

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Баламирзоев Назим Ладиевич  
Должность: Врио ректора  
Дата подписания: 21.12.2022 09:22:23  
Уникальный программный ключ:  
b261c06f25acbb0d1e6de5fc04abdfed0091d138

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное Общеобразовательное Учреждение ВПО  
**ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Факультет компьютерных технологий,  
вычислительной техники и энергетики**

**Кафедра «ТиОЭ»**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению лабораторных работ №№3,4**

**по дисциплине: «Оптимизация в электроэнергетической системе»**

**для студентов направления подготовки магистров  
130402 «Электроэнергетика и электротехника»**

**Часть II**



**Махачкала 2017**

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное Общеобразовательное Учреждение ВПО  
ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Факультет компьютерных технологий,  
вычислительной техники и энергетики**

**Кафедра «ТиОЭ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению лабораторных работ №№3,4**

**по дисциплине: «Оптимизация в электроэнергетической системе»**

**для студентов направления подготовки магистров  
130402 «Электроэнергетика и электротехника»  
всех форм обучения**

**Часть II**



**Махачкала 2017**

## УДК 621.311

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки магистров 130402. «Электроэнергетика и электротехника» для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Оптимизация в электроэнергетической системе» -Махачкала, ДГТУ, 2017. – 23с.

Данные методические указания являются учебным руководством к выполнению лабораторных работ №№3, 4. Приведены краткие теоретические сведения, подробно изложены методы расчета и методические указания к исследованию устройств регулирования режимами систем.

В второй части методических указаниях приводятся требования по выполнению лабораторных работ, электрические схемы соединений, перечень аппаратур, а также указания по проведению эксперимента. Кратко изложены отличие от системы, работающей параллельно с электрической сетью бесконечной мощности, где частота системы определяется частотой этой сети, в автономной электрической системе частота таким образом не поддерживается и возникает необходимость ее регулирования. В настоящем эксперименте моделируется автономная электрическая система, содержащая генератор, приводимый во вращение первичным двигателем, а также электромеханическую и активную нагрузки.

**Составители:** д.т.н., профессор каф. ТиОЭ  
к.т.н., доцент каф. ТиОЭ

Исмаилов Т.А.,  
Шангереева Б.А.

**Рецензенты:** Ведущий инженер Филиала  
ОАО «Русгидро»-«Дагестанский филиал»  
д.т.н., профессор каф. ТиОЭ

Кадиев С.М.  
Саркаров Т.Э.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	5
<b>1. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ</b> .....	7
<b>2. ОФОРМЛЕНИЕ И СДАЧА ОТЧЁТА</b> .....	8
<b>3. ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ</b> .....	9
<b>4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ</b> .....	10
4.1. Автоматическое регулирование частоты и активной мощности.....	10
<b>5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «Автоматическое регулирование частоты автономной электрической системы»</b> .....	11
5.1. Теоретические сведения.....	11
5.2. Перечень аппаратуры.....	13
5.3. Указания по проведению эксперимента.....	14
5.4. Контрольные вопросы.....	15
<b>6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «Автоматическое регулирование активной мощности синхронного генератора, работающего параллельно с электрической системой бесконечной мощности»</b> .....	16
6.1. Теоретические сведения.....	16
6.2. Статическая устойчивость работы генераторов при работе параллельно с сетью бесконечной мощности.....	16
6.3. Перечень аппаратуры.....	18
6.4. Указания по проведению эксперимента.....	19
6.5. Контрольные вопросы.....	20
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	21

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Оптимизация – задача выявления оптимального процесса из числа прочих, сопоставляемых по критерию оптимальности.

В оптимизации можно выделить:

- определение оптимальной стратегии развития энергосистем - сооружение или реконструкция систем электроэнергетики и отдельных объектов (выбор месторасположения и мощности, установление сроков ввода в эксплуатацию новых электростанций, подстанций и ЛЭП;

- выбор наилучшей конфигурации электрических сетей;

- распределение нагрузок между отдельными электростанциями работающей или проектируемой системы;

- выбор стратегии наилучшего использования материальных ресурсов (видов топлива и т. д.);

Уравнения установившегося режима  $W(X, Y) = 0$  связывают между собой параметры установившегося режима электроэнергетической системы. Обозначим совокупность этих параметров вектор - столбцом  $Z=(Z_1, Z_2, \dots, Z_m)$ . При расчете установившегося режима параметры режима  $Z$  делятся на заданные независимые  $Y$  и неизвестные зависимые  $X$  переменные. Число уравнений установившегося режима в системе  $W(X, Y) = 0$  равно числу зависимых параметров режима  $X$ . Число  $t$  параметров режима  $Z$ , входящих в уравнение  $W(X, Y) = 0$ , больше  $2n$ — числа этих уравнений. Такие системы уравнений называются неопределёнными. Избыток числа переменных по сравнению с числом уравнений физически означает, что электроэнергетическая система имеет  $t-2n$  степеней свободы. Наличие степеней свободы позволяет регулировать режим. Например, пусть имеется система из двух станций и одного нагрузочного узла (см. рис.1).

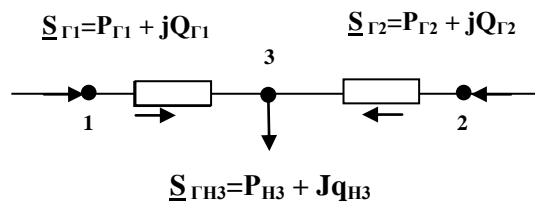


Рис.1.

Предположим, что уравнения установившегося режима имеют вид баланса мощностей для нагрузочного узла, т. е.  $P_{G1} + P_{G2} + P_{N3} = 0$ ;  $Q_{G1} + Q_{G2} + Q_{N3} = 0$ .

