельные показатели и постоянные значения массы источников и ПЭ соответственно; $P_{Иi}$ и $P_{ПЭj}$ - установленные мощности источников и ПЭ; $k_{Иi}$ и $k_{ПЭj}$ - коэффициенты, учитывающие потери электроэнергии в источниках и ПЭ.

Следующей иллюстрацией правила решения оптимизационной задачи является пример сравнения двух вариантов САЭ по трем критериям эффективности КПД η , массе G и стоимости C , приведенный на рис.5.3.

Качество (эффективность) САЭ может оцениваться положением некоторой точки a в трехмерном пространстве (рис.5.3). А проекции этой точки на оси критериев эффективности характеризуют их значения. Если все показатели качества приведены к нормированному виду, т.е. уменьшение любой компоненты улучшает оценку системы, то глобальный показатель качества характеризуется вектором S , соединяющим начало координат с точкой a .

На каждый из критериев эффективности САЭ могут быть наложены ограничения (η_{min} , G_{max} , C_{max}), по которым определяется, удовлетворяет ли данная САЭ техническому заданию на проектирование или нет. Так, САЭ по положению точки a_1 (рис.5.3) не удовлетворяет техническому заданию по показателю стоимости C_1 . Ограничение пространства показателей дает возможность выбора из реализуемых САЭ допустимых, т.е. удовлетворяющим ограничениям по критериям эффективности. Каждой совокупности характеристик

соответствует множество схемных решений САЭ, качество которых характеризуется векторами $S_1 \div S_n$.

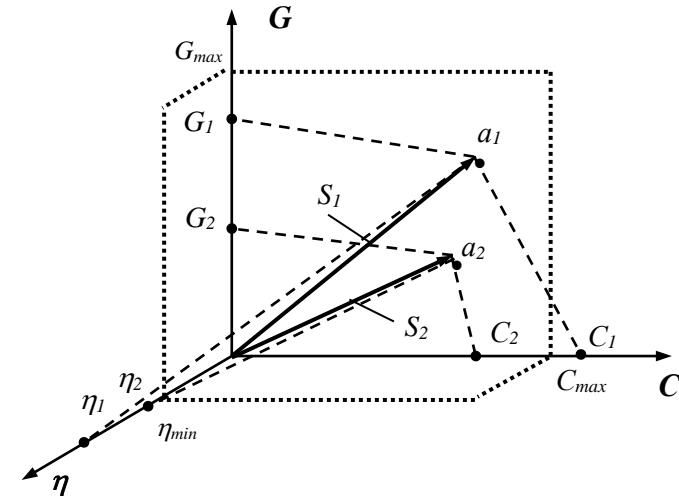


Рисунок 5.3 - Сравнение двух вариантов схем САЭ по трем критериям эффективности КПД η , массе G и стоимости C

Еще одним примером является решение оптимизационной задачи при сравнении трех вариантов САЭ. Сравнение осуществляется уже по четырем критериям эффективности: общей массе - G , КПД системы - η , вероятности безотказной работы $P(t)$ и стоимости системы - C , с учетом, что все четыре сравниваемые САЭ имеют равную выходную мощность, и автономные источники и ПЭ, обеспечивают потребители электроэнергией требуемого качества (рис.5.4). Здесь значение КПД САЭ определяется с учетом КПД АИЭ и ПЭ, работающих в основном режиме функционирования системы.

На каждый из показателей эффективности, в том числе на мощность, могут быть также наложены ограничения по максимальному или минимальному значениям, по которым на

начальном этапе проектирования определяется, удовлетворяет ли САЭ требованиям технического задания (на рис.5.4 эти области ограничены штриховкой).