Нагрузки  $P_{N3}$ ,  $Q_{N3}$  заданы. Два уравнения баланса  $P$  и  $Q$  содержат четыре переменные. Эти уравнения можно удовлетворить при различных сочетаниях  $P_{G1}$  и  $P_{G2}$ ,  $Q_{G1}$  и  $Q_{G2}$ . Две из этих мощностей можно задавать произвольно в пределах между минимально и максимально возможными их значениями. Остальные мощности будут определены из условий баланса. В данном случае система имеет две степени свободы.

Степени свободы определяются возможностью регулирования  $P$  и  $Q$  станций, наличием регулируемых трансформаторов, возможностью включения и отключения оборудования и т. д. Именно наличие степеней свободы и определяет существование множества возможных режимов, удовлетворяющих заданной нагрузке потребителей. Среди режимов этого множества практический интерес представляют лишь допустимые режимы, при которых параметры режима остаются в допустимых пределах. Цель управления - среди допустимых режимов найти наиболее экономичный.

При оптимизации за счет наличия степеней свободы параметров режима, т. е. в результате возможности их изменения, выбираются такие значения параметров режима, которые обеспечивают меньшие суммарные потери активной мощности в сети или меньший суммарный расход условного топлива.

Допустимый режим должен удовлетворять условиям надежности электроснабжения и качества электроэнергии. При расчетах допустимых режимов условия надежности электроснабжения и качества электроэнергии учитываются в виде ограничений-равенств и неравенств на контролируемые параметры режима.

Оптимальный режим - это такой из допустимых, при котором обеспечивается минимум суммарного расхода условного топлива при заданной в каждый момент времени нагрузке потребителей.

Наиболее часто решаются оптимизационные задачи трех видов:

➤ Оптимизация режима энергосистем по  $P$  тепловых электростанций, или распределение активных мощностей между тепловыми станциями, позволяет найти активные мощности станций, соответствующие минимуму суммарного расхода условного топлива на тепловых электрических станциях с приближенным учетом потерь в сети при заданных нагрузках потребителей.

➤ Оптимизация режима электрической сети приводит к уменьшению потерь активной мощности в результате оптимального выбора напряжений узлов, реактивной мощности источников и коэффициентов трансформации регулируемых трансформаторов и автотрансформаторов при учете технических ограничений.

➤ Комплексная оптимизация режима позволяет находить оптимальные значения как активных мощностей станций, так и генерируемых реактивных мощностей, а также модулей и фаз напряжений в узлах сети при учете технических ограничений.

В второй части методических указаний содержатся описания к лабораторным работам №№1,2 посвященным опытным исследованиям «Автоматическое регулирование частоты автономной электрической системы» «Автоматическое регулирование активной мощности синхронного генератора, работающего параллельно с электрической системой бесконечной мощности».

## **1. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Лабораторные работы выполняются бригадами в составе 3-4-х человек. Каждая бригада по указанию преподавателя выполняет последовательно лабораторные работы в объеме учебного плана, описания к которым приведены во втором разделе.

### **а) Рабочее место в лаборатории**

Для выполнения лабораторных работ каждой бригаде студентов предоставляется одно рабочее место (лабораторный стол), укомплектованный универсальными измерительными приборами и лабораторными макетами. В корпусе каждого макета смонтированы все необходимые детали. На рабочую панель макета выведены только коммутационные элементы (гнезда, переключатели). По окончании работы необходимо выключить все измерительные приборы и сдать рабочее место лаборанту.

### **б) Подготовка к работе**

Успешно выполнить лабораторную работу можно лишь при условии хорошей подготовки к ней. При домашней подготовке к работе каждому студенту следует:

- ознакомиться с описанием предстоящей работы, знать цель и порядок её выполнения;
- изучить теоретический материал соответствующей части курса в объеме конспекта лекций (или по литературе, которая указана в описании работы) и продумать ответы на контрольные вопросы;
- письменно выполнить задание, указанное в разделе «Подготовка к работе»;
- начертить схемы проведения эксперимента и таблицы для записи данных;
- продумать методику и ход предстоящего эксперимента в лаборатории;
- начертить таблицу для записи данных, заготовить миллиметровку для осциллограмм и графиков;
- ознакомиться с применяемой в работе измерительной аппаратурой и с лабораторным макетом по описаниям.

### **в) Выполнение работ в лаборатории**

Перед началом лабораторной работы проводится коллоквиум с целью проверки подготовленности каждого студента к работе. Студент получает несколько вопросов, как по методике проведения данной работы, так и по теории соответствующего раздела. При удовлетворительных ответах на вопросы студент допускается к работе.

Студенты, допущенные к работе, выполняют ее в соответствии с описанием. При этом все члены бригады обязаны принимать активное участие в эксперименте, а не ограничиваться лишь пассивным наблюдением за его ходом.

При снятии экспериментальных данных в целях экономии времени, а также для наглядного представления зависимостей, рекомендуется следующий порядок:

- прежде всего, без каких-либо записей, при соблюдении всех необходимых требований проводится опыт. В процессе опыта уясняется общий характер зависи-

мости и оценивается ее соответствие с ожидаемой из теоретических предположений;

- для снятия кривой опыт повторяется. Результаты опыта заносятся в заранее подготовленные таблицы, по ним строятся необходимые графики (снятые точки обозначаются на них точками, кружками или крестиками);
- для уменьшения погрешности в процессе снятия какой-либо зависимости (или семейства однотипных зависимостей) желательно производить отчеты по одной и той же шкале измерительного прибора. В ходе эксперимента необходимо записать все условия, при которых он выполняется;
- расчеты, связанные с обработкой экспериментальных данных, проводятся в лаборатории в процессе выполнения работы. Работа считается законченной после просмотра и утверждения результатов эксперимента преподавателем.