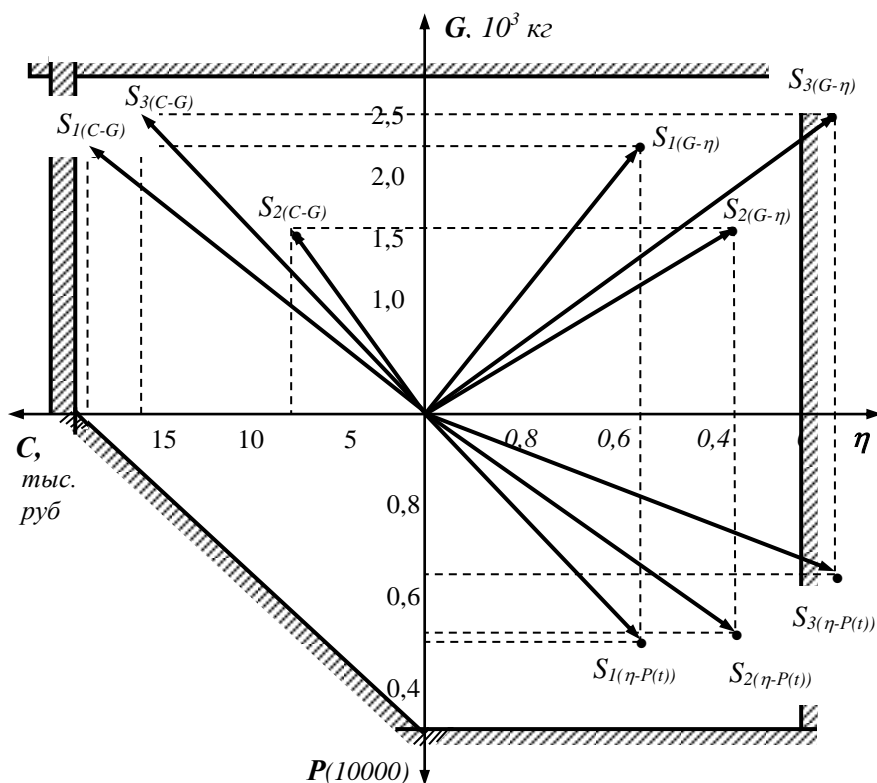


Рисунок 5.4 – Сравнение критериев эффективности САЭ

На рис.5.4 показаны попарные зависимости параметров (C от G , G от η , $P(t)$ от η) четырех систем, определяемые положением некоторой точки $S_{n(i-j)}$, где обозначения в индексе: n – номер системы; i и j – критерии эффективности системы. На рис.5.4 значения КПД η и вероятности безотказной ра-

боты $P(t)$, относительно оси абсцисс, отградуированы в обратном порядке, т.е. начало координат соответствует максимальному значению рассматриваемых критериев (равному 1).

Зависимость двух критериев системы определяется длиной вектора, соединяющего начало координат и точку $S_{n(i-j)}$ (рис.5.4). Очевидно, оптимальной системой будет та, которая, во-первых, удовлетворяет требованиям по предельному ограничению критериев эффективности (максимальному или минимальному), а во-вторых, у которой длина суммы векторов ($S_{n(C-G)} + S_{n(G-\eta)} + S_{n(\eta-P(t))}$) будет иметь наименьшее значение.

Несмотря на то, что критерии эффективности САЭ имеют различные единицы измерения и независимо от масштабирования осей ординат и абсцисс сравнительная оценка САЭ будет являться объективной.

Интересным является направление введение общего экономического критерия САЭ, в котором все частные критерии выражаются с помощью стоимостных эквивалентов или соответствующих затрат. В этом случае оптимизация САЭ может проводиться на достаточно строгой основе. Однако колебания стоимостных критериев в настоящих экономических условиях позволяют использовать такой подход в весьма ограниченных случаях.

5.4 Структурные решения автономных систем с улучшенными техническими характеристиками

В настоящее время возросло количество ответственных потребителей электроэнергии, поэтому актуальным является вопрос разработки бесперебойных САЭ. Один из вариантов функциональной схемы такой системы приведен на рис.5.5. В состав САЭ схемы входят: приводные двигатели ПД1 и ПД2; автономные источники электроэнергии АИЭ1 и АИЭ2, выполненные на асинхронных генераторах АГ1 и АГ2; блоки возбуждения АГ БВ1 и БВ2; распределительные устройства РУ1 и РУ2; непосредственный преобразователь частоты НПЧ,

трансформатор с вращающимся магнитным полем *ТВМП*; резервный источник электроэнергии *РИЭ*.