## 2. ОФОРМЛЕНИЕ И СДАЧА ОТЧЕТА

После выполнения лабораторной работы каждый член бригады оформляет отдельный экземпляр отчета по работе на стандартных листах писчей бумаги. Титульный лист отчета оформляется по прилагаемому ниже образцу. Отчет должен быть по возможности, без описания хода работы и промежуточных пояснений. При оформлении его необходимо соблюдать следующее:

1. В начале отчета указываются цель и задачи работы.
2. В разделе «Подготовка к работе» приводятся краткие ответы на вопросы домашнего задания, записываются основные формулы, необходимые для обработки экспериментальных данных, а также качественное изображение графиков и диаграмм, исследуемых в лабораторной работе.
3. В разделе «Лабораторное задание» приводятся рабочие блок-схемы измерений и экспериментально полученные данные, которые размещаются в такой же последовательности, как выполняется работа. Результаты эксперимента представляются в виде таблиц, графиков и осциллограмм. Все представленные в отчете результаты должны иметь названия с обязательным указанием условий эксперимента.
4. Графики и осциллограммы вычерчиваются на листах миллиметровки. На каждом графике должны строиться только те кривые, которые предусмотрены соответствующим пунктом описания.
5. В конце отчета формулируются выводы о проделанной работе. Характер и размеры работы их не регламентируются. Выводы могут содержать толкование полученных результатов, объяснение причин отклонения результатов эксперимента от теории, оценки погрешностей и т.д.

Сдача отчета производится каждым студентом в отдельности и сопровождается ответами на вопрос преподавателя. Студент, не сдавший отчет по предыдущей работе, к следующей работе не допускается. В этом случае студент остается в лаборатории для оформления отчета и подготовки к его защите. Сдача отчета производится в конце занятия. Только после этого может быть проведен коллоквиум по текущей лабораторной работе и студент получает допуск к ее выполнению. Отработка пропущенной работы производится в дополнительно назначенное время.



### 3. ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ:

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное Общеобразовательное Учреждение ВПО  
ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет компьютерных технологий,  
вычислительной техники и энергетики

Кафедра «ТиОЭ»

Отчет по лабораторной работе № \_\_\_\_

«.....»

(название работы)

Выполнил (а):  
Студент(ка) \_\_\_\_\_ факультета  
Курс \_\_\_\_\_  
Группа \_\_\_\_\_  
Ф.И.О. \_\_\_\_\_  
Принял:  
Преподаватель  
Ф.И.О. \_\_\_\_\_  
Подпись \_\_\_\_\_

Махачкала 20\_\_ г.

## 4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### 4.1. Автоматическое регулирование частоты и активной мощности

Отклонение частоты является общесистемным показателем качества электрической энергии, так как во всех точках синхронно работающей электроэнергетической системы частота одинакова. Изменение частоты происходит при нарушении баланса между суммарной мощностью первичных двигателей (турбин) и нагрузкой генераторов. При набросе или сбросе мощностей, приводящий к изменению частоты в электроэнергетической системе.

Конструктивные параметры вращающихся агрегатов, производящих и потребляющих электрическую энергию, рассчитываются таким образом, чтобы при номинальной частоте КПД был максимальным. Отклонение частоты от номинального значения ухудшает экономические показатели отдельных элементов и электроэнергетической системы в целом. Наиболее существенно отклонения частоты сказываются на работе самих электростанций: изменение производительности механизмов собственной нужды, приводом которых являются асинхронные электродвигатели (питательные насосы, циркуляционные насосы, дымососы, вентиляторы) нарушает режим работы парогенератора и турбины; изменение частоты вращения турбин вызывает рост потерь и ускоряет износ рабочих лопаток. Все это приводит к снижению экономических показателей работы электростанций.

Таким образом, для надежной и экономичной работы отдельных элементов электроэнергетической системы недопустимы значительные отклонения частоты (более 1-2%). Однако точность поддержания частоты в пределах 1-2% совершенно недостаточна для обеспечения экономичной работы электроэнергетической системы в целом. Объясняется это тем, что при изменении частоты значительно и по-разному меняются нагрузки генераторов вследствие различных коэффициентов статизма характеристик первичных регуляторов турбин.

Даже кратковременные перераспределения нагрузок приводят к частым отклонениям режима электроэнергетической системы от экономически наиболее выгодного, а следовательно, к пережогу топлива в целом по электроэнергетической системе.

Поэтому согласно Правилам устройства электроустановок и Правилам технической эксплуатации в современных электроэнергетических системах отклонение частоты допускается в пределах  $50 \pm (0,1-0,2)$  Гц. Таким образом, при нормальных эксплуатационных условиях частота должна регулироваться с очень высокой точностью.

Регулирование частоты осуществляется изменением суммарной мощности турбин путем изменения впуска энергоносителя (пара, воды). Однако для обеспечения минимума затрат электроэнергетической системы на покрытие фактической нагрузки изменение мощностей турбин должно изменяться так, чтобы не нарушались ограничения по допустимым значениям перетоков мощности и условия наиболее выгодного распределения активных нагрузок. Таким образом, регулирование частоты в электроэнергетической системе неразрывно связано с регулированием мощности и распределением активных нагрузок между отдельными агрегатами и электростанциями.

## 5. Лабораторная работа №3

### «Автоматическое регулирование частоты автономной электрической системы»

#### 5.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В отличие от системы, работающей параллельно с электрической сетью бесконечной мощности, где частота системы определяется частотой этой сети, в автономной электрической системе частота таким образом не поддерживается и возникает необходимость ее регулирования.

В настоящем эксперименте моделируется автономная электрическая система, содержащая генератор, приводимый во вращение первичным двигателем, а также электромеханическую и активную нагрузки. Целью эксперимента является исследование влияния на частоту электрической системы параметров частотной характеристики генератора  $P(f)$ , а также вида и параметров частотной характеристики нагрузки.

С помощью программы «Регулирование частоты автономной электрической системы» можно, во-первых, регистрировать режимные параметры работы системы и, во-вторых, (в автоматическом режиме работы программы) задавать необходимую частотную характеристику генератора. В последнем случае генератор будет поддерживать заданный режим работы до тех пор, пока частота в системе не станет меньше критической, после чего возникает лавина частоты и электрическая система аварийно-останавливается.