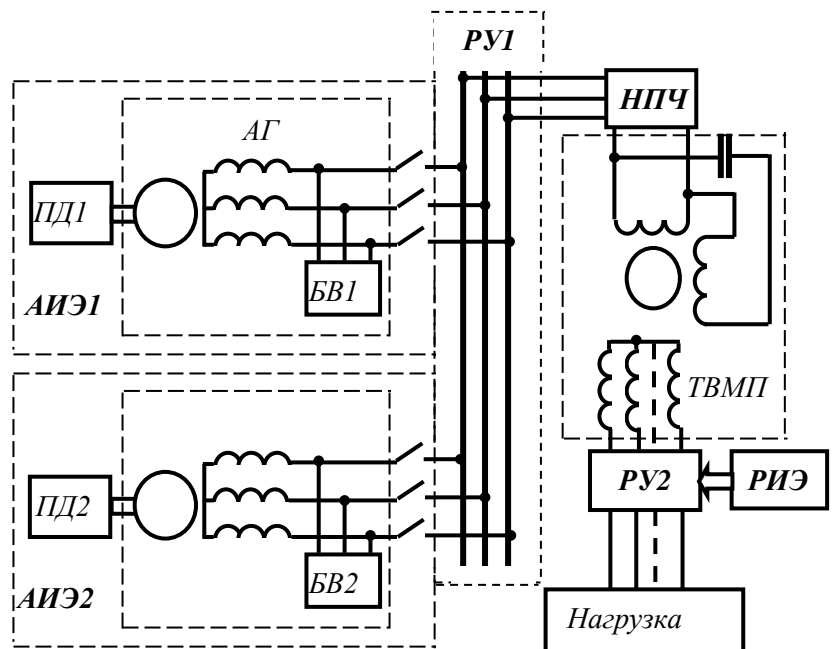


Рисунок 5.5 – Функциональная схема системы бесперебойного электроснабжения на АГ

Работа САЭ. Асинхронные генераторы *АГ1* и *АГ2* подключаются к общим шинам распределительного устройства *РУ1* только после их возбуждения, которое обеспечивают конденсаторы блоков возбуждения *БВ1* и *БВ2*. *НПЧ* стабилизирует напряжение генераторов и преобразует частоту тока генерируемого напряжения до значений необходимых нагрузке. Для повышения показателей надежности преобразователя *НПЧ*, выполнен с однофазным выходом. *ТВМП*

кроме осуществления гальванической развязки источников с нагрузкой осуществляет функции преобразования однофазного напряжения в многофазное, которое через распределительное устройство *РУ2* подключается к нагрузке.

Для повышения надежности электроснабжения к распределительному устройству *РУ2* подключен резервный источник электроэнергии *РИЭ*. Кроме того, для компенсации реактивной мощности нагрузки с *РУ2* могут быть подключены блоки конденсаторов.

На рис.5.6 приведена функциональная схема САЭ бесперебойного электроснабжения, выполненная на базе вентильных генераторов. В состав схемы входят: автономные источники электроэнергии *АИЭ1* и *АИЭ2* постоянного тока, выполненные на вентильных генераторах *ВГ1* и *ВГ2*; инвертор *И*; трансформатор с вращающимся магнитным полем *ТВМП*; и распределительные устройства *РУ1* и *РУ2*.

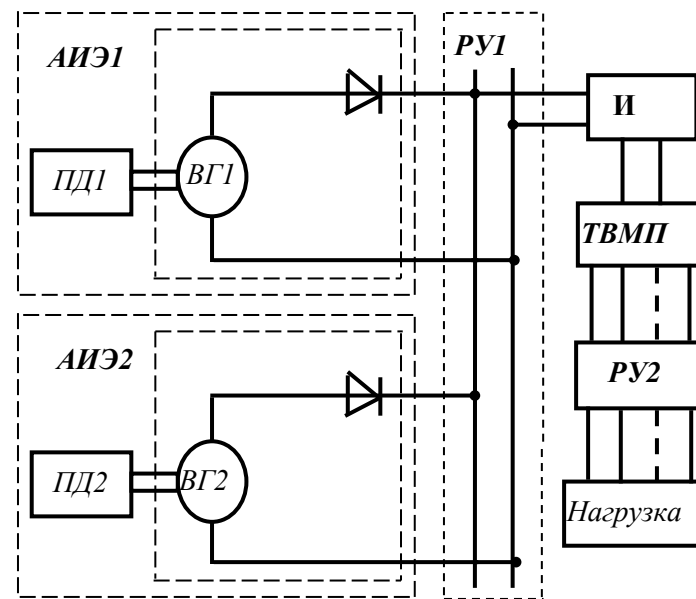


Рисунок 5.6 – Функциональная схема системы бесперебойного электроснабжения на ВГ

Выводы источников через разделительные диоды подключены к распределительному устройству *PV1*. Разделительные диоды предназначены для защиты ВГ от аварийных режимов работы системы, в том числе параллельно работающих генераторов, а в случаях одновременного возбуждения генераторов они защищают не возбуждавшийся генератор от двигательного режима работы. Инвертор *И* осуществляет преобразование напряжения постоянного тока в однофазное напряжение переменного тока, а трансформатор с вращающимся магнитным полем *ТВМП* осуществляет его преобразование в многофазную систему и обеспечивает стабилизацию напряжения за счет использования в первичной обмотке трансформатора дросселя управления с обмоткой подмагничивания. Через распределительное устройство *PV2* напряжение подключается к нагрузке. В *PV2* так же может быть предусмотрен вход для подключения резервного источника энергии.

5.5 Модульное построение автономных систем

Модульный принцип построения САЭ является весьма перспективным, поскольку позволяет обеспечить высокую надежность работы системы, за счет резервирования основных узлов и блоков (элементов); при необходимости он позволяет достаточно просто увеличивать установленную мощность источников, преобразователей и накопителей электроэнергии путем включения работающих модулей на параллельную работу с аналогичными функциональными модулями. Кроме того, модульные системы сократят время их проектирования, изготовления оборудования, упростят задачу по изменению структуры САЭ в зависимости от требований потребителей. Значительный технико-экономический эффект достигается при эксплуатации модульных САЭ за счет сокращения времени на устранение неисправностей, поскольку

неисправные модульные блоки автоматически заменяются на рабочие.

В общем случае функциональный модуль САЭ – это устройство, выполняющее функции источника, преобразователя, накопителя электроэнергии и коммутационных аппаратов, конструкция которого позволяет однотипными устройствами увеличивать установленную мощность путем включения их на параллельную работу. Блоки и устройства функциональных модулей САЭ должны выполнять функции коммутационных аппаратов, распределительных устройств, фильтров, устройств защиты и стабилизации параметров электроэнергии. Модульный элемент – датчик, полупроводниковый или группа приборов и т.д. Конструктивное модульное исполнение устройства, блока, элемента подразумевает в первую очередь компактность конструктивного построения и размещения с целью удобства эксплуатации (не сложными техническими операциями производить быструю замену при неисправностях, в том числе автоматическую, удобство осуществления технического обслуживания или ремонта).

При проектировании САЭ необходимо учитывать, что на структуру системы и соответственно на основные ее характеристики оказывают влияние в основном два фактора, определяемые потребителями электроэнергии:

- допустимое время перерыва в электроснабжении;
- показатели качества электроэнергии.

Если потребители электроэнергии ответственные и практически необходимо, чтобы отсутствовал перерыв в электроснабжении, в этом случае увеличивается количество резервных АИЭ и соответственно усложняется структура САЭ. Кроме того, как известно, чем выше требования к качеству электроэнергии, тем соответственно усложняется конструкция АИЭ, в том числе их систем управления, обеспечивающих стабилизацию параметров электроэнергии, в том числе параллельную работу.

В общем случае задача синтеза структуры модульной САЭ должна в себя включать:

1) выбор принципов построения и разработку структуры системы с учетом требований потребителей к качеству электроэнергии и по допустимому времени перерыва в электропитании;

2) определение необходимого уровня резервирования основных функциональных узлов (АИЭ, преобразователей, блоков, элементов и т.п.) с учетом обеспечения требуемой надежности работы системы;

3) обеспечение совместимости модулей и рациональное их распределение при нормальной и аварийной работе системы, обеспечивающее наиболее эффективные взаимосвязи.

Для решения первой задачи необходимо решить вопрос разделения САЭ на модули. Предложенное выше разделение САЭ на функциональные модули и модульные устройства, блоки, элементы позволит повысить эффективности системы, и, прежде всего ее эксплуатационно-технических характеристик.