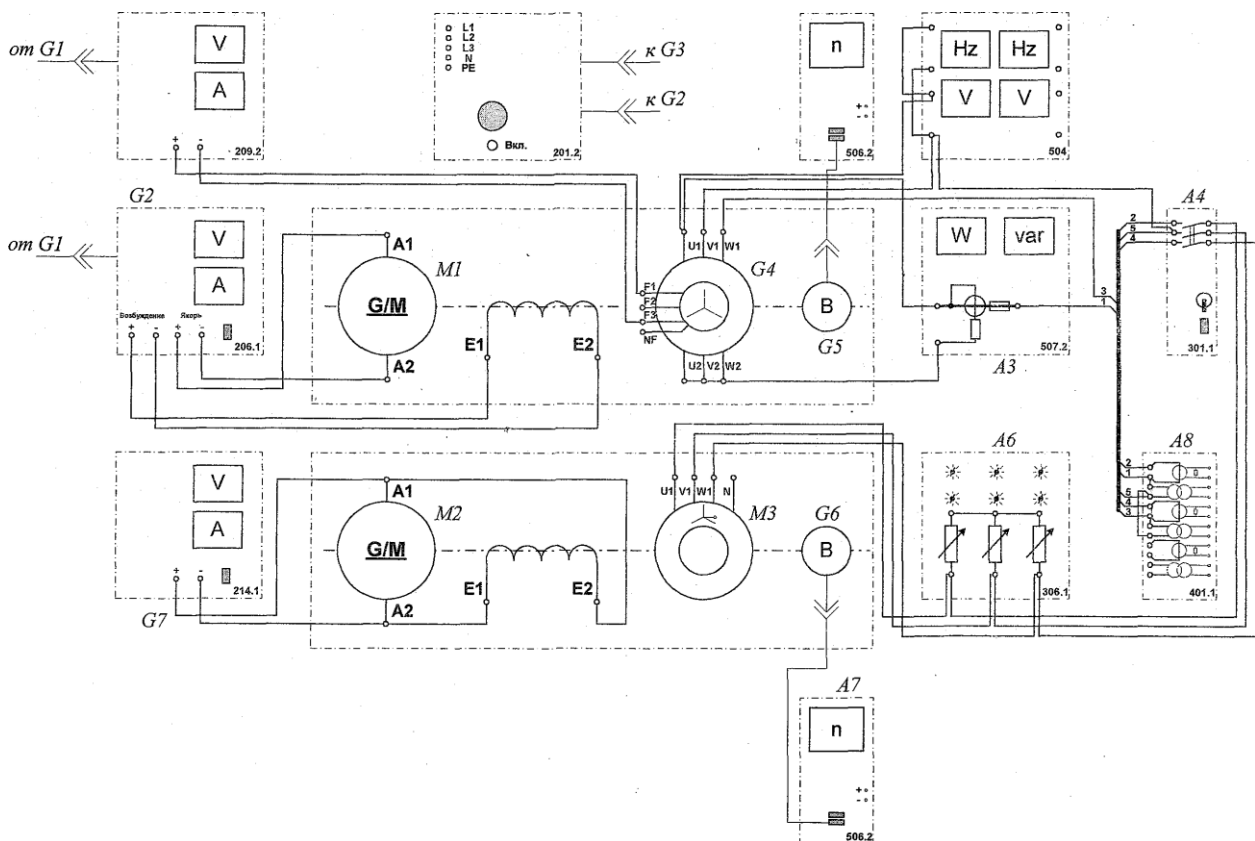


Рис.2. Электрическая схема соединений

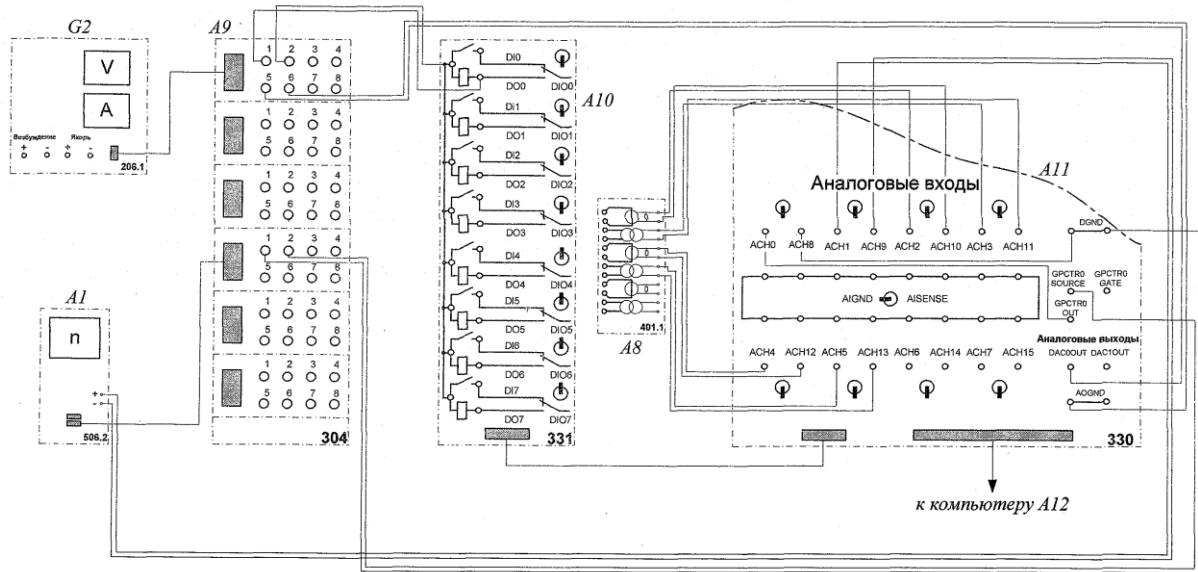




Рис.3. Продолжение электрической схемы соединений

## 5.2. Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
A1, A7	Указатель частоты вращения	506.2	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>
A2	Измеритель напряжений и частот	504.2	2 вольтметра 0...500 В~ 2 частотомера 45...55 Гц; 220 В ~
A3	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.
A4	Трехполюсный выключатель	301.1	400 В ~; 10 А
A6	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт;
A8	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В/3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A9	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6x8 гнезд
A10	Блок ввода-вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выходов
A11	Коннектор	330	8 аналог, диф. входов; 2 аналог, выхода; 8 цифр., входов/ выходов
A12	Персональный компьютер	550	IBM совместимый, Windows 95-XP, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	Цепь якоря 0...250 В 3 А Цепь возбуждения 200 В 1 А
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2	0...40В ~; 3,5 А
G4	Машина переменного тока	102.1	100 Вт/~ 230 В/1500 мин <sup>-1</sup>
G5, G6	Преобразователь угловых перемещений	104	6 каналов /2500 импульсов за оборот
G7	Источник постоянного напряжения	214.1	0...125 В 3 А
M1, M2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт/220 В/0,56 А (якорь) / 2x110 В/0,25 А (возбуждение)
M3	Асинхронный двигатель	106	/380 В

### 5.3. Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, «» используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника **G1**.
- Соедините вилки питания 220 В устройств, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Мощности фаз активной нагрузки **A6** установите равными 40 % от 50 Вт. Переключатели режимов работы трехполюсного выключателя **A4**, источника **G2** питания двигателя постоянного тока, возбудителя **G3** синхронной машины, источника постоянного напряжения **G7** установите в положение «**РУЧН.**». Тумблеры делителей напряжения коннектора **A11** установите в положение «**1:1**». Тумблер выбора режима работы общей точки аналоговых входов коннектора **A11** установите в положение «**AIGND**». Тумблеры выбора режима работы цифровых входов/выходов блока **A10** ввода-вывода цифровых сигналов установите в положение «**выход**» (тумблер вниз) для контактов **D100...D103**, в положение «**вход**» (тумблер вверх) для контактов **D104...D107**.
- Включите выключатели «**СЕТЬ**» трехполюсного выключателя **A4**, источника **G2** питания двигателя постоянного тока, возбудителя **G3** синхронной машины, указателей **A1** и **A7** частоты вращения, источника постоянного напряжения **G7**, измерителя мощностей **A3**.
- Включите источник **G1**. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер **A12** и запустите программу «*Регулирование частоты автономной электрической системы*».
- Включите возбудитель **G3** синхронной машины, нажав кнопку «**ВКЛ.**» на его передней панели. Вращая регулировочную рукоятку, установите ток обмотки возбуждения генератора равным **2А**.
- Запустите сбор данных в ручном режиме, нажав для этого виртуальную кнопку «**Запустить**» ► или выбрав соответствующий пункт в меню «**Действия**». Регулировочную рукоятку источника питания **G2** двигателя постоянного тока поверните против часовой стрелки до упора. Включите источник **G2**, нажав кнопку «**ВКЛ.**» на его передней панели.
- Наблюдая изменение параметров схемы по виртуальным приборам программы, вращайте регулировочную рукоятку источника **G2** по часовой стрелке. Установите частоту вращения генератора равной примерно 1500 об/мин, после чего включите выключатель **A4**, нажав соответствующую кнопку на его передней панели. Убедитесь в том, что нагрузочный силовой агрегат пришел во вращение. Обратите внимание на изменение параметров режима работы схемы.
- Нажмите кнопку «**ВКЛ.**» источника постоянного напряжения **G7**.
- Изменяйте мощности фаз активной нагрузки **A6**, напряжение источника питания **G2** двигателя постоянного тока, ток возбуждения генератора, противодействующий момент на валу нагрузочного агрегата (вращением регулировочной рукоятки источника **G7**). Наблюдайте изменение режимных параметров схемы.
- Остановите сбор данных, нажав для этого виртуальную кнопку «**Остановить**» || или выбрав соответствующий пункт из меню «**Действия**».
- Регулировочную рукоятку источника питания **G2** двигателя постоянного тока установите в положение против часовой стрелки до упора. Отключите источник **G2**, нажав на кнопку «**ОТКЛ.**» на его передней панели. Отключите трехполюсный выключатель **A4**.
- Переключатель режима работы источника **G2** установите в положение «**АВТ.**». Включите выключатель «**СЕТЬ**» блока **A10** ввода-вывода цифровых сигналов. Выберите

автоматический режим работы программы, нажав для этого соответствующую виртуальную кнопку  на экране компьютера.

➤ Задайте уставки управления (кнопка ) , используемые программой. Например, оставьте уставки, заданные по умолчанию.

➤ Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» ►. После завершения разгона генератора включите выключатель А4. Изменяйте частотную характеристику задания (путем «перетаскивания» мышкой зеленой точки на соответствующем графике), мощности фаз активной нагрузки А6, противодействующий момент на валу нагрузочного агрегата (вращением регулировочной рукоятки источника G7). Наблюдайте изменение режимных параметров схемы.

➤ При «аварийной» остановке генератора остановите программу и запустите вновь (кнопкой «Остановить» II и «Запустить» ► соответственно). Если генератор аварийно останавливается при первоначальном разгоне или подключении нагрузки, уменьшите его ток возбуждения до значения 1,5-1,2 А.

➤ Измените значения уставок управления. Повторите эксперимент.

➤ При работе с программой следует пользоваться её возможностями:

- Для удобства определения значений величин по графику на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

- Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора - справа налево и снизу вверх.

- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши ее одновременного перемещения в нужную сторону.

➤ По завершении экспериментов отключите источник G1 и выключатели «СЕТЬ» блоков G2, G3, G7, A1, A3, A4, A7, A10. Закройте программу «Регулирование частоты автономной электрической системы».

#### 5.4. Контрольные вопросы

1. Понятие оптимизации энергосистемы.
2. Что дает регулирование частоты вращения генератора?
3. Параметры энергосистемы.
4. В чем отличие параметров состояния и параметров режима?
5. Как влияет на режимные параметры изменение частотных характеристик, мощностей и напряжений?