Создание единого по структуре функционального модуля АИЭ для САЭ является нецелесообразным, поскольку источники в САЭ должны генерировать не только переменный ток промышленной частоты, а иногда целесообразно, чтобы они генерировали напряжение повышенной частоты или повышенное напряжение постоянного тока, что позволило бы улучшить основные критерии эффективности за счет оптимизации структуры САЭ.

Поэтому необходимо разрабатывать несколько типов функциональных модулей АИЭ, отличающихся по технологии изготовления, параметрам электроэнергии и имеющие типовые значения мощности. Систему управления (СУ), защиты, контроля и регулирования параметров выходного напряжения функциональных модулей автономных источников должны быть построены по локальному принципу (самостоятельно осуществлять стабилизацию параметров электроэнер-

гии), но иметь общую связь с центральной системой управления САЭ, основная функция которой, подача команды на включение резерва или на параллельную работу источников.

Для обеспечения требуемой надежности работы системы должна быть решена вторая задача синтеза структуры САЭ, которая предполагает определение необходимого уровня резервирования функциональных модулей.

Модульное агрегатирование САЭ должно осуществляться по двум основным принципам, обеспечивающим полное или частичное резервирование источников и ПЭ.

При **полном резервировании** максимальная мощность потребителя не превышает максимально допустимой мощности одного ФУ (АИЭ или ПЭ), т.е. один функциональный узел (ФУ) находится в работе, а второй и, может быть, последующие – в резерве. В этом случае вопросы обеспечения параллельной работы и наращивания установленной мощности ФУ исключаются. Основное достоинство данного принципа – высокая надежность, а недостаток – относительно большая масса и габариты системы в целом.

При **частичном резервировании** допустимая мощность одного ФУ меньше максимальной мощности потребителя. При необходимости наращивания мощности в работу включается один из резервных ФУ. Частичное резервирование предполагает построение трехфазных преобразователей на основе однофазных модулей ФУ. Главное достоинство данного принципа – улучшенные массогабаритные характеристики системы. Если при полном резервировании в случае выхода из строя трехфазного модульного ФУ в работу включается аналогичный ФУ, то в случае частного резервирования при неисправности одного из однофазных модулей трехфазного устройства вместо него включается резервный однофазный модуль.

Следует отметить две особенности частичного резервирования:

– распределение мощности не должно приводить к перегрузке одного из работающих агрегатов, поэтому рабочие и резервные агрегаты должны быть одной мощности;

– необходимо обеспечить параллельную работу АИЭ и ПЭ.

Эффективность эксплуатации САЭ при ее модульном агрегатировании очевидна, однако при проектировании транспортных САЭ целесообразно использовать оба принципа построения модульной системы. При этом принцип частичного резервирования необходимо применять для выпрямителей и преобразователей постоянного тока, а принцип полного резервирования – для инверторов и преобразователей частоты (в данном случае незначительно увеличивается масса системы, поскольку эти преобразователи в САЭ выполняются небольшой мощности).

В стационарных САЭ к которым не предъявляются высокие требования по МГП, необходимо использовать принцип полного резервирования основных узлов системы.

Решение третьей задачи предусматривает, прежде всего, необходимость обеспечения электрической, конструктивной, электромагнитной совместимости функциональных модулей СГЭ, а также их рациональное распределение, обеспечивая наиболее эффективные взаимосвязи.

Под электрической совместимостью модулей понимается возможность их совместного использования по следующим параметрам: мощности, входному и выходному напряжению. Под конструктивной совместимостью понимается взаимосопрягаемый набор несущих конструкций и разъемных соединений модулей, позволяющий осуществлять рациональную компоновку аппаратуры. Под электромагнитной совместимостью модулей понимается возможность их совместного функционирования в составе модульной системы в условиях взаимно создаваемых ими электромагнитного поля и помех. Модульное построение САЭ предусматривает также необходимость информационной и программной совместимости СУ, контроля и регулирования параметров выходного напряжения модулей. Под информаци-

онной совместимостью понимается единство информационных сигналов по их виду, количеству, системе кодирования и т.д. Под программной совместимостью понимается унификация системы команд и программно-аппаратная организация СУ.