## **6. Лабораторная работа №4**

### **«Автоматическое регулирование активной мощности синхронного генератора, работающего параллельно с электрической системой бесконечной мощности»**

#### **6.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Основная задача автоматического управления активной мощностью синхронных генераторов - обеспечить выработку и передачу необходимого количества электроэнергии при наименьшем удельном расходе условного топлива. Однако автоматическое управление мощностью связано с автоматическим регулированием частоты вращения энергоагрегатов, при этом одно из них оказывается главным, определяющим режим работы синхронного генератора.

Синхронный генератор, работающий параллельно с энергосистемой бесконечной мощности, увеличивает отдаваемую в систему активную мощность при увеличении вращающего момента на его валу. Этот момент, в свою очередь, определяется моментом первичного двигателя, вращающего синхронный генератор. Если первичный двигатель - паровая или гидротурбина, то момент на ее валу обеспечивается энергией соответственно пара или воды. Поэтому для того, чтобы увеличить активную мощность синхронного генератора, необходимо увеличить выпуск пара или воды в турбину.

В более общем случае для увеличения активной мощности синхронного генератора нужно увеличить механическую мощность первичного двигателя, приводящего этот генератор во вращения.

Однако синхронный генератор способен устойчиво преобразовывать механическую энергию в электрическую, развивая активную мощность не более некоторого предельного значения, выше которого произойдет поворот ротора генератора относительно поля статора. Генератор в этом случае выйдет из синхронизма (потеряет устойчивость) и будет вращаться с частотой больше синхронной. Для промышленных синхронных генераторов такой режим работы недопустим. Одним из способов выхода из него является разгрузка генератора по активной мощности.

В данной работе присутствует синхронный генератор, включаемый на параллельную работу с электрической системой бесконечной мощности, роль которой выполняет источник трехфазного питания стенда. Синхронизация генератора с сетью производится вручную по способу точной синхронизации. После того, как генератор окажется включенным на параллельную работу, с помощью программы «Регулирование активной мощности» можно задавать значение активной мощности, развиваемой генератором. В случае превышения мощностью генератора предельного по устойчивости значения, генератор переходит в асинхронный режим работы и через какое-то время возвращается в нормальный режим вследствие работы регулятора частоты вращения первичного двигателя. Если к этому времени оператор не уменьшит значение мощности, которое должен развивать генератор, процесс повторится.

Меняя параметры системы автоматического регулирования, можно изучить их влияние на качество процесса регулирования активной мощности синхронного генератора.

#### **6.2. Статическая устойчивость работы генераторов при работе параллельно с сетью бесконечной мощности**

Принципиальной особенностью синхронного генератора, подключенного к сети постоянного напряжения и постоянной частоты, является способность автоматически (без участия операторов) поддерживать постоянной частоту вращения своего ротора. Мощность, отдаваемая генератором в сеть, будет определяться механическим моментом, развиваемым турбиной, вращающей ротор. В случае изменения этого механического момента, приводящего во



вращение ротор, генератор без участия каких-либо внешних сил автоматически изменяет свой собственный электромагнитный момент, который противодействует вращению генератора. Сумма этих двух моментов становится равной нулю, и генератор продолжает вращаться с постоянной, синхронной скоростью. Состояние генератора с новым соотношением вращающего (от турбины) и тормозящего (внутреннего электромагнитного) моментов характеризуется так называемым *углом нагрузки*  $\theta$  (рис.4).

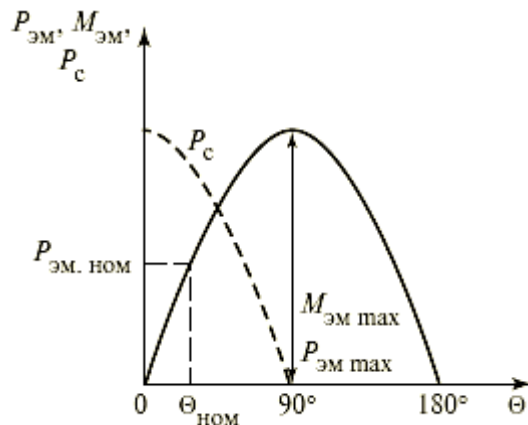


Рис.4. Угловая характеристика неявнополюсной синхронной машины

$\theta$  Эта зависимость носит название *угловой характеристики* и представляет собой функцию тормозящего электромагнитного момента  $M_{ЭМ}$  генератора (или электромагнитной мощности  $P_{ЭМ} = M_{ЭМ}\Omega_1$  где  $\Omega_1$  - угловая скорость ротора) от внутреннего угла нагрузки  $\theta$ . Для турбогенераторов угловая характеристика очень близка к синусоиде. Рабочая точка, при которой функционирует генератор, обозначена индексом номинального режима  $\theta_{НОМ}$  и  $P_{ЭМ.НОМ}$  причем  $\theta_{НОМ}$  выбирается таким, чтобы отношение максимума синусоиды  $P_{ЭМ.МАХ}$  к  $P_{ЭМ.НОМ}$  было в пределах 1,5-1,8. Сама мощность  $P_{ЭМ.МАХ}$  и соответствующий ей максимальный момент  $P_{ЭМ.МАХ}$  - это максимально возможная мощность и максимально возможный тормозящий электромагнитный момент, развиваемые данным синхронным генератором.

В области углов  $\theta$  от 0 до  $90^\circ$  синхронный генератор способен самостоятельно поддерживать синхронное вращение. За пределами угла  $90^\circ$  он теряет эту способность и выпадает из синхронизма. Способность самосинхронизировать свое вращение характеризуется *удельной синхронизирующей способностью*  $P_C$ , которая дана на рис.4. штриховой линией.