На рис.5.7 представлен вариант структурной схемы САЭ, выполненной на базе высокочастотных источников электроэнергии *ВЧИ1* и *ВЧИ2*, трансформаторно-выпрямительных блоков *ТВБ1* и *ТВБ2*, унифицированных модульных преобразователей электроэнергии *УМП1* и *УМП2*. Универсальные модульные преобразователи (УМП) способны пропускать потоки электроэнергии через себя в обоих направлениях. При этом, в первом случае они могут работать в режиме инвертора, а во втором – в режиме выпрямителя.

На рис.5.7 показаны также блок накопителей электроэнергии *БНЭ*, шина переменного тока промышленной частоты *Ш1*, шина переменного тока повышенной частоты *Ш3*, шина напряжения постоянного тока *Ш2* и выводы для подключения нагрузки *1÷7*.

При питании потребителей электрической энергии от внешней сети *УМП1* работает в режиме выпрямителя, а *УМП2* – в режиме высокочастотного инвертора, блок накопителей *БНЭ* находится в режиме подзаряда (пунктирной линией на рис.5.7 показаны направления передачи электроэнергии от УМП). Когда электроснабжение потребителей осуществляют высокочастотные источники электроэнергии *ВЧИ1* и *ВЧИ2*, блок *БНЭ* продолжает работать в предыдущем режиме, а преобразователи *УМП1* и *УМП2* переходят работать в режим преобразователя частоты и выпрямителя соответственно. В случае, когда же основным источником электроэнергии является *БНЭ*, *УМП1* продолжает работать в режиме преобразователя частоты, а *УМП2* снова переходит работать в режим высокочастотного инвертора. При модульном построении САЭ необходимо учитывать способы подключения ПЭ к источнику и нагрузке, поскольку способ подключения зависит от параметров электроэнергии источника и преобразователя.