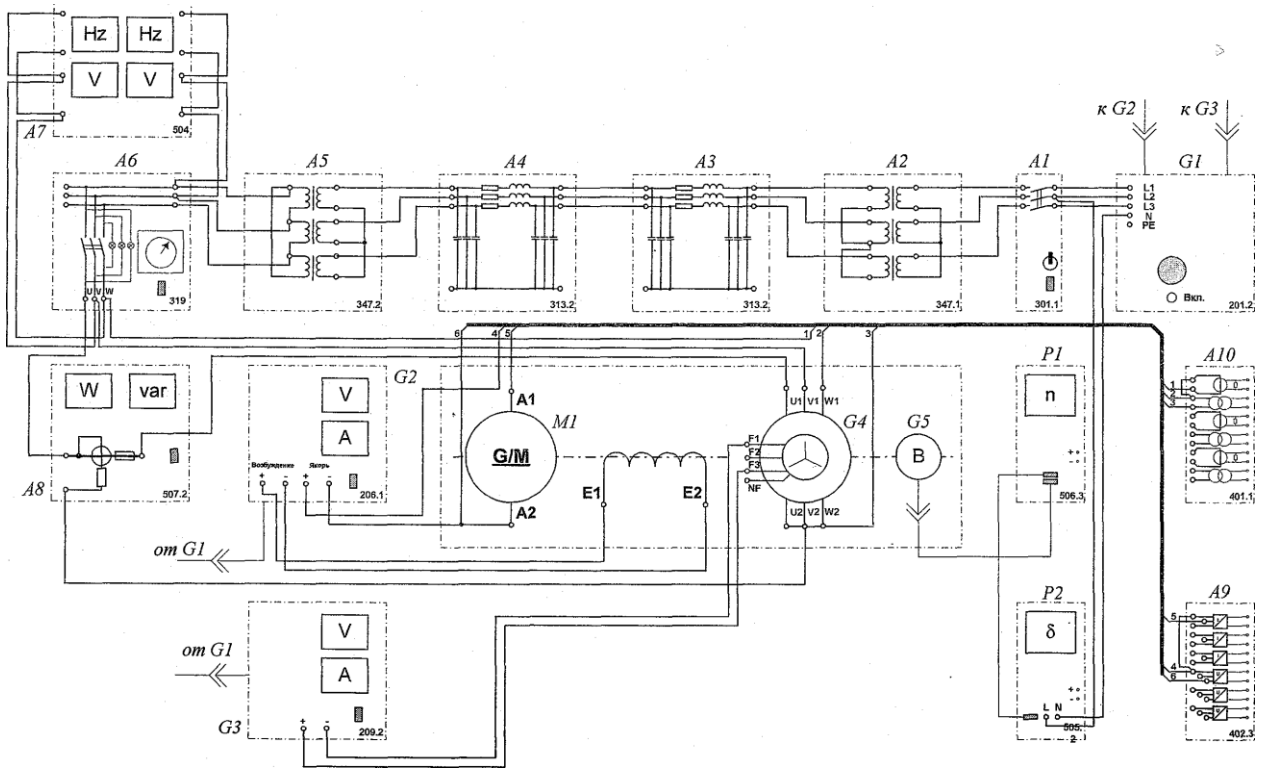



Рис. 5. Электрическая схема соединений

### 6.3. Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
A1	Трехполюсный выключатель	301.1	400 В 10 А
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 х 80 В-А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A3, A4	Модель линии электропередачи	313.2	400 В 3 х 0,5 А
A5	Трехфазная трансформаторная группа	347.2	3 х 80 В-А; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127/ 230 В (треугольник)
A6	Блок синхронизации	319	400 В ~; 10 А 3 индикаторные лампы; синхроноскоп
A7	Измеритель напряжений и частот	504.2	2 вольтметра 0...500 В ~ 2 частотомера 4Б...55 Гц; 220 В ~
A8	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.
A9	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 измерительных преобразователя "ток- напряжение" 5А/0,5А/5 В; 3 измерительных преобразователя "напряжение-напряжение" 1000 В/100 В/5 В
A10	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A11	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6х8 гнезд
A12	Блок ввода-вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выходов
A13	Коннектор	330	8 аналог, диф. входов; 2 аналог, выхода; 8 цифр, входов/ выходов
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	Цепь якоря 0...250 В 3 А Цепь возбуждения 200 В 1 А
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2	0...40 В 3,5 А
G4	Машина переменного тока	102.1	100Вт/-230В / 1500 мин <sup>-1</sup>
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов/ 2500 импульсов за оборот
M1	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт/220 В/ 0,56 А (якорь) / 2х110 В/0,25 А (возбуждение)
P1	Указатель частоты вращения	506.2	2000 <sub>1</sub> ...0...2000 мин
P2	Указатель угла нагрузки синхронной машины	505.2	-180°...0...180°