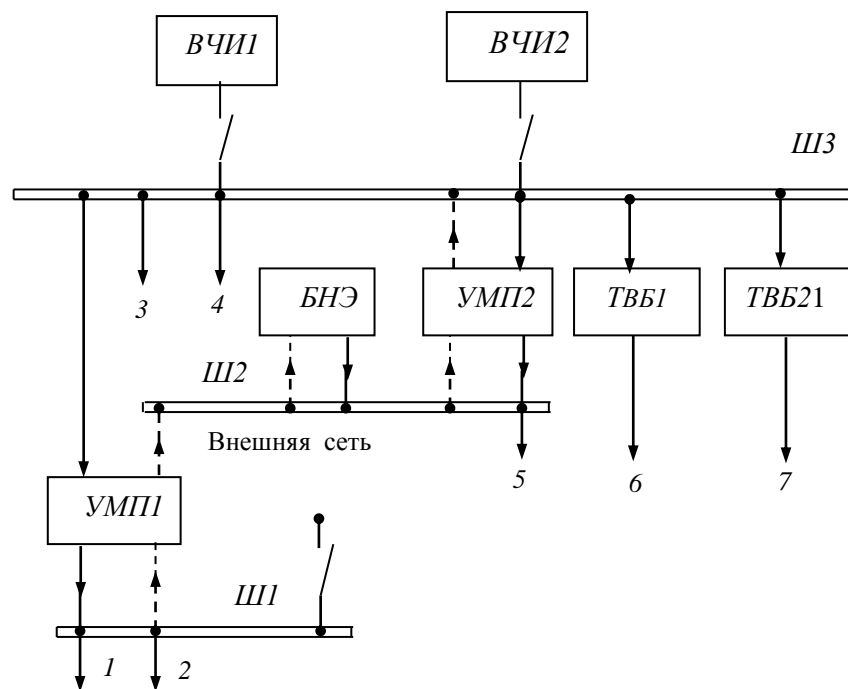


Рисунок 5.7 – Структурная схема САЭ с использованием универсального модульного преобразователя электроэнергии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, содержащиеся в монографии, представляют собой разработку теоретических положений, совокупность которых является развитием методов построения САЭ, в том числе систем бесперебойного электроснабжения, с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками с использованием технических решений автономных бесконтактных генераторов и их систем стабилизации параметров электроэнергии новизна которых подтверждена патентами РФ.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на математическое моделирование физических процессов, протекающих в АИЭ, на исследование электромагнитной совместимости АИЭ с собственными стабилизаторами параметров электроэнергии, а также на исследование электромагнитной совместимости АИЭ с статическими преобразователями, применяемых в САЭ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. Пособие для вузов.- М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
2. Бут Д.А. Синтез автономных электроэнергетических систем //Электричество. - 1994, № 1. - С. 3 - 12.
3. Джюджи Л., Пелли Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты. Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 400 с.
3. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Системы автономного электроснабжения: Монография. – Краснодар, Б/И, 2001. – 333 с.
4. Григораш О.В., Сергеев А.С., Филимонов А.С. Трансформаторы с вращающимся магнитным полем / Энергетик, № 1, 2002, с.37-38.
5. Григораш О.В. Асинхронные генераторы в системах автономного электроснабжения / Электротехника, № 1, 2002, с.30 – 35.
6. Григораш О.В., Кабанков Ю.А. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии / Электротехника, № 3, 2002, с. 22-26.
7. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н., Казаков Д.А. Математический аппарат для оценки эффективности систем гарантированного электроснабжения: Монография. – Краснодар: Б/И, 2002. – 285с.
8. Григораш О.В., Мельников Д.В., Дацко А.В. Оценка эффективности бесконтактных высокоскоростных генераторов на этапе проектирования / Промышленная энергетика, № 4, 2002, с. 38-41.
9. Григораш О.В., Педько М.Н. Состояние и перспективы развития систем гарантированного электроснабжения / Промышленная энергетика, № 7, 2002, с. 32-36.

10. Григораш О.В., Мелехов С.В., Мельников Д.В. Эффективный высокоскоростной привод для автономных систем электроснабжения / Энергетик, № 10, 2002, с. 27-28.
11. Григораш О.В., Мелехов С.В., Мельников Д.В., Дацко А.В. К вопросу выбора оптимальной структуры системы автономного электроснабжения / Промышленная энергетика, № 11, 2002, с. 23-27.
12. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А., Энговатова В.В. Структурный синтез системы электроснабжения потребителей / Механизация и электрификация с.х., № 11, 2004, с. 31-33.
13. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А. Способы синтеза оптимальной структуры САЭ / Труды КубГАУ. Выпуск № 1. – Краснодар 2006, с 272-279.
14. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А., Шхалахов Р.С. Статические преобразователи электроэнергии: Монография. – КубГАУ. – Краснодар, 2006, 264 с.
15. Григораш О.В., Степура Ю.П., Пятикопов С.М. О перспективах применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии / Промышленная энергетика, № 7, 2006, с 37 – 41.
16. Григораш О.В., Божко С.В., Нормов Д.А. и др. Модульные системы гарантированного электроснабжения: Монография. - КВВАУЛ. – Краснодар, 2006, 306 с.
17. Григораш О.В., Симоненко С.А., Передистый А.М., Столбчатый Д.А., Усков А.Е. Выбор оптимальной структуры систем автономного электроснабжения / Механизация и электрификация с.х., № 8, 2007. С. 31-33.
18. Григораш О.В., Божко С.В., Нефедовский В.А., Столбчатый Д.А. Непосредственные преобразователи частоты: Монография. - КубГАУ. – Краснодар, 2008, 187 с.
19. Григораш О.В., Усков А.Е., Энговатова В.В., Военцов Д.В., Чесовской А.С. Автоматизированные устройства стабилизации напряжения переменного тока / Промышленная энергетика, № 5, 2008, с. 17 – 20.

20. Григораш О.В., Новокрешинов О.В., Хамула А.А., Столбчатый Д., Олешко А.С. К вопросу стабилизации напряжения и частоты бесконтактных автономных генераторов / Труды КубГАУ. – Краснодар, № 2, 2008, с.227-232.

21. Кобзев А.В., Михальченко Г.Я., Музыченко Н.М. Модуляционные источники питания РЭА. – Томск.: Радио и связь, 1990. – 336 с.

22. Патент РФ № 2216032. МПК 7 G 05 F 1/20. Стабилизатор напряжения переменного тока / Григораш О.В., Богатырев Н.И., Вронский О.В. и др. Бюл. № 31, 2003.