#### 6.4. Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.
- Соедините гнезда защитного заземления  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника **G1**.
- Соедините вилки питания 220 В устройств, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Переключатели номинальных фазных напряжений трехфазных трансформаторных групп **A2** и **A5** установите равными 220 В. Параметры линий электропередачи **A3** и **A4** установите следующими:  $R=0$  Ом,  $L/R_L=1,2$  Гн/32 Ом,  $C1=C2=0$  мкФ.
- Переключатели режимов работы трехполюсного выключателя **A1**, возбудителя **G3** синхронной машины и блока **A6** синхронизации установите в положение «РУЧН.», источника **G2** питания двигателя постоянного тока - в положение «АВТ.». Тумблеры делителей напряжения коннектора **A11** установите в положение «1:1». Тумблер выбора режима работы общей точки аналоговых входов коннектора **A11** установите в положение «AIGND». Тумблеры выбора режима работы цифровых входов/выходов блока **A12** ввода-вывода цифровых сигналов установите в положение «выход» (тумблер вниз) для контактов **DI00...DI03**, в положение «вход» (тумблер вверх) для контактов **DI04... DI07**.
- Включите выключатели «СЕТЬ» трехполюсного выключателя **A1**, источника **G2** питания двигателя постоянного тока, возбудителя **G3** синхронной машины, указателя **P1** частоты вращения, указателя **P2** угла нагрузки синхронной машины, блока **A9** датчиков тока и напряжения, блока **A6** синхронизации, измерителя мощностей **A8**, блока **A12** ввода-вывода цифровых сигналов.
- - Включите источник **G1**. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- - Включите выключатель **A1**, нажав на кнопку «ВКЛ.» на его передней панели. Приведите в рабочее состояние персональный компьютер **A14** и запустите программу «*Регулирование активной мощности*».
- Задайте уставки управления, нажав для этого соответствующую виртуальную кнопку или пункт главного меню. Например, оставьте уставки, заданные по умолчанию. Запустите сбор данных, нажав для этого виртуальную кнопку «Запустить» ► или выбрав соответствующий пункт в меню «Действия».
- Наблюдая изменения параметров генератора и сети по виртуальному графопостроителю программы, включите генератор на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации. Для этого выполните следующие действия:
  - Включите источник **G2**, нажав на виртуальный тумблер «**Выключатель первичного двигателя**» на экране компьютера. Регулятором «**Скорость вращения**» установите частоту вращения двигателя **M1** (генератора **G4**)  $1500 \text{ мин}^{-1}$ . Дождитесь окончания разгона силового агрегата.
  - Включите возбудитель **G3**, нажав на кнопку «ВКЛ.» на его передней панели. Вращая регулировочную рукоятку возбудителя **G3**, установите напряжение между фазами (линейное) генератора **G4** равным линейному напряжению сети. Равенство напряжений и частот генератора и сети определяйте по измерителю **A7**.
  - Обеспечьте условия синхронизации согласно табл. 4. (см. эксперимент 1.1.1) и подключите генератор к сети нажатием на кнопку «ВКЛ.» блока **A6** синхронизации.
- Настройте указатель угла нагрузки. Для этого:
  - С помощью виртуального регулятора «**Активная мощность**» установите мощность генератора, равную **0** Вт.

- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя **G3**, установите реактивную мощность генератора, равную **0** Вар. Значения активной и реактивной мощностей контролируйте по измерителю мощностей **A8**.
- Вращая тонкой отверткой реостаты «**Грубо**» и «**Точно**» на передней панели указателя угла нагрузки, установите значение угла нагрузки, равное нулю.
- С помощью виртуального регулятора «**Активная мощность**» задайте уставку мощности генератора, равную, например, 40 Вт. Убедитесь в том, что генератор действительно нагружается активной мощностью. Значения активной и реактивной мощности генератора наблюдайте на виртуальных приборах и измерителе мощностей **A8**. Удостоверьтесь, что показания реальных и виртуальных прибором совпадают.
- Задайте уставку мощности генератора, равную 65-90 Вт. Генератор должен увеличить мощность до предела устойчивости и опрокинуться (если этого не происходит даже при уставке 90 Вт, уменьшите ток возбуждения генератора регулировочной рукояткой на передней панели возбудителя **G3**). После этого в действие вступит автоматический регулятор частоты вращения, который вернет силовой агрегат в нормальный режим работы. Если к этому моменту не снизить значение уставки мощности, процесс потери устойчивости повторится.
- Остановите силовой агрегат, выполнив следующие действия:
  - Отключите генератор от сети, нажав для этого кнопку «**ОТКЛ.**» блока **A6** синхронизации.
  - Вращая регулировочную рукоятку возбудителя **G3**, снимите возбуждение с генератора **G4**. Отключите возбудитель **G3** нажатием на кнопку «**ОТКЛ.**» на его передней панели.
  - «**Вращая**» виртуальную регулировочную рукоятку, установите уставку скорости вращения на ноль. Остановите двигатель **M1** (генератор **G4**), нажав на виртуальный тумблер «**Выключатель первичного двигателя**».
- Измените уставки управления силовым агрегатом. Повторите эксперимент.
- При работе с программой следует пользоваться её возможностями:
  - Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.
  - Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора - справа налево и снизу вверх.
  - Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- По завершении экспериментов отключите источник **G1** и выключатели «**СЕТЬ**» блоков **A1, A6, A8, A9, A12, G2, G3, P1, P2**. Закройте программу «**Регулирование мощности**».

## 6.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под углом нагрузки  $\theta$ .
2. Какая зависимость носит название угловой характеристики.
3. Напишите формулу электромагнитной мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савина, Наталья Викторовна. Применение теории вероятностей и методов оптимизации в системах электроснабжения [Текст] : учеб. пособие: рек. ДВ РУМЦ / Н. В. Савина – Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2007. –272 с.
2. Чемборисова, Наиля Шавкатовна. Оптимизация режимов электроэнергетических систем и сетей [Текст] : учеб. пособие / Н. Ш. Чемборисова, А. С. Степанов, В. М. Пейзель. – Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2006. –104 с.
3. Мызин А.Л. Планирование развития электроэнергетических систем: учеб. пос. / А.Л. Мызин. – Екатеринбург: Уральский гос. техн. ун-т, 2004. –55 с.
4. Веников В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1990. –352с.
5. Филиппова, Н.Г. Основы разработки экспертных систем поддержки принятия решений в электроэнергетике : Лаб. практикум по курсу «Оптимизация развития энергосистем»: учеб. пособие/ Н. Г. Филиппова. – М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2003. –48 с.
6. Филиппова, Т.А. Энергетические режимы электрических станций и электроэнергетических систем : учеб./ Т.А. Филиппова. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос.техн. ун-та, 2005. –298 с.
7. Совалов С.А. Режимы Единой энергосистемы. – М.: Энергоатомиздат, 1983. –384с.
8. Арзамасцев Д.А. и др. Модели оптимизации развития энергосистем: учеб. для электроэнергет. спец. вузов / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мызин / Под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высш. шк., 1987. –272 с.
9. Анализ развития крупных системных аварий. Беляев А.Н., Горюнов Ю.П., Смирнов А.А., Смоловик С.В. – СПб: СПбГПУ, 2005 –57с.