23. Патент РФ № 2217857. МПК 7 H 02 M 5/27, 5/297, H 02 P 7/42. Трехфазный преобразователь частоты / Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. и др. Бюл. № 33, 2003.

24. Патент РФ № 2248083. МПК H 02 K 17/14, 3/28. Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Григораш О.В., Ванурин В.Н. и др. Бюл. № 7, 2005.

25. Патент РФ № 2249290. МПК H 02 K 17/14, 3/28. Статорная комбинированная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Григораш О.В., Ванурин В.Н. и др. Бюл. № 9, 2005.

26. Патент РФ № 2249902. МПК H 02 K 17/14, 3/28. Статорная многофункциональная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Григораш О.В., Ванурин В.Н. и др. Бюл. № 10, 2005.

27. Патент РФ № 2257515. МПК F 25 B 11/00. Газотурбогенератор / Богатырев Н.И., Григораш О.В., Темников В.Н. Бюл. № 21, 2005.

28. Патент РФ № 2262182. МПК H 02 P 9/46. Устройство стабилизации напряжения асинхронного генератора / Григораш О.В., Новокрешинов О.В., Хамула А.А. и др. Бюл. № 28, 2005.

29. Патент РФ № 2274891. МПК G 05 F 1/46. Источник напряжения постоянного тока / Григораш О.В., Ракло А.Н., Григораш С.О. и др. Бюл. № 11, 2006.

30. Патент РФ № 2275733. МПК H 02 M 5/27, H 02 K 47/00. Стабилизированный однофазно-трехфазный преобразователь фаз / Григораш О.В., Ракло А.Н., Трубин А.Н. и др. Бюл. № 12, 2006.

31. Патент РФ № 2281542. МПК G 01 R 1/120. Стабилизатор трехфазного напряжения / Григораш О.В., Савенко А.В., Головенко Д.С. и др. Бюл. № 22, 2006.

32. Патент РФ № 2282886. МПК G 05 F 1/20. Однофазный стабилизатор напряжения / Григораш О.В., Цыганков Б.К., Новокрешинов О.В. и др. Бюл. № 24, 2006.

33. Патент РФ № 2332772. МПК H 02 K 19/38, H 02 P 9/38. Синхронный генератор / Богатырев Н.И., Григораш О.В., Темников В.Н. и др. Бюл. № 9, 2008.

34. Патент РФ № 2 335081. МПК H 02 P 9/46. Устройство для стабилизации напряжения асинхронного генератора / Григораш О.В., Хамула А.А., Военцов Д.В. и др. Бюл. № 27, 2008.

35. Патент РФ № 2 366071. МПК H 02 P 9/46. Устройство для стабилизации частоты и напряжения автономных бесконтактных генераторов / Григораш О.В., Хамула А.А., Пыдык А.Н. и др. Бюл. № 24, 2009.

36. Патент РФ № 2 366072. МПК H 02 P 9/46. Устройство для стабилизации напряжения бесконтактных генераторов переменного тока / Григораш О.В., Хамула А.А., Олешко А.С. и др. № 24, 2009.

37. Птицын О.В., Григораш О.В. Генераторы переменного тока. Состояние и перспектива //Электротехника. - 1994, № 9. - С. 2 – 6.

38. Торопцев Е.Д. Авиационные асинхронные генераторы - М, Транспорт, 1970. – 234 с.

Научное издание

Печатается по решению ученого совета Краснодарского высшего
военного авиационного училища летчиков
им. Героя Советского Союза А.К. Серова

Божко Сергей Владимирович
Григораш Олег Владимирович
Попов Андрей Юрьевич
Алмазов Вячеслав Васильевич
Квитко Андрей Викторович

АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Редактор *Т.Ф. Козловская*
Компьютерная верстка *О.В. Григораш*

Сдано в набор «03» февраля 2012 г.
Подписано в печать «27» февраля 2011 г.
Формат 60х84/16. Бумага типографская. Усл. печ. л. 10,8
Уч.-изд. л. 10,1. Тираж 300 экз. Цена свободная.
Изд. № 277-04. Заказ № 28 – 2012 г.

Типография КВВАУЛ,
350005, г. Краснодар, ул.Дзержинского, 135
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков